

SCCS



**Системы управления,
связи и безопасности**

**Systems of Control,
Communication and
Security**

ISSN 2410-9916
<http://sccs.intelgr.com>

№2 2017

«Системы управления, связи и безопасности»

Периодическое электронное издание сетевого распространения.

Научный журнал.

№ 2. II квартал 2017 г.

Учредитель журнала: ООО «Корпорация «Интел Групп»

Главный редактор: С.И. Макаренко, кандидат технических наук, доцент.

Редакционная коллегия:

А.В. Баженов, кандидат технических наук, профессор; П.А. Будко, доктор технических наук, профессор; В.В. Борисов, доктор технических наук, профессор; Е.В. Гречишников, доктор технических наук, профессор; Ю.А. Кропотов, доктор технических наук, профессор; В.И. Левин, доктор технических наук, профессор; Г.И. Линец, доктор технических наук, доцент; А.С. Марков, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Р.Л. Михайлов, кандидат технических наук; Е.А. Новиков, доктор технических наук, доцент; С.С. Семенов, доктор технических наук, доцент.

Технический редактор: В.М. Коровин.

Ответственный секретарь: Л.А. Макаренко.

Адрес редакции и издателя журнала:

197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, д. 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.

Тел.: (812) 945-50-63. Сайт журнала: <http://sccs.intelgr.com>.

E-mail: sccs@intelgr.com

Издается с апреля 2015 года. Выходит четыре раза в год.

Журнал зарегистрирован как сетевое издание в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 61239 от 03.04.2015 г.

© ООО «Корпорация «Интел Групп», 2017

«Systems of Control, Communication and Security»

Scientific electronic reviewed edition.

2017, No. 2.

Founder of Journal: Intel Group Corporation, ltd.

Chief-in-Editor: S. I. Makarenko, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent.

Editorial Board:

A. V. Bazhenov, Ph.D. of Engineering Sciences. Full Professor;

V. V. Borisov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

P. A. Budko, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

E. V. Grecihnikov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

Y. A. Kropotov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor;

V. I. Levin, Dr. habil. of Engineering Sciences. Professor. Ph.D., Full Professor;

G. I. Linec, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

A. S. Markov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

R. L. Mikhailov, Ph.D. of Engineering Sciences;

E. A. Novikov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent;

S. S. Semenov, Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent.

Technical editor: V. M. Korovin.

Responsible editorial secretary: L. A. Makarenko.

Editor and Publishing House Address:

Bogatyirskiy pr, 32-1-A-6N, St. Petersburg 197372, Russia.

Phone: +7 812 945 50 63.

E-mail: sccs@intelgr.com

Published since 2015. The Journal is published 4 times a year.

Licensed ЭЛ № ФС 77 - 61239 on 03.04.2015 issued by Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Media (RosKomNadzor) of Russia.

УДК 004.042

Прогнозирование изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах

Кропотов Ю. А., Белов А. А., Проскуряков А. Ю.

Постановка задачи: задача прогнозирования изменения параметров временных рядов является актуальной, например, при мониторинге исследуемых процессов в цифровых информационных системах управления. Также такая задача возникает при исследованиях вопросов увеличения горизонта предсказания и минимизации погрешности прогноза. **Объектом исследования** являются методы параметрического прогнозирования, основанные на представлении временного ряда обобщенным многочленом по системам линейно независимых функций. **Объектом исследований** также являются алгоритмы прогноза, основанные на моделях авторегрессии, на моделях, воспроизводящих динамику временного ряда в форме искусственных нейронных сетей (ИНС). **Целью работы** является разработка алгоритмов управления, функционирования и обучения искусственной нейронной сети в матричной форме и получения алгоритма обратной подстановки, с помощью которого можно получить увеличение глубины прогноза. **Используемые методы:** в работе использовались методы декомпозиции эмпирических процессов, методы параметрического прогнозирования, методы нахождения оценок прогноза посредством минимизации функции потерь – квадрата нормы отклонения оценок от наблюдаемых значений временного ряда, метод обобщения алгоритма прогноза с помощью линейной модели, представленной функциональными рядами или ИНС. **Научная новизна** работы заключается в решении задачи прогноза, состоящей в нахождении коэффициентов модели посредством минимизации целевой функции итерационным методом путем применения рекуррентных сетей с обратными связями. **Результат:** результат применения разработанных алгоритмов заключается в повышении эффективности прогнозирования изменения параметров временных рядов по критериям длительности и минимизированной погрешности получения прогноза. **Практическая значимость:** предложенная структурная схема реализации нейросетевого прогнозирования изменений параметров временных рядов с предварительной вейвлет-обработкой обеспечивает возможность более эффективного мониторинга исследуемых процессов, например, в цифровых информационных системах управления.

Ключевые слова: прогнозирование; параметрическое предсказание; авторегрессия; функциональный ряд; нейронная сеть; временной ряд; трехслойный персептрон прямого распространения.

Введение

Задача прогнозирования заключается в нахождении будущих значений параметров временного ряда на интервале, называемом горизонтом прогнозирования [1, 2], в пределах которого обеспечивается необходимая точность решения задачи. Для непрерывных процессов – это интервал $(t, t + \tau]$, который для временного ряда, записывается как $(n, n + N]$. Здесь t и nT – текущие моменты времени, при этом T – период дискретизации.

Библиографическая ссылка на статью:

Кропотов Ю. А., Белов А. А., Проскуряков А. Ю. Прогнозирование изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 1-17. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/01-Kropotov.pdf>

Reference for citation:

Kropotov Y. A., Belov A. A., Proskuryakov A. Y. Forecasting changes in time series parameters in digital information management systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 1-17. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/01-Kropotov.pdf>

Прогнозирование обычно осуществляется по значениям временного ряда или процесса на конечном, предшествующем, интервале $[t-T, t]$ времени.

Горизонт предсказания является не только одной из важнейших мер качества прогноза, но и используется в качестве критерия степени детерминированности и случайности наблюдаемых явлений, служит характеристикой динамического хаоса (характеристикой хаотических колебаний в динамических системах). В основе этого утверждения лежит зависимость горизонта предсказания не только от используемых алгоритмов, но и от свойств анализируемых временных рядов и процессов. В задачах прогнозирования выбор алгоритма осуществляется исходя из соображений максимизации горизонта прогнозирования и достоверности прогноза. Один из принципов прогнозирования временных рядов или процессов основывается на их представлении непрерывными или дискретными моделями. В работах [1, 2] модель прогнозируемого процесса схематически описывается дифференциальным уравнением, зависящим от неизвестных параметров системы a и факторов f_k , отражающих неопределённость модели, где k – номер анализируемого фактора, находится в пределах $1 \leq k \leq M$ и идентифицируется методом наименьших квадратов. При этом в рассмотрение вводятся три процесса: наблюдаемый процесс y , исследуемый (истинный) процесс x и модельный (прогностический) процесс z . Истинный процесс в силу неопределенности факторов f_k является (из множества возможных) неизвестным решением дифференциального уравнения

$$P(d/dt, x, a, f_k) = 0.$$

Пренебрежение указанными факторами позволяет получить дифференциальное уравнение, описывающее модельный процесс z , при соответствующих условиях близкий к истинному процессу x . Это уравнение можно записать в виде

$$G(d/dt, z, a) = 0.$$

Здесь критерием качества прогнозирования может являться среднеквадратическое значение нормы отклонения модельного процесса по факторам f_k от истинного на интервале предсказания, то есть величина [1]

$$\left\langle \|x - z\|^2 \right\rangle = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \int_t^{t+\tau} |x(v, f_k) - z(v)|^2 dv. \quad (1)$$

Аналогично определяется качество прогнозирования дискретных процессов или временных рядов, представленных дискретными моделями, которые, в частности, могут быть получены из непрерывных моделей путём замены производных конечными разностями. При этом операция интегрирования заменяется операцией суммирования по конечному множеству данных на интервале прогнозирования. Переход к дискретной модели эквивалентен численному решению дифференциального уравнения со свойственными этому решению проблемами чувствительности к возмущающим воздействиям.

На практике построение моделей основывается на данных о

соответствующих наблюдаемых процессах: модели могут относиться к классам линейных дискретных [3] и регрессионных [4] систем, стационарных и нестационарных процессов. При решении задач прогнозирования нестационарных процессов может быть применен метод, основанный на декомпозиции процессов по эмпирическим модам (метод EMD) [5].

Распространенными методами прогнозирования являются параметрические методы регрессионной аппроксимации [4], динамические модели авторегрессии – скользящего среднего [3], методы импульсных функций [7] и искусственных нейронных сетей [9, 10].

Нейросетевые методы прогнозирования

Горизонт прогнозирования любой модели зависит от того, насколько достоверно эта модель воспроизводит динамику временного ряда или системы, порождающей наблюдаемый процесс. Поэтому в этой части работы исследуется вопрос о горизонте прогнозирования на основе модели в форме искусственной нейронной сети прямого распространения [7, 8, 9]. Проблема здесь заключается в том, насколько точно динамика процесса может быть представлена весовыми коэффициентами сети. Поэтому отсутствие обратных связей компенсируется алгоритмами обучения типа обратного распространения ошибки. Алгоритм функционирования многослойной нейронной сети прямого распространения при прохождении сигналов по направлению от входа к выходу зададим уравнениями в матричной форме. Схема нейронной сети прямого распространения представлена на рис. 1.

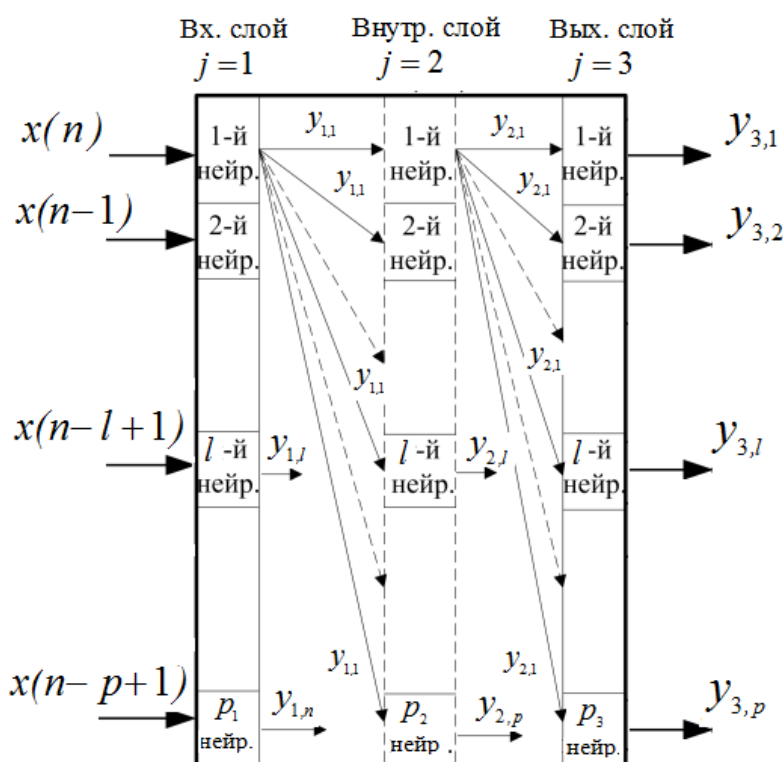


Рис. 1. Структура трехслойной нейронной сети прямого распространения

В соответствии с рис. 1 вектор выходов j -го слоя сети, состоящего из p_j нейронов

$$\mathbf{y}_j = (y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,p_j})^T, \quad (2)$$

и вектор весовых коэффициентов l -го нейрона j -го слоя сети

$$\mathbf{w}_{j,l} = (w_{j,l,1}, w_{j,l,2}, \dots, w_{j,l,p_j})^T. \quad (3)$$

Тогда синаптическая сумма l -го нейрона j -го слоя сети

$$s_{j,l} = \mathbf{w}_{j,l}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{j,l,0}, \quad (4)$$

где $w_{j,l,0}$ – смещение нейрона.

При этом выходы j -го слоя сети можно представить вектором

$$\mathbf{y}_j = \begin{pmatrix} \varphi(\mathbf{w}_{j,1}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{j,1,0}) \\ \varphi(\mathbf{w}_{j,2}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{j,2,0}) \\ \vdots \\ \varphi(\mathbf{w}_{j,p_j}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{j,p_j,0}) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\varphi(\cdot)$ – функции активации нейронов сети.

Формула (5) является рекуррентным уравнением, позволяющим найти последовательно выходы всех слоёв сети, начиная с первого слоя ($j=1$), и заканчивая последним слоем (в рассматриваемом случае $j=3$), совпадающим с выходом сети. Вектор $\mathbf{y}_0$ – это входная последовательность временного ряда $x(n)$.

При решении задач прогноза выходами сети в пределах одного цикла её функционирования являются результаты предсказания временного ряда или процесса на заданное число шагов вперёд, начиная с 1 и кончая $p_{вых.сл.}$ (число нейронов в выходном слое сети).

Алгоритм обучения нейронной сети методом обратного распространения ошибки также можно представить уравнениями в матричной форме.

Введём матрицу весов j -го слоя сети

$$\mathbf{W}_j = (\mathbf{w}_{j,1}, \mathbf{w}_{j,2}, \dots, \mathbf{w}_{j,p_j}), \quad (6)$$

вектор смещения нейронов j -го слоя

$$\mathbf{w}_{j,0} = (w_{j,1,0}, w_{j,2,0}, \dots, w_{j,p_j,0})^T, \quad (7)$$

вектор синаптических сумм

$$\mathbf{s}_j = (s_{j,1}, s_{j,2}, \dots, s_{j,p_j})^T, \quad (8)$$

и векторную функцию активации j -го слоя

$$\Phi(\mathbf{s}_j) = (\varphi(s_{j,1}), \varphi(s_{j,2}), \dots, \varphi(s_{j,p_j}))^T. \quad (9)$$

Весовые коэффициенты j -го слоя сети находятся при этом в ходе минимизации функционала

$$J_j(\mathbf{e}_j) = (\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{s}_j) - \bar{\mathbf{y}}_j)^T (\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{s}_j) - \bar{\mathbf{y}}_j), \quad (10)$$

где $\bar{\mathbf{y}}_j = (\bar{y}_{j,1}, \bar{y}_{j,2}, \dots, \bar{y}_{j,p_j})^T$ – вектор требуемых выходов j -го слоя сети и $\mathbf{e}_j = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{s}_j) - \bar{\mathbf{y}}_j$ – вектор ошибок по выходам j -го слоя.

Таблица 1 – Алгоритм обучения многослойного персептрона прямого распространения

Этап обучения	Шаги алгоритма
1.Определение выходов (прямой проход)	$\mathbf{y}_j = \begin{pmatrix} \varphi(\mathbf{w}_{j1}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{01}^j) \\ \varphi(\mathbf{w}_{j2}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{02}^j) \\ \vdots \\ \varphi(\mathbf{w}_{jp_j}^T \mathbf{y}_{j-1} + w_{0p_j}^j) \end{pmatrix}, j = 1, 2, \dots; y_0 = C_m.$
2.Определение ошибок (обратный проход)	$\mathbf{e}_{j-1} = \mathbf{W}_j \boldsymbol{\Phi}_j \mathbf{e}_j, e_j = \varphi(s_j) - \bar{y}_j,$ $\mathbf{s}_j = \mathbf{W}_j^T \mathbf{y}_{j-1} + \mathbf{w}_{j0} = (s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jp_j})^T,$ где $\mathbf{W}_j = (w_{j1} \ w_{j2} \ \dots \ w_{jp_j})$ – матрица весовых синаптических коэффициентов.
3.Коррекция синаптических коэффициентов	$w_{jl}(q+1) = w_{jl}(q) - \alpha h_{jl}(s_{jl}) e_j y_{j-1},$ $w_{j0}(q+1) = w_{j0}(q) - \alpha \Phi_j e_j,$ $\boldsymbol{\Phi}_j \equiv \text{diag} \left(\frac{\partial \varphi(s_{j1})}{\partial s_{j1}}, \frac{\partial \varphi(s_{j2})}{\partial s_{j2}}, \dots, \frac{\partial \varphi(s_{jp_j})}{\partial s_{j,p_j}} \right) = \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^T(s_j)}{\partial \mathbf{s}_j}$ $h_{jl}(s_{jl}) = \frac{\partial \varphi(s_{jl})}{\partial s_{jl}},$ α – шаг настройки, выбирается в диапазоне $0 < \alpha < 1$.

Если ввести матрицы

$$\mathbf{W}_j = \frac{\partial \mathbf{s}_j^T}{\partial \mathbf{y}_{j-1}},$$

и диагональную матрицу $\boldsymbol{\Phi}_j = \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{s}_j)}{\partial \mathbf{s}_j}$ в виде

$$\boldsymbol{\Phi}_j = \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{s}_j)}{\partial \mathbf{s}_j} = \text{diag} \left(\frac{\partial \varphi(s_{j1})}{\partial s_{j1}}, \frac{\partial \varphi(s_{j2})}{\partial s_{j2}}, \dots, \frac{\partial \varphi(s_{j,p_j})}{\partial s_{j,p_j}} \right), \quad (11)$$

то алгоритм обучения методом обратного распространения ошибки принимает вид разностного уравнения

$$\mathbf{e}_{j-1} = \mathbf{W}_j \Phi_j \mathbf{e}_j, \quad (12)$$

с начальными условиями $\mathbf{e}_j = \phi(\mathbf{s}_j) - \bar{\mathbf{y}}_j$, при $j = j_{\text{вых.сл.}}$ (номер выходного слоя сети), $\bar{\mathbf{y}}_j$ – вектор требуемых выходов j -го слоя сети.

Коррекция весовых коэффициентов сети по ошибкам, полученным с помощью уравнения (12), осуществляется, если воспользоваться градиентным методом, по итерационным формулам

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{j,l}(q+1) &= \mathbf{w}_{j,l}(q) - \alpha h_{j,l}(s_{j,l}) e_{j,l} \mathbf{y}_{j-1}, \\ \mathbf{w}_{j,0}(q+1) &= \mathbf{w}_{j,0}(q) - \alpha \Phi_j \mathbf{e}_j, \\ h_{j,l}(s_{j,l}) &= \frac{\partial \phi(s_{j,l})}{\partial s_{j,l}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $l = 1, 2, \dots, p_j$, $e_{j,l}$ является l -м компонентом вектора $\mathbf{e}_j$ ошибки; q – номер итерации, шаг настройки весовых коэффициентов α выбирается в диапазоне $0 < \alpha < 1$.

Таким образом, выражения (2)-(13) формируют алгоритм обучения нейронной сети при прогнозировании изменения значений функции, реализуемый нейронной сетью прямого распространения, построенной по правилу многослойного персептрона, который сведен в таблицу 1 [9].

Структура прогнозирования на трехслойном персептроне

Структурная схема, реализующая нейросетевое прогнозирование изменений значений параметров функции с её предварительной вейвлет-обработкой, представлена на рис. 2 [10, 11, 12].

Как видно из рис. 2, система прогнозирования, реализованная на трехслойном персептроне прямого распространения, используется применительно к задаче мониторинга информации в информационно-управляющих системах, которая формирует временной ряд $x(n)$ отсчетов значений процесса. Аналогично могут быть исследованы непрерывные функции, либо временные ряды данных, отображающие информацию изменения параметров различных процессов для решения задач прогнозирования в информационно-управляющих системах.

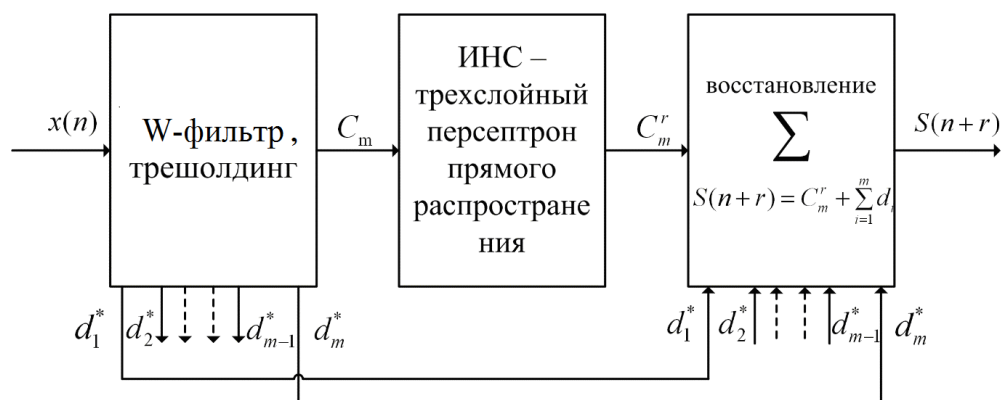


Рис. 2. Структурная схема нейросетевого прогнозирования изменений значений функции

Входные сигналы в виде непрерывной функции $x(t)$ или дискретной функции в виде временного ряда $x(n)$ подаются на W-фильтр предварительной обработки вейвлет-преобразованием. В W-фильтре формируются аппроксимирующие коэффициенты C_i , вычисленные по формуле

$$C_i = \frac{1}{p} C_{i-1} \phi_i(2^i t - n),$$

где $\phi_i(2^i t - n)$ – скейлинг-функция, $p = 2^{i/2}$ – коэффициент ортонормирования, обеспечивающий единичную норму скейлинг-функции, d_i – детализирующие коэффициенты i -го уровня вейвлет-разложения, вычисленные по формулам:

$$d_1 = \frac{1}{p} x(n) \psi_1(2t - n), \quad d_i = \frac{1}{p} \sum_{i=2}^m C_{i-1} \psi_i(2^i t - n),$$

где $\psi_i(2^i t - n)$ – вейвлет-функция [8, 13, 14, 15].

Выделенные аппроксимирующие коэффициенты C_i до уровня $i=m$, где $1 \leq m \leq 6$ [7, 13], подаются на вход N -разрядного регистра сдвига, построенного на элементах задержки с передаточной функцией Z^{-1} , в котором формируется выборка входных сигналов нейронной сети в виде движущегося окна из N отсчетов, обработанных в W-фильтре [14, 15]. В нейронной сети, построенной по правилу многослойного персептрона прямого распространения вычисляются выходные сигналы в виде аппроксимирующих коэффициентов прогноза C_m^{*r} , где m – уровень вычисленных аппроксимирующих коэффициентов, r – число периодов прогноза (например, $r=1, 2, \dots, 10$).

Многослойный персептрон состоит из входного слоя, внутреннего слоя (где значение j внутреннего слоя принимает значение 0 или 1) и выходного слоя. При $j=1$, структурная схема персептрона представляет собой трехслойный персептрон. Увеличение числа слоев, т.е. $j>1$, в персептроне приводит к увеличению вычислительных затрат при незначительном уменьшении погрешности [10, 13].

Число нейронов во входном слое персептрона влияет на число анализируемых входных аппроксимирующих коэффициентов временного ряда $C_m(n)$, соответственно на время анализа предыдущих значений отсчетов исследуемой функции, на длительность движущегося окна, на число разрядов во входном регистре сдвига, на общую погрешность прогнозирования. В соответствии с [10] погрешность прогноза при $r=10$ достигает $|\bar{\delta}| \leq 5\%$, в случае числа нейронов во входном слое $p_{вх}=64$, внутреннем слое $p_{внутр.}=10$, выходном слое $p_{вых.}=10$. При уменьшении числа нейронов во входном слое до $p_{вх}=32$, погрешность повышается до $|\bar{\delta}| \leq (7...10)\%$ [13, 14, 15, 16].

Число нейронов внутреннего слоя $p_{внутр.}$ и число нейронов выходного слоя $p_{вых.}$ определяется требуемым временем прогноза в виде:

$$t_{прогн} = rT, \quad (14)$$

и, соответственно, подчиняется условию $p_{внутр.} = p_{вых.} = r_{\max}$.

Полученные аппроксимирующие коэффициенты прогноза C_m^{*r} , с учетом

необходимых для разных выходов нейронной сети задержек, сравниваются с входными значениями C_m , что обеспечивает формирование ошибок предсказаний e^{*r} на всех p выходах нейронов выходного слоя нейронной сети.

При этом формализуем процедуру вычисления нейронной сетью аппроксимирующих коэффициентов прогноза, вычисление ошибок на выходах нейронов каждого из слоев, а также процедуру адаптивной настройки синаптических весовых коэффициентов, для каждого 1-го нейрона в рамках всех слоев нейронной сети.

Аппроксимирующий коэффициент прогноза на один период вычисляется на выходе 1-го нейрона выходного слоя в соответствии с выражением [8, 18]:

$$C_m^{*1} = y_{31} = \varphi_3(s_{10}) = \frac{1}{1 + \exp(-s_{10})}.$$

На выходе 1-го нейрона выходного (3-го) слоя вычисляется ошибка предсказания на один период – e_{31}^{*1} , по которой вычисляется ошибка на выходе 1-го нейрона предыдущего 2-го слоя нейронной сети – e_{21} . Ошибки на выходе 1-ых нейронов 2-го и 1-го слоев вычисляются в соответствии с выражениями:

$$e_{21} = \sum_{l=1}^{10} w_{3l} \cdot e_{31},$$

$$e_{11} = \sum_{l=1}^{64} w_{2l} \cdot e_{21}.$$

Вычисленные таким образом ошибки обратного прохода, в свою очередь адаптивно перестраивают синаптические коэффициенты связей между нейронами различных слоев. Таким образом, веса 1-ых нейронов каждого слоя адаптивно настраиваются в соответствии с выражениями:

$$w'_{31} = w_{31} + \alpha e_{31} \frac{d\varphi_3(s_{10})}{ds_{10}} C_m^{*1},$$

$$w'_{21} = w_{21} + \alpha e_{21} \frac{d\varphi_2(s_{10})}{ds_{10}} y_{21},$$

$$w'_{11} = w_{11} + \alpha e_{11} \frac{d\varphi_1(s_{64})}{ds_{64}} y_{11}.$$

Минимизация ошибки обеспечивается выше рассмотренной итерационной процедурой обучения нейронной сети, в ходе которой осуществляется настройка весовых или синаптических коэффициентов сети. Таким образом, задача прогнозирования заключается в оценивании будущих значений процесса по имеющимся данным C_m в текущий момент, в настройке значений коэффициентов нейронной сети по критерию минимальной величины ошибки предсказания, в оценивании управляемого объекта, основанных на сравнении выходных сигналов управляемого объекта C_m^{*r} и его модели, в качестве которой используется нейронная сеть.

Детализирующие коэффициенты d_i , вычисленные до уровня m ($d_1, d_2, \dots, d_m$), после обработки алгоритмом сглаживания, поступают на блоки

восстановления выходного временного ряда прогноза.

Алгоритм сглаживания детализирующих коэффициентов по критерию адаптивного штрафного порога имеет вид [10, 11]:

$$d_i^* = \begin{cases} d_i, & d_i \geq \beta_0; \\ 0, & d_i < \beta_0, \end{cases}$$

где $\beta_0 = b\sqrt{\sigma^2}$, σ^2 – дисперсия шумовых составляющих во входном сигнале $x(n)$, b – коэффициент пропорциональности, $b = \sqrt{2\ln(N)}$, N – число периодов анализа.

Выходные сигналы с выходов нейронной сети в виде выходных аппроксимирующих коэффициентов C_m^{*r} (где r – номер выхода нейронной сети, в соответствии с числом периодов прогноза $r \in [1, 10]$) также поступает на r -й блок восстановления выходного временного ряда прогноза. На выходе r -х блоков восстановления формируется выходные сигналы прогноза в виде временного ряда $s(n+r)$ [10, 14, 15, 19]:

$$s(n+r) = \frac{1}{p} \left[\sum_n x(n) \psi_1(2t-n) + \sum_n \sum_{i=2}^m C_{i-1} \cdot \psi_i(2^i t - n) + \sum_n C_m^{*r} \right], \quad (15)$$

где r – число периодов времени прогноза, в соответствии с (14) время прогноза определяется выражением $t_{\text{прогн.}} = rT$.

Также в структурной схеме на рис. 2 представлен блок вейвлет-обработки временного ряда $x(n)$ и блок восстановления выходного сигнала $s(n)$ с пониженной погрешностью, в соответствии с выражением восстановления [10, 19, 20, 22]:

$$s(n) = \frac{1}{p} \left[\sum_n x(n) \psi_1(2t-n) + \sum_n \sum_{i=2}^m C_{i-1} \cdot \psi_i(2^i t - n) + \sum_n C_m \right]. \quad (16)$$

В полученных выражениях (15) и (16), благодаря предварительной вейвлет-обработке в W-фильтре, существенно ослабляются флуктуации входного сигнала $x(n)$ за счет формирования аппроксимирующих коэффициентов m -го уровня C_m и подавляются компоненты шума, имеющие место во входном сигнале, путем обработки детализирующих коэффициентов алгоритмом сглаживания, что заметно снижает погрешность представления информации.

Таким образом, полученный очищенный от помех обработанный выходной временной ряд в реальном времени и обработанный выходной временной ряд прогноза представляют информацию в устройствах отображения и в системах принятия решений с более низкой погрешностью.

Разработанный алгоритм нейросетевого прогнозирования изменения параметров временного ряда может быть реализован в различных программных средах, таких как: MatLab Neural Network Toolbox, PyBrain и NeurophStudio.

Ошибки прогноза зависят от того, насколько размеры входного слоя ИНС соответствуют характерной величине интервала временного ряда, по которому можно восстановить его динамику, что подтверждается графиками на рис. 3 [2].

При моделировании, результаты которого приведены рис. 3, в качестве функции активации выбран гиперболический тангенс.

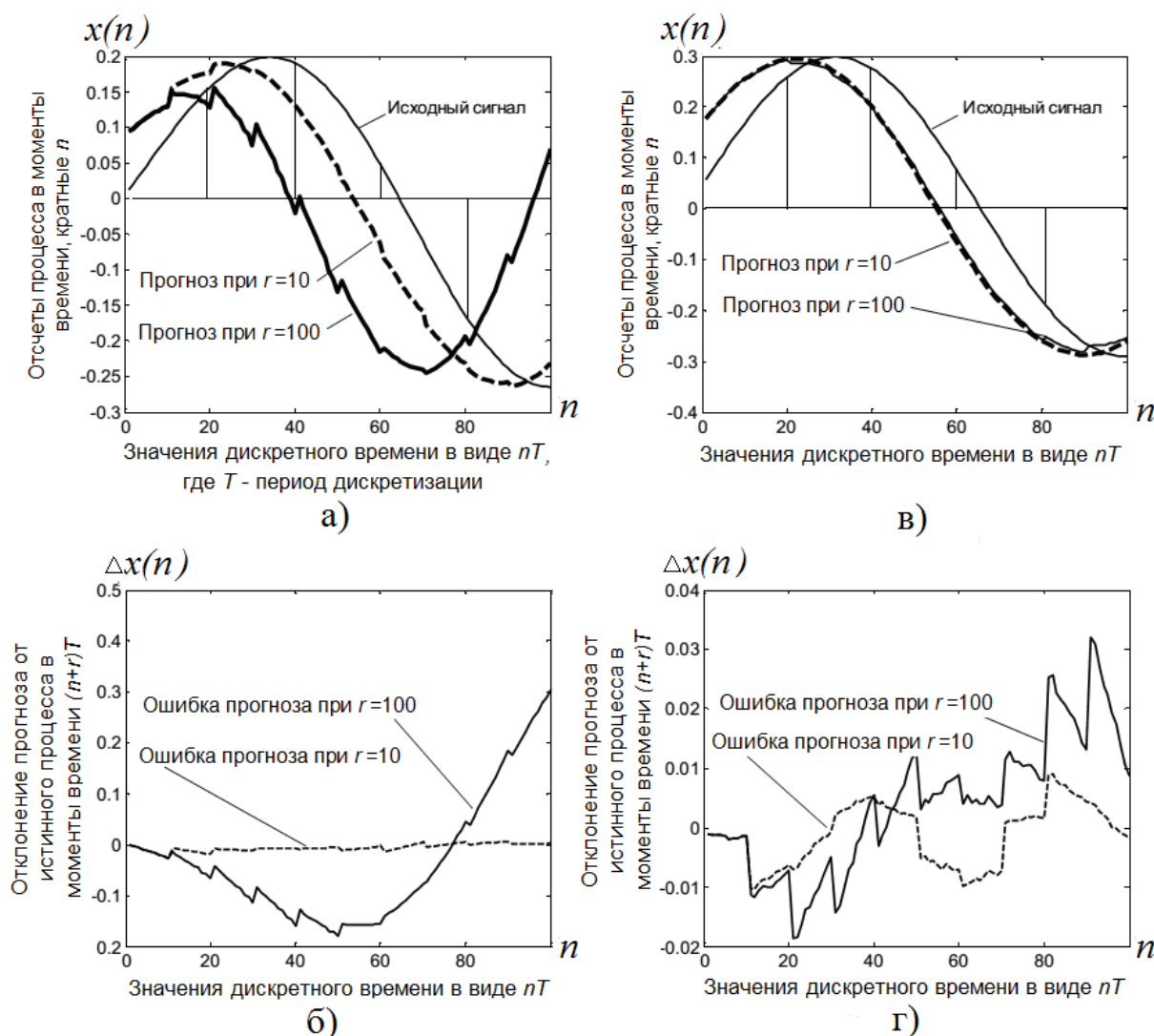


Рис. 3. Результаты и ошибки прогноза при различных размерах сенсорного слоя

Из рис. 3 видно, что увеличение числа нейронов в первом (сенсорном) слое способствует увеличению горизонта и точности прогноза. Если для сети с 64-мя сенсорными нейронами (110 нейронов внутренний слой и 10 нейронов выходной слой) горизонт предсказания может быть принят равным в пределах $10T$ - $20T$ (рис. 3 а, б), то в случае 200 сенсорных нейронов (110 нейронов внутренний слой и 10 нейронов выходной слой) (рис. 3 в, г), горизонт увеличивается до $100T$. Можно также отметить, что погрешность прогнозирования зависит не только от числа сенсорных нейронов, но и от длительности движущегося временного окна или периода исследования сигнала и числа выборок сигнала на этом периоде.

Выводы

Существующие методы прогнозирования временных рядов и непрерывных процессов характеризуются большим разнообразием, что, в свою очередь, обусловлено большим разнообразием задач. Так, велико число работ по методам прогноза, основанным на идеях декомпозиции процессов по

эмпирическим модам (метод EMD) [5, 21]. Однако данный подход применим, как правило, только при условии, что наблюдаемый процесс представлен небольшим числом составляющих.

Метод параметрической регрессии, используемый в ряде задач аппроксимации, обладает недостатком, заключающимся в возможности возникновения неконтролируемой ошибки на интервале прогнозирования, особенно при высоком порядке прогнозирующей функции.

Особый интерес в плане прогнозирования связан с представлением временных рядов моделями авторегрессии и нейронными сетями. В работе показано, что в рамках модели авторегрессии прогноз на несколько шагов вперед зависит от коэффициентов модели нелинейным образом. При этом задачу прогноза, состоящую в нахождении коэффициентов модели посредством минимизации целевой функции, можно решить итерационным методом. Поэтому интерес представляют рекуррентные и другие сети с обратными связями. В данной работе рассмотрены искусственные нейронные сети, в частности рассмотрены нейронные сети на персептроне прямого распространения. В работе получены уравнения функционирования и обучения искусственной нейронной сети в матричной форме [10, 18], получен алгоритм обратной подстановки, с помощью которого можно увеличить глубину прогноза. Результат моделирования и применения разработанного алгоритма заключается в повышении эффективности прогнозирования изменений значений функций по показателям длительности и погрешности получения прогноза, а также быстродействия, адаптивности системы при изменяющихся условиях. Дополнительным эффектом является также возможность гибкого изменения архитектуры нейронной сети в случае изменения требований на длительность прогноза.

Предложенная структурная схема реализации нейросетевого прогнозирования изменений параметров временных рядов с предварительной вейвлет-обработкой обеспечивает возможность более эффективного мониторинга исследуемых процессов в информационно-управляющих системах.

Литература

1. Кравцов Ю. Н. Случайность, детерминированность, предсказуемость // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. № 1. С. 93-122.
2. Ермолаев В. А. О методах прогнозирования временных рядов и непрерывных процессов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 2. С. 52-63.
3. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
4. Маевский В. В., Харин Ю. С. Робастность регрессионного прогнозирования при наличии функциональных искажений модели // Автоматика и телемеханика. 2012. № 11. С. 118-137.
5. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shin H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C. C., Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert

spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc.R.Soc.Lond.A. 1998. Vol. 454. P. 903-995.

6. Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А. Об адаптивном алгоритме наименьших квадратов в задачах компенсации акустического эха // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2 (6). С. 40-44.

7. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 17. № 5. С. 465-501.

8. Проскуряков А. Ю. Модель прогнозирования временных рядов на трехслойном персептроне в информационной системе мониторинга загрязняющих выбросов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 2. С. 57-63.

9. Белов А. А., Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Способ нейросетевого прогнозирования изменения значений функции с ее предварительной вейвлет-обработкой и устройство его осуществления // Патент России №2600099. 2016. Бюл. № 29.

10. Белов А. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Вопросы обработки экспериментальных временных рядов в электронной системе автоматизированного контроля // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 95-101.

11. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 60-65.

12. Быков А. А., Кропотов Ю. А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базисе экспоненциальных функций системы // Проектирование и технология электронных средств. 2007. № 2. С. 30-34.

13. Кропотов Ю. А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2007. № 6. С. 44-47.

14. Белов А. А., Кропотов Ю. А., Проскуряков А. Ю. Автоматизированный анализ и обработка временных рядов данных о загрязняющих выбросах в системе экологического контроля // Информационные системы и технологии. 2010. № 6 (62). С. 28-35.

15. Белов А. А., Кропотов Ю. А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 12. С. 9-14.

16. Кропотов Ю. А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. № 1. С. 57-60.

17. Колпаков А. А., Кропотов Ю. А. Аспекты оценки увеличения производительности вычислений при распараллеливании процессоров вычислительных систем // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 124-127.

18. Ермолаев В. А., Кротов Ю. А. Оценивание параметризованной аппроксимации плотности вероятностей методом барьерных функций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3 (11). С. 37-43.
19. Кротов Ю. А., Белов А. А., Проскуряков А. Ю., Колпаков А. А. Методы проектирования телекоммуникационных информационно-управляющих систем аудиообмена в сложной помеховой обстановке // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 165-183.
20. Ермолаев В. А., Кротов Ю. А. Метод барьерных функций в задаче оценивания параметризованной аппроксимации плотности вероятностей с ограничениями // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 209-211.
21. Ermolaev V. A., Eremenko V. T., Karasev O. E., Kropotov Y. A. Identification of models for discrete linear systems with variable, slowly varying parameters // Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. Vol. 55, № 1. P. 57-62.
22. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis // Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). – Omsk, 2015. – P. 345-348.

References

1. Kravcov Y. N. Sluchajnost', determinirovannost', predskazuemost' [Randomness, determinism, predictability]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1989, vol. 158, no. 1, pp. 93-122 (in Russian).
2. Ermolaev V. A. O metodah prognozirovaniya vremennyh rjadov i nepreryvnyh processov [About methods of forecasting time series and continuous processes]. *Radio and telecommunication systems*, 2016, no. 2, pp. 52-63 (in Russian).
3. Box D., Jenkins G. *Analiz vremennyh rjadov. Prognoz i upravlenie*. [Analysis of time series. Forecast and management]. Moscow, Mir Publ., 1974. 408 p (in Russian).
4. Maevskii V. V., Kharin Y. S. Robastnost' regressionnogo prognozirovaniya pri nalichii funkcional'nyh iskazhenij modeli [Robustness of regression prediction in the presence of functional distortions of the model]. *A&T*. 2012, no. 11, pp. 118-137 (in Russian).
5. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shin H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C. C., Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*. London, 1998, vol. 454, pp. 903-995.
6. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Ob adaptivnom algoritme naimen'shikh kvadratov v zadachah kompensacii akusticheskogo jeha [About adaptive least squares algorithm in problems of acoustic echo compensation]. *Radio and telecommunication systems*, 2012, no. 2, pp. 40-44 (in Russian).

7. Dremin I. M., Ivanov O. V., Nechitailo V. A. *Vejvlety i ih ispol'zovanie* [Wavelets and their use]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2001, vol. 17, no. 5, pp. 465-501 (in Russian).

8. Proskuryakov A. Y. *Model' prognozirovaniya vremennykh rjadov na trehslojnom perseptrone v informacionnoj sisteme monitoringa zagrjaznjajushhih vybrosov* [The model of forecasting time series on a three-layer perceptron in the information system for monitoring polluting emissions]. *Radio and telecommunication systems*, 2014, no. 2, pp. 57-63 (in Russian).

9. Belov A. A., Ermolaev V. A., Kropotov Y. A., Proskuryakov A. Y. *Sposob nejrosetevogo prognozirovaniya izmenenija znachenij funktsii s predvaritel'noj vejvlet-obrabotkoj i ustrojstvo ego osushhestvlenija* [Neural network prediction method for changing the values of a function with its preliminary wavelet processing and the device for its implementation]. Patent Russia, no. 2600099, 2015. (in Russian).

10. Belov A. A., Kropotov Y. A., Proskuryakov A. Y. *Voprosy obrabotki jeksperimental'nykh vremennykh rjadov v jelektronnoj sisteme avtomatizirovannogo kontrolja* [Processing of experimental time series in the electronic system of automated control]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 95-101 (in Russian).

11. Kropotov Y. A., Bykov A. A. *Algoritm podavlenija akusticheskikh shumov i sosredotochennykh pomех s formantnym raspredeleniem polos rezhekcii* [Algorithm for suppressing acoustic noise and concentrated noise with a formant distribution of the rejection bands]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (in Russian).

12. Bykov A. A., Kropotov Y. A. *Model' zakona raspredelenija verojatnosti amplitud signalov v bazise jeksponencial'nykh funktsij sistemy* [Algorithm for determining the parameters of the exponential approximation of the probability distribution law for the amplitudes of a speech signal]. *Design and technology of electronic means*, 2007, no. 2, pp. 30-34 (in Russian).

13. Kropotov Y. A. *Algoritm opredelenija parametrov jeksponencial'noj approksimacii zakona raspredelenija verojatnosti amplitud rechevogo signala* [Algorithm for determining the parameters of the exponential approximation of the probability distribution law for the amplitudes of a speech signal]. *Radiotekhnika*, 2007, no. 6, pp. 44-47 (in Russian).

14. Belov A. A., Kropotov Y. A., Proskuryakov A. Y. *Avtomatizirovannyj analiz i obrabotka vremennykh rjadov dannykh o zagrjaznjajushhih vybrosah v sisteme jekologicheskogo kontrolja* [Automated analysis and processing of time series of data on polluting emissions in the environmental control system]. *Information systems and technologies*, 2010, no. 6, pp. 28-35 (in Russian).

15. Belov A. A., Kropotov Y. A. *Issledovanie voprosov szhatija i poiska kartograficheskoi informacii metodom vejvlet-preobrazovanij v jekologicheskoi geoinformacionnoj sisteme* [Research of the problems of compression and searching for cartographic information by the method of wavelet transformations in the ecological geoinformation system]. *Herald of computer and information technologies*, 2008, no. 12, pp. 9-14 (in Russian).

16. Kropotov Y. A. Algoritm vychislenija signala upravlenija kanalom rezhekcii mnogokanal'noj sistemy peredachi akusticheskikh signalov [Algorithm for calculating the channel control signal for rejection of a multichannel acoustic transmission system]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 57-60 (in Russian).

17. Kolpakov A. A., Kropotov Y. A. Aspekty ocenki uvelichenija proizvoditel'nosti vychislenij pri rasparallelivanii processorov vychislitel'nyh system [Aspects of estimating the increase in computing performance when parallelizing processors of computing systems]. *Methods and devices of information transmission and processing*, 2011, no. 13, pp. 124-127 (in Russian).

18. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Ocenivanie parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej metodom bar'ernyh funkcij [Estimation of the parametrized approximation of the probability density by the method of barrier functions]. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 3, pp. 37-43 (in Russian).

19. Kropotov Y. A., Belov A. A., Proskuryakov A. Y., Kolpakov A. A. Methods of designing telecommunication information and control audio exchange systems in difficult noise conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 2, pp. 165-183 (in Russian).

20. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. Metod bar'ernyh funkcij v zadache ocenivaniya parametrizovannoj approksimacii plotnosti verojatnostej s ograničenijami [The method of barrier function in the problem of estimating the probability density approximation parameterized with restrictions]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. FIZIKA*, 2013, Part 56, no. 9/2, pp. 209-211 (in Russian).

21. Ermolaev V. A., Eremenko V. T., Karasev O. E., Kropotov Y. A. Identifikacija modelej diskretnyh linejnyh sistem s peremennymi, medlenno izmenjajushhimisja parametrami [Identification of models for discrete linear systems with variable, slowly varying parameters]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 1, pp. 57-62.

22. Kropotov Y. A., Ermolaev V. A. Algoritmy obrabotki akusticheskikh signalov v telekommunikacionnyh sistemah metodami lokal'nogo parametriceskogo analiza [Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis]. *Trudy mezhdunarodnoj sibirskoj konferencii po upravleniju i svjazi SIBCON-2015* [Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)]. Omsk, Omsk State Technical University, 2015, pp. 345-348.

Статья поступила 10 июля 2017 г.

Информация об авторах

Кропотов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область

научных интересов: телекоммуникационные и информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Белов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга, обработка данных, методы вейвлет-преобразования. Тел.: +7(49234)772-72. E-mail: aleks.murom@mail.ru

Проскуряков Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники». Муромский институт (филиал) «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых». Область научных интересов: прогнозирование данных, нейронные сети, обработка и предсказание данных в экономических системах. Тел.: +7(49234)772-72. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Forecasting changes in time series parameters in digital information management systems

Y. A. Kropotov, A. A. Belov, A. Y. Proskuryakov

Statement of the problem. A task of predicting change in parameters of time series is relevant for monitoring processes under investigation in digital information management systems. The task arises in questions research of increasing the forecasting horizon and minimizing forecast error. **Object of research** are parametric prediction methods based on the representation of the time series by a generalized polynomial in systems of linearly independent functions, the forecasting algorithms based on autoregression models on models of time series reproducing dynamics in the form of artificial neural networks (ANN) are also the object of research. **The purpose** of the work is development of algorithms for control, functioning and training of an artificial neural network in a matrix form and obtaining an algorithm for return substitution, with help of which it is possible to obtain an increase in the depth of the forecast. **Used methods.** In the work used methods of empirical processes decomposition, methods of parametric forecasting. Also in the work used method for finding forecast estimates by minimizing loss function-the square for the norm of the deviation estimates from the observed values of the time series. In the research used generalization method of the prediction algorithm using a linear model represented by functional series or ANN. **The scientific novelty** of the work consists in solving the prediction task, consisting in finding the model coefficients by iterative method applying recurrent networks with feedbacks for minimizing the objective function. **Results.** The result of application of the developed algorithm is increase efficiency of predicting change in the parameters of time series by criteria of minimized duration and error in obtaining forecast. **Practical value:** the proposed structural scheme for implementing neural network forecasting of changes in time series parameters with preliminary wavelet processing provides the opportunity for more effective monitoring of the studied processes, for example, in digital information management systems.

Key words: forecasting; parametric prediction; autoregression; functional series; neural network; time series; three-layer perceptron of direct propagation.

Information about Authors

Yurij Anatolievich Kropotov – Dr. of Engineering Sciences, Full Professor. Head of the Department «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunication information and control systems. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Aleksey Anatolievich Belov – Ph.D. of Engineering Sciences, associate professor of chair «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunication system monitoring, data processing, wavelet transform techniques. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: aleks.murom@mail.ru

Aleksandr Yurievich Proskuryakov – Ph.D. of Engineering Sciences, associate professor of chair «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: data prediction, neural networks, data processing and prediction in economic systems. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, st. Orlovskaya, h. 23.

УДК 621.39

Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения

Макаренко С. И.

Актуальность. Ведущие технологически развитые страны активно развивают сети связи специального назначения (СС СН), функционирующие в интересах органов государственной власти, органов обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка. Основными мировыми тенденциями развития этих сетей является использование в них ресурсов сетей связи общего пользования (СС ОП), а также коммерческих протоколов связи. Ввиду того, что в коммерческой отрасли связи наблюдается качественный переход к новым сетевым технологиям (концепция NGN, пакетные технологии передачи, использование технологий виртуализации и др.) актуальным является анализ современного состояния СС СН, основных тенденций и проблемных аспектов их развития. **Целью работы** является анализ технологий и принципов построения СС СН, а также перспектив и проблемных вопросов их развития. Для анализа были использованы только открытые источники, а в качестве примеров конкретных СС СН использовались открытые данные о сетях DISN и GIG, используемых в вооруженных силах США. **Результаты и их новизна.** Элементом новизны работы являются выявленные общие тенденции развития и проблемные вопросы СС СН. В частности, анализ показал следующее. Современным СС СН свойственен переход к децентрализованной сетевой структуре, которая в большей степени соответствует современным требованиям к системам государственного и военного управления. Также для современных СС СН характерен переход к гибриднему построению, когда отдельные сегменты СС ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН. Кроме того, наблюдается устойчивая тенденция отказа от использования в СС СН закрытых и специализированных протоколов связи и максимальное широкое использование в СС СН коммерческих протоколов и технологий из гражданской сферы связи и телекоммуникаций. Эти тенденции делают современные СС СН уязвимыми к атакам средств радиоэлектронного подавления и информационно-техническим воздействиям. Эти атаки могут проводиться на СС СН через сетевые сегменты общие с СС ОП, которые, как правило, подключены к глобальной информационно-телекоммуникационной сети Интернет. При этом среди коммерческих сетевых протоколов, которые получили широкое распространение в СС СН, не в полной мере отработаны механизмы защиты от таких атак, а также механизмы быстрого восстановления работоспособности. **Практическая значимость.** Представленный анализ будет полезен техническим специалистам для обоснования новых технологических решений в области СС СН. Кроме того, данный анализ будет полезен научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования, для прикладного обоснования целесообразности предлагаемых ими улучшений СС СН, а также обоснования защиты СС СН от воздействий со стороны противника.

Ключевые слова: система связи, сеть связи, сеть связи специального назначения, система связи специального назначения, сеть связи общего пользования, сетевые протоколы, система военной связи, устойчивость системы связи, радиоэлектронная борьба, информационно-техническое воздействие, NGN, система управления связью.

Библиографическая ссылка на статью:

Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-68. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf>

Reference for citation:

Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. Systems of Control, Communication and Security, 2017, no. 2, pp. 18-68. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf>

Введение

В настоящее время стремительно развиваются телекоммуникационные технологии. Такое стремительное технологическое развитие, а также внедрение концепции сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks) и концепции глобальной информационной инфраструктуры GI (Global Information Infrastructure), создает предпосылки для коренного изменения архитектуры и принципов построения сетей специального назначения. Так, концепция NGN связана с конвергенцией сетей связи и расширением диапазона предоставляемых связных услуг, а концепция GI – с образованием единого информационного пространства, в котором услуги связи дополнены другими услугами обработки информации, такими как: накопление, хранение, обработка и поиск необходимой информации. При этом отличительной особенностью сетей специального назначения является то, что с одной стороны они традиционно являются наиболее консервативным объектом в отрасли связи, а с другой стороны – они должны быть основаны на новейших достижениях этой отрасли, чтобы обеспечивать высокое качество обслуживания специальных абонентов.

Вопросам анализа функционирования сетей связи специального назначения посвящены работы: П.Н. Барашкова, А.П. Родимова, К.А. Ткаченко, А.М. Чуднова [1], И.Н. Лялюка [2], А.В. Боговика, В.В. Игнатова [3], П.А. Будко [4, 5], Г.И. Линца [6, 7], А.Н. Назарова, К.И. Сычева [8], А.Е. Давыдова [9, 10, 11, 31], Г.В. Сызранцева, К.И. Лукина, Г.В. Иншина [12-15], К.Е. Легкова [16-21], А.Н. Буренина [20, 21], Е.Е. Исакова [22], Р.Л. Михайлова [23, 24], М.А. Шнепс-Шнеппе [25-28], а также других ученых. При этом критический анализ проблемных вопросов, связанных с переходом СС СН на новые пакетные технологии представлен в работах М.А. Шнепс-Шнеппе [25-28], Н.А. Соколова [29], В.А. Нетеса [30].

Вместе с тем в данных работах не в полной мере раскрыты эволюционные процессы развития современных СС СН, а также проблемные аспекты, характерные для этого развития. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Цель работы – анализ технологий и принципов построения телекоммуникационных систем и сетей связи специального назначения, а также перспектив и проблемных вопросов их развития.

Ввиду объемности материала работы он был декомпозирован на следующие подразделы.

1. Основные используемые термины и определения.
2. Сеть связи специального назначения – определение, состав, классификация, требования.
3. Анализ вариантов построения современных сетей связи специального назначения (на примере сетей связи вооруженных сил США).
 - 3.1. Сеть DISN.
 - 3.2. Сеть GIG.
4. Анализ основных тенденций развития современных сетей связи специального назначения.

- 4.1. Многоэшелонированный принцип построения современных сетей связи специального назначения.
- 4.2. Широкое использование в составе сети связи специального назначения арендуемых сетевых ресурсов коммерческих операторов связи.
- 4.3. Массовое использование в современных сетях связи специального назначения технологий коммутации пакетов и коммерческих протоколов связи.
- 4.4. Перспективы построения сетей связи специального назначения в соответствии с концепцией NGN.
- 4.5. Перспективы перехода от сетей связи специального назначения к инфокоммуникационным сетям специального назначения.
5. Проблемные вопросы обеспечения эксплуатации и модернизации сетей связи специального назначения.
 - 5.1. Проблемные вопросы обеспечения устойчивости сетей связи специального назначения в условиях перехода от технологий коммутации каналов к технологиям коммутации пакетов.
 - 5.2. Проблемные вопросы обеспечения устойчивости сетей связи специального назначения в условиях внедрения концепции NGN.
 - 5.3. Проблемные вопросы управления сетью связи специального назначения в условиях внедрения концепции NGN.

1. Основные используемые термины и определения

Для конкретизации понятий, рассматриваемых в статье, введем базовые определения.

Сеть связи – технологическая система, включающая в себя средства и линии связи и предназначенная для электросвязи или почтовой связи [32].

Электросвязь – любое излучение, передача или прием знаков, сигналов, голосовой информации, письменного текста, изображений, звуков или сообщений любого рода по радиосистеме, проводной, оптической и другим электромагнитным системам [32].

Сеть электросвязи – сеть связи, обеспечивающая электросвязь при помощи электромагнитных систем. Сеть электросвязи состоит из сетей следующих категорий: сети связи общего пользования; выделенные сети связи; технологические сети связи, присоединенные к сети связи общего пользования; сети связи специального назначения и другие сети связи для передачи информации. Таким образом, сеть электросвязи фактически представляет собой объединение отдельных категорий сетей, которые классифицируются по их назначению [32].

Сеть связи специального назначения (СС СН) – сеть связи, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [32].

При этом для обеспечения функционирования СС СН могут использоваться как ее собственные ресурсы, так и ресурсы сетей связи общего пользования.

Сеть связи общего пользования (СС ОП) – комплекс взаимодействующих сетей связи, обеспечивающих электросвязь, в том числе – трансляцию телеканалов или радиоканалов, предназначенных для возмездного оказания услуг связи любому пользователю. При этом СС ОП могут иметь присоединение к СС ОП иностранных государств [32].

СС СН и СС ОП включают в себя первичные и вторичные сети.

Первичная (транспортная) сеть связи – совокупность технических средств, комплексов, линий связи и обслуживающего персонала, обеспечивающая потребителей стандартными каналами (трактами) передачи первичных электрических сигналов. Основным видом сервиса, предоставляемого абонентам первичных сетей связи, являются типовые каналы и тракты [3].

Вторичная сеть связи (сеть абонентского доступа) – совокупность технических средств и связей между ними, обеспечивающая потребителей различными видами услуг по доставке, хранению и обработке информации. Основным видом сервиса, предоставляемого абонентам вторичных сетей, являются услуги по информационному обмену [3].

Выделенные сети – сети связи, которые организуются в интересах отдельных категорий должностных лиц, пунктов управления (ПУ) и специальных систем управления. К таким выделенным сетям, например, можно отнести сети навигации, государственного опознавания, системы телеметрии в системах непосредственного управления, сети правительственной связи и др.

Кроме того, в современных нормативных актах используется термин «информационно-телекоммуникационная сеть». Причем в подавляющем числе нормативных актов этот термин ассоциируется с сетью Интернет, а содержание этих актов в основном ориентировано на использование информационных ресурсов сети Интернет и, в основном, не касается ее технологических особенностей как сети электросвязи.

Информационно-телекоммуникационной сеть – технологическая система, предназначенная для передачи по линиям связи информации, доступ к которой осуществляется с использованием средств вычислительной техники [48].

Кроме того, часто используемым является понятие «телекоммуникационная система», которое в большинстве случаев ассоциируется с отдельной первичной (транспортной) сетью, которая соответствует отдельной области маршрутизации в составе СС СН или СС ОП.

Телекоммуникационная система (ТКС) – это совокупность связанных линиями связи сетевых узлов, которая основана на единой транспортной технологии и эксплуатируется в соответствии с едиными принципами маршрутизации, адресации и управления, при этом в ее составе имеются граничные узлы, ответственные за допуск трафика в сеть или направление его в другие смежные телекоммуникационные системы.

2. Сеть связи специального назначения – определение, состав, классификация, требования

СС СН выполняет задачи, в первую очередь, по доставке информации между распределенными в пространстве органами и пунктами системы управления вышестоящего уровня – органов государственной власти, органов обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка.

Таким образом, в самом общем виде СС СН может быть определена как совокупность распределенных в пространстве взаимосвязанных технических средств и обслуживающего персонала, выполняющих задачи по обеспечению информационного обмена в системах государственного и военного управления, а также системах управления обеспечения безопасности и правопорядка [3].

По транспортным средствам, используемым для доставки информации, в составе СС СН различают [3]:

- *сети фельдъегерско-почтовой связи*, в которых доставка информации (в виде карт, схем, посылок, бандеролей, писем и т. д.) осуществляется специальными курьерами (фельдъегерями) с помощью обычных транспортных средств;
- *сети электросвязи*, в которых доставка информации осуществляется с помощью электрических сигналов и электромагнитных волн.

Каналы и тракты транспортных сетей связи в современных СС СН создаются на базе линий и сетей различных родов связи, входящих в состав первичной (транспортной) сети [33, 34].

По видам обеспечиваемого для абонентов сервиса и услуг связи сети электросвязи обычно подразделяют на [3]:

- первичные (транспортные) сети связи;
- вторичные сети связи (сети абонентского доступа).

Классификация элементов сетей первичной и вторичной сетей СС СН представлена на рис. 1.

В составе первичных и вторичных сетей СС СН могут быть организованы *выделенные сети*.

Основой построения первичных (транспортных) сетей в составе СС СН в настоящее время являются [3, 33, 34]:

- линии и сети радиосвязи;
- линии и сети спутниковой связи;
- волоконно-оптические линии связи;
- линии радиорелейной и тропосферной связи;
- кабельные линии электрической связи.

К основным технологиям первичных (транспортных) сетей в составе СС СН можно отнести [33, 35, 36]:

- технологии коммутации каналов – PDH, SDH, OTH;
- технологии коммутации пакетов – IPv4, IPv6;
- технологии коммутации пакетов по виртуальным каналам – X.25, AX.25, Frame Relay, ATM, IP/MPLS, VPN и др.;

- технологии организации, управления и интеграции сетей связи – TMN, ASON/ASTN, NGN, GII и др.;
- специализированные технологии, разработанные для обеспечения связи в условиях преднамеренного воздействия дестабилизирующих факторов на СС СН.

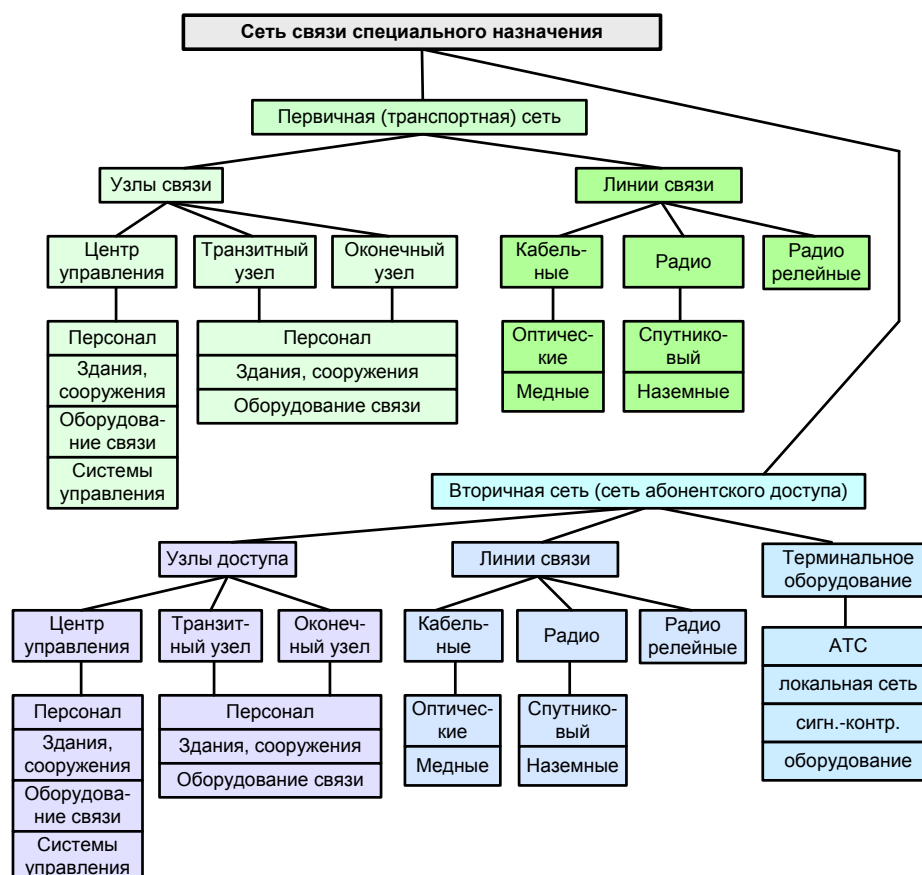


Рис. 1. Классификация элементов СС СН [41]

Вторичные сети СС СН обычно подразделяли по видам предоставляемых ими услуг, однако в настоящее время такая классификация устарела. В соответствии с современными взглядами вторичные сети можно подразделить по типу [33]:

- локальные сети;
- сети коллективного доступа;
- цифровые линии абонентского доступа;
- оптические линии абонентского доступа;
- сети мобильной или транкинговой связи;
- сети радиодоступа.

СС СН функционирует в интересах систем государственного и военного управления, а также систем управления обеспечения безопасности и правопорядка. К данным системам управления предъявляются требования по:

- *устойчивости* – способности органов управления выполнять свои функции в сложной, резко меняющейся обстановке в условиях помех и массированных дестабилизирующих воздействиях противника;

- *непрерывности* – возможности органов управления постоянно взаимодействовать с объектами управления;
- *оперативности* – способности получать, обрабатывать и преобразовывать информацию в соответствии с темпом изменения текущей ситуации;
- *скрытности* – способности сохранять в тайне факт, время и место преобразования информации, ее содержание и принадлежность к управляющим объектам.

Для обеспечения этих требований к управлению, к связи, как к процессу переноса информации от объектов управления к пунктам управления и обратно, предъявляются требования по:

- *своевременности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечивать передачу или сообщений или ведение переговоров в заданные сроки;
- *достоверности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечивать требуемую точность воспроизведения сообщений в пунктах доставки, а также сохранять эту точность при преобразовании информации;
- *безопасности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечить сохранение в тайне содержания передаваемых сообщений и самого факта их передачи.

Соответственно связь, как процесс переноса информации, должна удовлетворять всем этим требованиям. В связи с этим вводится такая интегральная категория как «качество связи».

Качество связи – это свойство связи, характеризующее ее способность обеспечивать своевременную, достоверную и безопасную передачу сообщений.

В СС СН циркулируют информационные потоки системы управления, которые после их обработки и систематизации представляются уполномоченным лицам или органам для принятия решений. В связи с этим в СС СН при передаче этих потоков должны обеспечиваться требования по информационной безопасности.

Информационная безопасность – это состояние, при котором обеспечивается конфиденциальность, целостность и доступность информации [37].

Конфиденциальность информации – состояние информации, при котором доступ к ней осуществляют только субъекты, имеющие на это право [39].

Целостность информации – состояние информации, при котором обеспечивается ее достоверность и полнота [37].

Доступность информации – состояние информации (ресурсов информационной системы), при котором субъекты, имеющие права доступа к информации, могут реализовывать их беспрепятственно [39].

Основной особенностью СС СН, которая отличает ее от СС ОП, является то, что СС СН ориентирована на функционирование, как в мирное, так и в военное время, в условиях воздействия противника, а также различного рода дестабилизирующих факторов. В связи с этим для СС СН особенное значение приобретает свойство ее устойчивости.

В ГОСТ Р 53111-2008 даны следующие определения.

Устойчивость сети электросвязи – способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части ее элементов в результате воздействия дестабилизирующих факторов [40].

Дестабилизирующий фактор – воздействие на сеть электросвязи, источником которых является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего характера, приводящее к выходу из строя элементов сети [40].

Таким образом, понятие «фактор», в соответствии с ГОСТ Р 53111-2008, семантически соответствует понятию «воздействие». Уточняя, что основной функцией СС СН является обеспечение требуемого качества связи и, разделяя дестабилизирующие факторы на естественные и искусственные, можно дать следующее определение.

Устойчивость сети связи – способность сети связи обеспечивать требуемое качество связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов естественного и искусственного характера.

Классификация дестабилизирующих воздействий на СС СН представлена на рис. 2. При этом естественные и искусственные непреднамеренные дестабилизирующие воздействия характерны для мирного времени. В военное время и в угрожаемый период эти воздействия дополняются преднамеренными искусственными дестабилизирующими воздействиями.

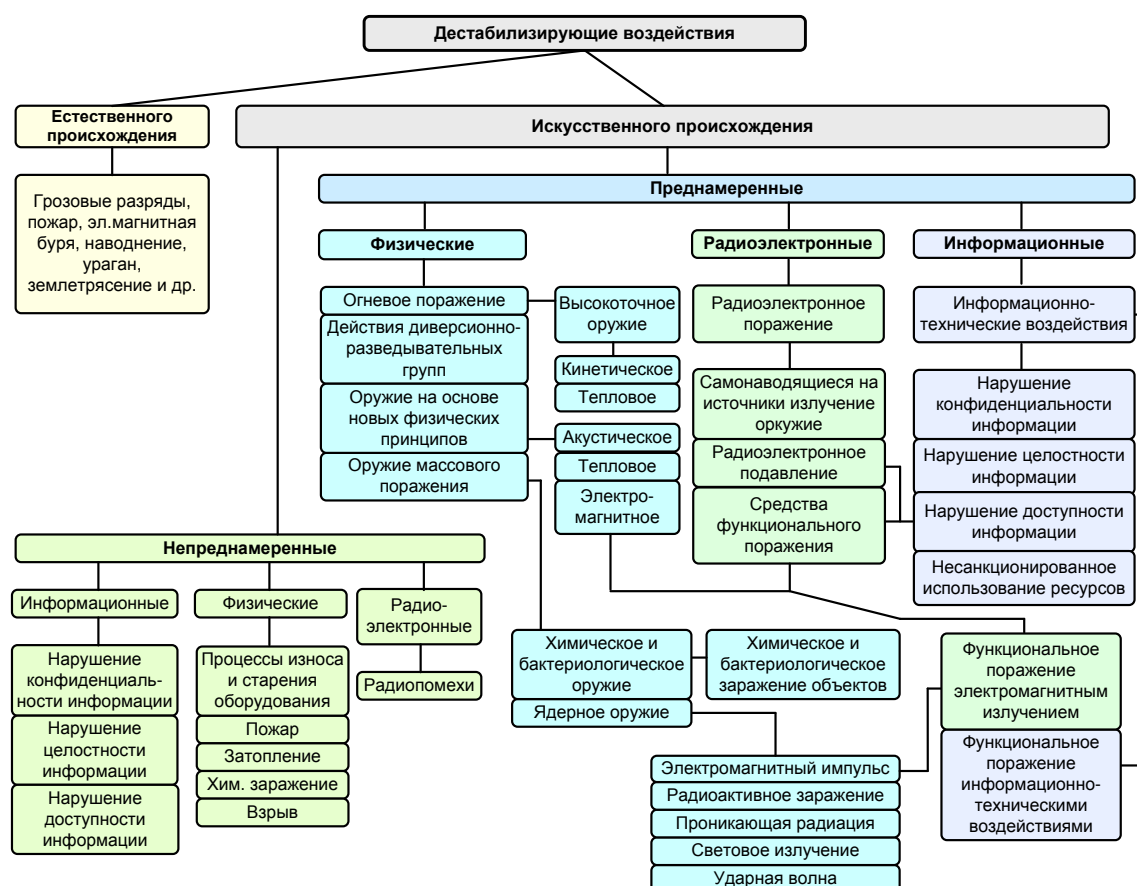


Рис. 2. Классификация дестабилизирующих факторов [41]

3. Анализ вариантов построения современных сетей связи специального назначения (на примере сетей связи Вооруженных сил США)

Рассмотрим структуру и принципы построения современных СС СН на примере систем связи, используемых в интересах силовых ведомств США.

Тенденции развития СС СН США предусматривают разработку концептуальных принципов и плана достижения глобального взаимодействия между органами военного управления и участниками боевых действий, что позволит им выполнять любую задачу в любое время в любом месте, быстро устанавливать надежную и безопасную засекреченную связь и при этом иметь систему, приемлемую по стоимости. Основной задачей построения СС СН является формирование единой информационной среды, которая позволяла бы эффективно поддерживать связь и управление в операциях, проводимых несколькими видами Вооруженных сил (ВС), либо с участием союзных войск с тем, чтобы участники боевых действий имели средства, позволяющие выполнять боевые задачи в любой точке земного шара [54].

Реализацию инициативы создания и развития глобальной единой телекоммуникационной среды, которая должна обеспечить информационные потребности военного командования США в XXI веке рассмотрим на примере сетей DISN и GIG.

При этом необходимо отметить, что одним из основных и важных элементов сетей DISN и GIG является их космический сегмент, образованный сетями спутниковой связи (ССС) DSCS/WGS, MilStar/AEHF, UFO/MUOS. Эти СССР обеспечивают глобальность покрытия сетей DISN и GIG, а также привязку удаленных и мобильных абонентов стратегического, оперативного и тактического звеньев управления к этим сетям. Подробная информация о составе СССР вооруженных сил США, их задачах и технических характеристиках представлена в работе [38].

3.1 Сеть DISN

Сеть DISN (Defense Information Systems Network) – оборонная интегрированная система передачи данных министерства обороны США. Главная цель сети DISN – обеспечение высокой степени интеграции услуг, предоставляемых отдельным пользователям, в локальных и глобальных сетях. Предполагается, что пользователи будут регулярно обмениваться информацией в виде речи, данных и изображений, используя одни и те же терминалы в течение отдельного сеанса. Сеть предоставляет услуги по передаче всех видов информации (речи, данных, видео, мультимедиа) и интегрирует все системы связи министерства обороны США (рис. 3).

В настоящее время основу DISN составляют оптические транспортные сети на основе технологии SONET, использующие коммутацию каналов по стандарту TDM. В сети коммутации каналов сегодня работают следующие основные военные сети связи Министерства обороны США (рис. 3) [25]:

- 1) телефонная сеть DSN (Defense Switched Network);
- 2) закрытая коммутируемая сеть DRSN (Defense Red Switched Network);
- 3) сеть видеоконференцсвязи DVS (DISN VIDEO).

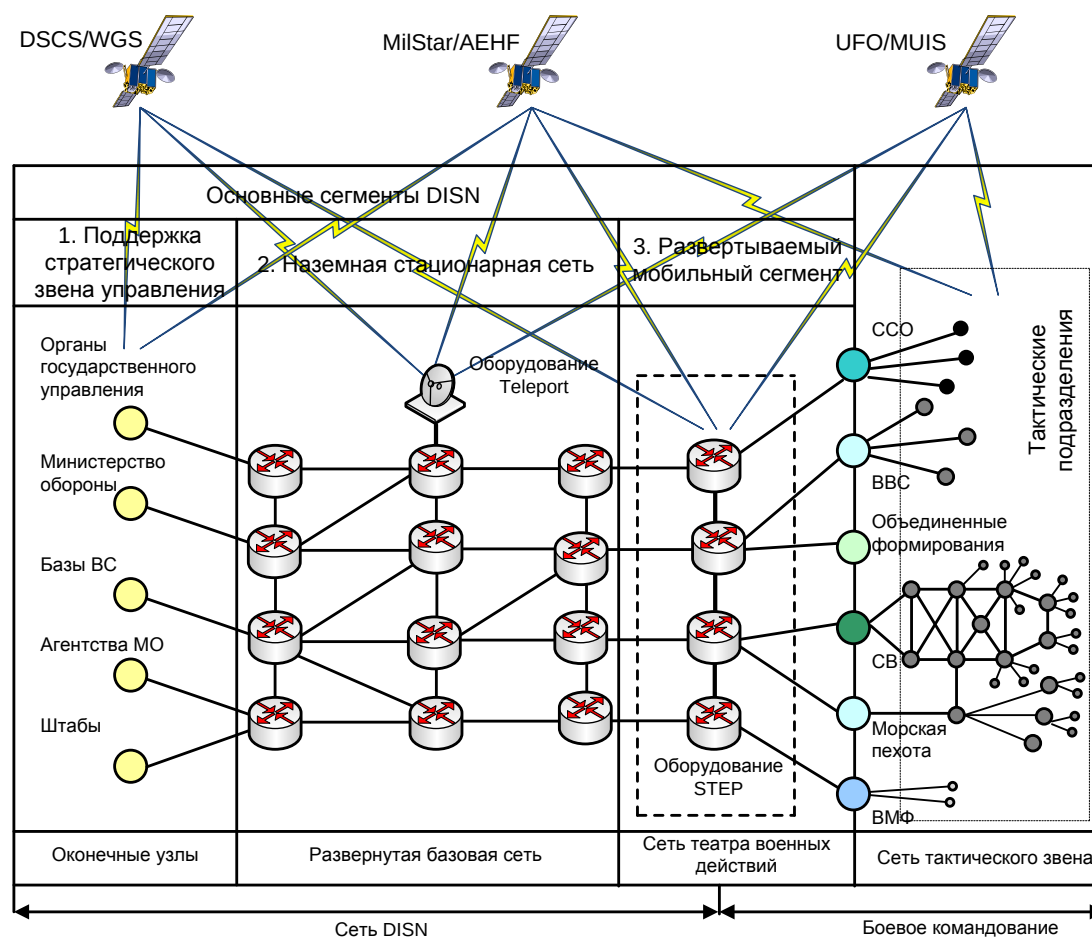


Рис. 3. Сеть DISN [25]

Кроме того, ресурсы DISN используют четыре закрытые сети, которые используют выделенные магистральные каналы [25]:

- объединенная глобальная сеть разведывательных коммуникаций JWICS (Joint Worldwide Intelligence Communications System) – для передачи секретной информации по протоколам TCP/IP;
- сеть управления спутниками AFSCN (Air Force Satellite Control Network);
- NIPRNet (Non-classified Internet Protocol Router Network) – сеть, используемая для обмена незакрытой, но важной служебной информацией между «внутренними» пользователями;
- SIPRNet (Secret Internet Protocol Router Network) – система взаимосвязанных компьютерных сетей, используемых Министерством обороны США для передачи закрытой информации по протоколам TCP/IP;

При этом сети JWICS и AFSCN построены на базе коммутаторов ATM (техника ATM в настоящее время не производится) [25].

В 2006 г. в Министерстве обороны США решили перейти от коммутации каналов к коммутации пакетов. Был принят план Joint Vision 2020, в котором были утверждены перспективы развития DISN в период до 2020 г. В этом плане была объявлена смена принципа построения сети DISN – ее переход к IP протоколу. Предполагалось, что IP протокол станет единственной технологией обме-

на между транспортным уровнем и приложениями (рис. 4), а протоколом сигнализации станет протокол SIP.

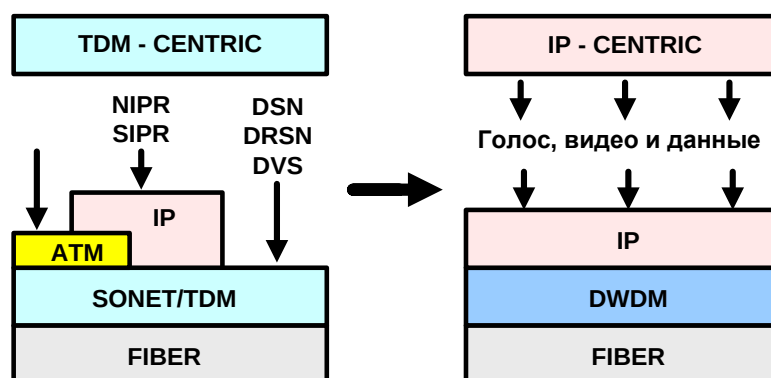


Рис. 4. Эволюция сети DISN [25]

Ввиду того, что у стандартного протокола SIP имеются определенные сложности с обеспечением безопасности связи и обслуживанием приоритетных вызовов, что важно для специальных абонентов, по заказу министерства обороны США был разработан защищенный протокол AS-SIP. Протокол AS-SIP получился очень громоздким. Если стандартный протокол SIP использует 11 стандартов RFC, то AS-SIP требует учета почти 200 стандартов RFC. Кроме того, протокол AS-SIP еще далек от совершенства – в версию AS-SIP, обнародованную в июле 2013 г., внесено более 50 исправлений по сравнению с исходной версией, подготовленной полугодом ранее. Переход от сети SONET с коммутацией каналов, к коммутации IP-пакетов и протоколу SIP (или к AS-SIP) требует использования новых программных коммутаторов Soft Switch, которые будут функционировать в соответствии с концепцией NGN. При этом, в качестве поставщиков этих коммутаторов выступают Avaya, Jupiter и другие производители [25, 26].

Фактически, сеть DISN является базовой телекоммуникационной инфраструктурой, к которой подключаются другие сети (спутниковые, сети тактического звена и др.), а также на основе, которой строятся другие информационно-управляющие сети (такие как GIG) или наложенные сети обмена информацией (такие как NIPRNet, JWICS).

Более полная информация о построении и технологических особенностях функционирования сети DISN приведена в работах [25-27].

3.2 Сеть GIG

Сеть GIG (Global Information Grid) – глобальная информационно-управленческая сеть силовых ведомств США. GIG строится, в том числе, и на основе связных ресурсов DISN и предназначена для информационного обеспечения всех элементов системы национальной безопасности страны, включая вооруженные силы. Она объединяет взаимосвязанные распределенные вычислительные системы коллективного пользования, локальные вычислительные сети, системы связи, базы данных, системы компьютерной и сетевой безопасности, средства обучения пользователей, а также другие элементы, предназна-

ченные для централизованного удовлетворения всех информационно-технических потребностей системы управления войсками и органов государственного управления [56].

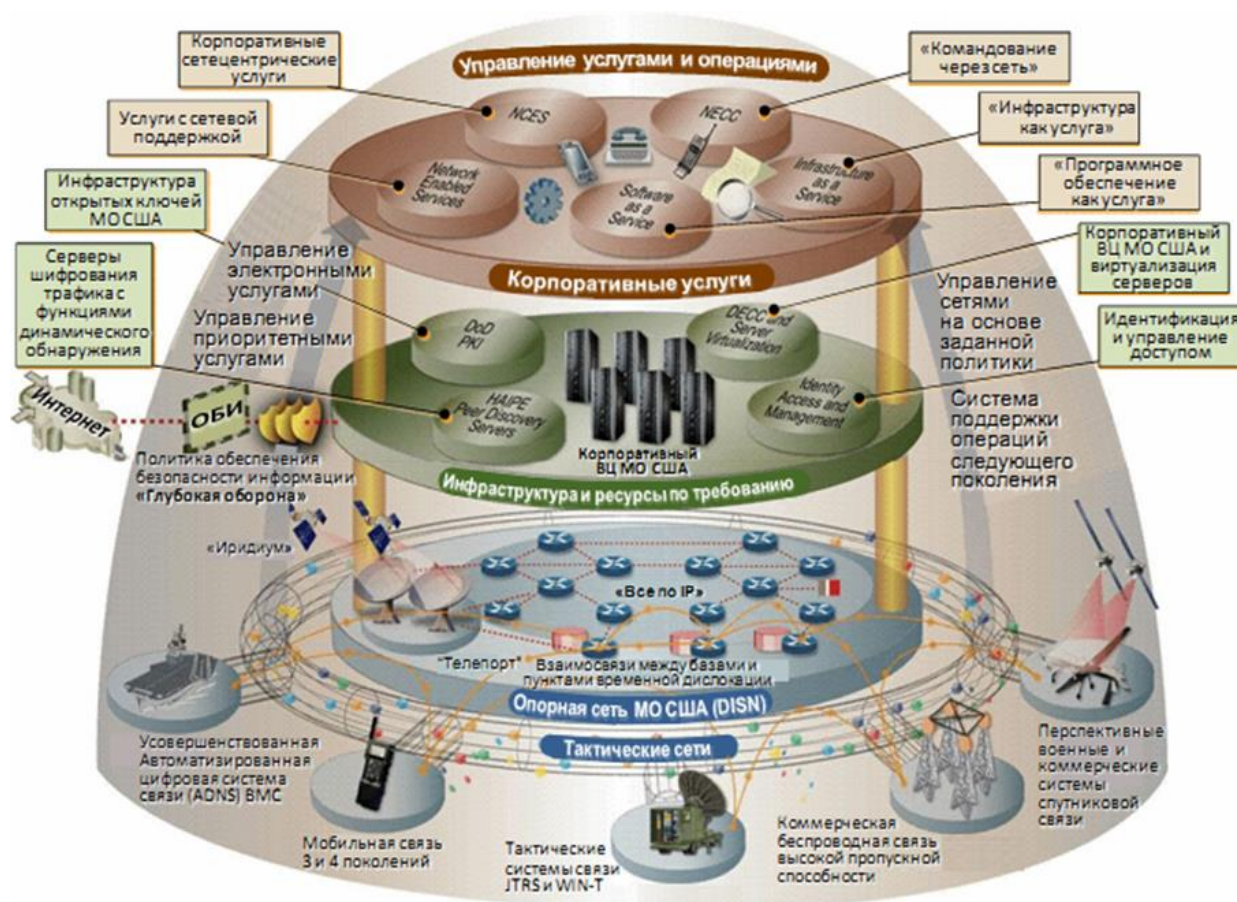
GIG поддерживает обработку для обеспечения оперативных задач, действий и функций разведывательных органов Министерства обороны США, АНБ и других разведывательных ведомств. Она предоставляет возможность обмена информацией всем оперативным пунктам дислокации – авиабазам, гарнизонам, военно-морским базам и т. д. Сеть GIG обеспечивает интерфейсы для коалиционных, союзных и не принадлежащих Министерству обороны США пользователей и систем. Информационные технологии в виде автоматизированных и информационных систем, не входящих в GIG, являются автономными, самодостаточными либо информационными системами, которые не предназначены или не могут быть подсоединены к этой информационно-управляющей сети [57].

Сеть обмена данными GIG представляет собой объединенную цифровую сеть на основе протокола IPv6, построенная по принципу «все по IP» и использующая как собственные каналы связи, так и каналы связи региональных и национальных операторов связи. В качестве базового протокола для обмена данными в GIG используется IP/MPLS, а сама сеть строится в соответствии с концепцией NGN с широким использованием программных коммутаторов SoftSwitch производства Avaya, Jupiter и других производителей [26]. При этом ядром GIG является глобальная высокоскоростная опорная сеть GIG-BE (Global Information Grid-Bandwidth Expansion). GIG-BE – это мировая оптическая сеть SONET с каналами 10 Гбит/с, обслуживающая порядка 100 операционных вычислительных центров по всему Земному шару [58, 59].

Первая версия GIG-системы (GIG v. 1), представленная в январе 2000 г., была построена как структура, которая объединяла существовавшие в то время системы с иерархическим принципом построения (platform-centric). В этой связи, формально GIG определялась как множество глобально объединенных по принципу «точка-точка» информационных, а также автоматизированных и коммуникационных систем, связанных с ними процессов сбора, отправки, распределения и управления информацией по требованию участников военных операций, политического руководства и обеспечивающих структур. Она была ориентирована на обслуживание штабов объединенных оперативных формирований и, в основном, ограничивалась стратегическим и оперативным уровнями управления [57].

Разработка архитектуры GIG второй версии (GIG v. 2) была обнародована в ноябре 2002 г. Новая архитектура была ориентирована на создание сетецентрической среды в соответствии с концепцией сетецентрических войн Network-Centric Warfare (NCW). Архитектура GIG v. 2 состоит из 5 блоков для стратегического, оперативного, тактического и комбинированного применения американскими и союзническими ВС в операциях и конфликтах различного масштаба и назначения. Включение тактического уровня в состав GIG v. 2 отражает стремление реализовать то положение, что информационное превосходство становится важным слагаемым на всех уровнях управления и, особенно, по от-

Вычислительную основу GIG составляют 18 центров корпоративных вычислений министерства обороны США, 5 региональных информационных центров и 10 центров региональной обработки данных сухопутных войск. Создание Grid-системы распределенных вычислений в составе GIG стал возможен за счет использования в качестве ядра GIG высокоскоростной оптической системы связи GIG-BE. Использование Grid-технологий позволило создать управляющую и прикладную инфраструктуру для предоставления широкого класса информационных сервисов в интересах военных пользователей [57].



Глобальная информационная Grid-система в составе GIG – это инфраструктура координированной распределенной обработки информации и хранения гетерогенных информационных ресурсов с гибкой политикой управления, непрерывного доступа к ресурсам и вычислительным мощностям с обеспечением безопасности, распараллеливания обмена данными, эффективного и экономного использования процессорной нагрузки. Она образует так называемую «инфраструктуру базовых возможностей» для своевременного, безопасного и

повсеместного доступа пользователей к информации для выработки, принятия решений и оптимизации их исполнения (рис. 5) [57].

Наличие Grid-инфраструктуры позволило реализовать программу перехода от объединенной глобальной системы оперативного управления GCCS-J (Global Command and Control-Joint) к объединенной системе командования и оперативного управления JC2 (Joint Command and Control System). Переход к последней выполняется посредством переложения программного обеспечения GCCS-J на корпоративные сервисы сетевой связности NCES (Net Centric Enterprise Services), что является одной из основных составляющих корпоративных сервисов GES (GIG Enterprise Services) для GIG в интересах командования и оперативного управления стратегического уровня [57].

С целью расширения диапазона досягаемости и повышения сетевой связности GIG для нее были разработаны дополнительные программы, связанные с включением в сеть спутниковых систем связи через систему телепортов, включения в сеть тактических радиосетей. Кроме того, для повышения качества принятия решений пользователи GIG получили возможность объединяться в виртуальные группы коллегиального сотрудничества [57].

В 2011 г. министерство обороны США приступило к переходу GIG на новую версию – GIG v. 3. Необходимость модернизации обусловлена тем, что основным глобальным связывающим звеном между серверами GIG вне ТВД и участниками боевых действий является спутниковая группировка. Однако, как показали результаты войны в Ираке и Ливии, она зачастую не справляется с передачей больших объемов данных в условиях боевых действий. Развитие сети GIG при переходе к версии GIG v. 3 будет вестись в соответствии с 6-ю ключевыми программами [28].

Программа 1 – формирование высокоскоростного наземного компонента GIG на основе волоконно-оптических линий связи с технологией DWDM, получившая название DISN-Core [28].

Программа 2 – формирование космического сегмента GIG. Эта программа включает строительство перспективной объединенной системы спутниковой связи, базовыми компонентами которой станут несколько орбитальных группировок CCC. К числу таких перспективных группировок CCC относятся WGS, AENF, MUOS [38].

Программа 3 – создание системы «телепортов». Под «телепортом» американские специалисты понимают телекоммуникационный пункт сбора и распределения информации, который объединяет наземный и космический сегменты GIG и обеспечивает боевые подразделения широкополосным, мультимедийным и глобальным доступом к DISN [28].

Программа 4 – разработка тактического радиосегмента GIG. Программа предполагает разработку широкополосных радиостанций нового поколения, структура и функциональные возможности которых реализуются на основе концепции «программируемого радио» SDR (Software Defined Radio) и удовлетворяет новым, повышенным требованиям АНБ США к системам шифрования сигналов [28].

Программа 5 – разработка унифицированного комплекса сетевых сервисов корпоративного информационного обслуживания NCES (Net-Centric Enterprise Service). Комплекс предназначен для обеспечения любого пользователя, имеющего доступ к GIG, стандартным набором информационных услуг по своевременному и безопасному доступу к необходимой информации высокого качества [28].

Программа 6 – обеспечение информационной безопасности в GIG. Ее ключевым элементом является программа модернизации криптографических средств защиты СМР (Crypto Modernization Program), которая предполагает создание новых методов и способов засекречивания, а также защиты информационных ресурсов [28].

Более полная информация о построении и технологических особенностях функционирования сети GIG приведена в работах [25-28, 57, 58].

4. Анализ основных тенденций развития современных сетей связи специального назначения

Анализ представленных выше принципов построения сетей DISN и GIG, анализ работ в области построения СС СН, обеспечивающих информационный обмен в ВС США и НАТО, а также работ в области развития отечественных СС СН [2, 8-11, 25-28, 35, 51-54, 56-60] позволил выявить следующие общие тенденции развития СС СН:

- переход от сопряжения отдельных СС СН в различных органах государственного и военного управления к единой СС СН, основанной на многоэшелонированном принципе построения (космический, воздушный, наземный и морской эшелоны);
- широкая интеграция в состав СС СН сегментов СС ОП и коммерческих телекоммуникационных ресурсов;
- активное замещение в СС СН технологий коммутации каналов на технологии коммутации пакетов;
- массовое использование коммерческих протоколов и технологий в составе СС СН, прежде всего, протоколов IP (Internet Protocol) и MPLS (Internet Protocol and Multiprotocol label switching);
- конвергенция отдельных сетей и систем связи в единое информационное пространство на основе концепции NGN;
- широкое использование спутниковых систем связи (ССС) в качестве основы, обеспечивающей глобальную связность СС СН и глобальную управляемость во всех звеньях управления, особенно в военное время, при этом в состав СН СН могут включаться СССР из состава СС ОП, в том числе СССР гражданских операторов спутниковой связи;
- использование в сетях СС СН тактического звена технологий адаптивных мобильных радиосетей Mesh/MANET-сетей (Mobile Ad hoc Network);

- использование методов обработки Big Data, а также облачных и Grid-технологий для организации распределенного хранения и обработки больших массивов данных.

Рассмотрим основные из этих тенденций более подробно.

4.1. Многоэшелонированный принцип построения современных сетей связи специального назначения

Современные СС СН, как правило, декомпозируются на четыре эшелона (рис. 6):

- наземный эшелон (стационарный и мобильный (полевой) сегменты);
- воздушный эшелон (воздушный и наземный сегменты);
- морской эшелон (морской и наземный сегменты);
- космический (космический и наземный сегменты).

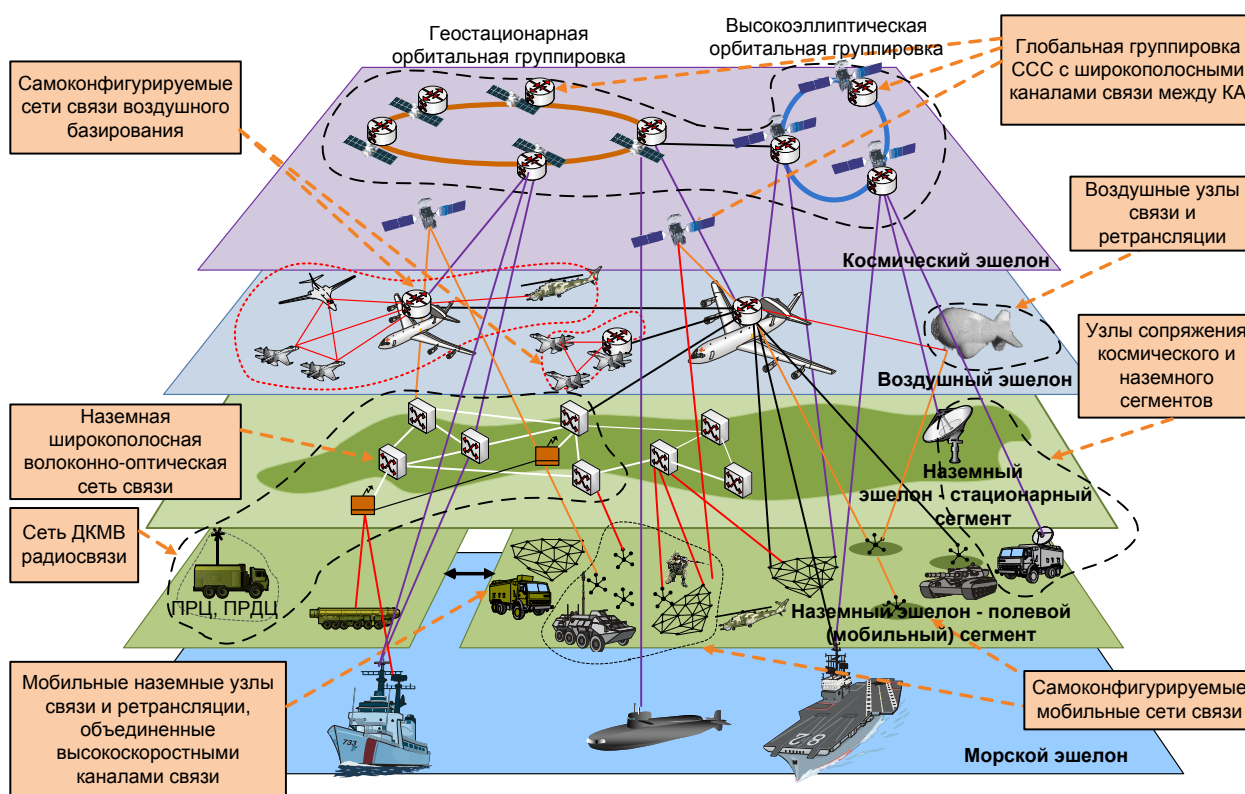


Рис. 6. Общая схема многоэшелонированного построения СС СН [60]

Наземный эшелон СС СН использует сетеориентированные, унифицированные технические и программно-аппаратные решения со стандартной номенклатурой типовых каналов связи. Наземный эшелон является взаимоувязанной совокупностью стационарных и подвижных узлов и линий связи различных родов. Он представляет организационно-техническое объединение средств и комплексов связи, выполняющих задачи по образованию, маршрутизации и коммутации каналов связи в интересах вышестоящей системы государственного и военного управления. Узлы и линии связи наземного эшелона также обеспечивают взаимодействие между техническими средствами других эшелонов.

Наземный эшелон включает в себя:

- стационарный сегмент;
- полевой (мобильный) сегмент;
- автоматизированную систему управления связью.

Стационарный сегмент наземного эшелона представляет собой цифровую стационарную транспортную сеть в составе СС СН. Стационарный сегмент наземного эшелона базируется на основе территориально-распределенных транспортных сетей из состава СС СН, а также на основе арендованных линий связи СС ОП. В качестве основной физической среды передачи стационарного компонента наземного эшелона выступают волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

Полевой сегмент наземного эшелона СС СН представляет собой совокупность самостоятельных, но организационно и технически взаимоувязанных ТКС, объединяющихся по звеньям управления в:

- полевую (мобильную) сеть связи стратегического звена управления;
- полевые (мобильные) сети связи оперативного звена управления;
- полевые (мобильные) сети связи тактического звена управления.

Полевой сегмент СС СН базируется на общих принципах построения самоорганизующихся мультисервисных сетей с максимально возможным использованием унифицированных цифровых средств и комплексов связи. Предполагается, что структура полевого (мобильного) сегмента наземного эшелона СС СН является инвариантной по отношению к структуре системы государственного и военного управления. В состав узлов связи полевого (мобильного) сегмента входит типовый набор радиорелейных, тропосферных, проводных и спутниковых средств связи, комплексы автоматизации связи, аппаратные электропитания и т.д.

Воздушный эшелон СС СН строится на основе средств воздушно-наземной связи и ретрансляторов связи на летно-подъемных средствах различного назначения. Воздушный эшелон СС СН включает в себя:

- наземный сегмент;
- воздушный сегмент;
- автоматизированную систему управления связью с элементами наземного и воздушного базирования.

К воздушному сегменту относится транспортная сеть, включающая в себя бортовые комплексы связи, которыми оснащаются ретрансляторы транспортной сети воздушного эшелона, а также воздушные ПУ летательными аппаратами различных видов авиации, а также средства связи для сопряжения отдельных сетей других эшелонов, базирующихся на летно-подъемных средствах (самолеты, вертолеты, дирижабли, аэростаты, беспилотные дистанционно-управляемые летательные аппараты, летающие платформы).

К наземному сегменту воздушного эшелона относятся комплексы связи, размещаемые на наземных узлах связи, стационарных и подвижных, средства сопряжения с транспортной сетью наземного эшелона.

Технической основой воздушного эшелона являются комплексы радиосвязи ДКМВ, МВ, ДМВ диапазонов и СМВ/ММВ диапазонов спутниковой связи.

Морской эшелон СС СН представляет организационно-техническое объединение стационарно-мобильных узлов связи, радиоцентров, радиостанций, автоматизированных комплексов связи подводных лодок, кораблей, летательных аппаратов, соединенных линиями различных родов связи. Для организации радиосвязи используются различные диапазоны радиоволн – СНЧ, СДВ, ДВ, СВ, КВ, УКВ, а также каналы спутниковой связи. Морской эшелон включает в себя:

- морской сегмент;
- наземный сегмент;
- автоматизированную систему управления связью.

Морской сегмент, как правило, состоит из средств связи и автоматизации, размещаемых на подводных лодках и кораблях, а при организации сетей для ретрансляции сигналов используются радио-ретрансляторы на летно-подъемных средствах и ССС.

Космический эшелон СС СН развертывается на основе ССС, образованных линиями спутниковой связи и узлами сети – земными станциями и космическими аппаратами связи. Космический эшелон СС СН включает в себя:

- космический сегмент;
- наземный сегмент.

Космический эшелон СС СН предназначен для обеспечения глобальной связности СС СН в стратегическом и оперативно-тактическом звеньях управления, правительственной связи и специальной связи. При этом структура космического эшелона СС СН инвариантна по отношению к структуре системы государственного и военного управления.

Технологии, применяемые в ТКС космического эшелона, обеспечивают интеграцию различных видов трафика, устойчивое и глобальное взаимодействие комплексов и средств, на стационарных, полевых и подвижных узлах связи различных звеньев управления для стационарного наземного, полевого (мобильного) наземного, воздушного и морского эшелонов с целью обеспечения возможности обмена всеми видами информации между всеми абонентами во всех эшелонах СС СН.

4.2. Широкое использование в составе сети связи специального назначения канальных и сетевых ресурсов, арендуемых у коммерческих операторов связи

Анализ принципов построения современных СС СН, а также перспектив их развития, представленные в работах [2, 8-11, 25-28, 35, 51-54, 56-60], позволяет сформулировать следующие основные тенденции по технологическому построению СС СН:

- переход от иерархического принципа построения СС СН, когда ее структура жестко увязывается со структурой организационной подчиненности абонентов к децентрализованной сетевой структуре, которая

не зависит от организации системы подчиненности абонентов, и в большей степени соответствует современным требованиям к сетечетрическим системам государственного и военного управления;

- отказ от построения СС СН на основе отдельной связной инфраструктуры и переход к построению СС СН на основе гибридного подхода, когда отдельные сегменты СС ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН;
- максимальное широкое использование для построения СС СН подходов, протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций.

Данные тенденции подтверждаются общими принципами, заложенными в структуру построения СС СН для ВС РФ и для ВС США.

Стационарные и мобильные узлы, на основе которых будут разворачиваться компоненты перспективных СС СН, привязываются к единой транспортной сети СС СН, основу которой составят ВОЛС, а использование ССС обеспечит глобальность информационного обмена и связность отдельных сегментов ВОЛС.

При этом, при недостатке собственных ресурсов СС СН, как правило, необходимые каналные ресурсы из СС ОП арендуются у региональных и национальных операторов связи. Основным подходом к организации такой аренды является использование низкоуровневых ресурсов сети операторов связи, к которым можно отнести [9-11]:

- выделенные каналы связи для передачи потоков E1-E4, STM-n;
- оптические волокна в волоконно-оптическом кабеле;
- отдельные длины волн (в составе ВОЛС с технологией WDM);
- радиоресурсы коммерческих ССС;
- виртуальные и логические соединения на канальном уровне, реализуемые, например, с использованием базовых услуг канального уровня сети передачи данных VLAN, L2 VPN;
- виртуальные частные сети и туннели канального (технологии VLAN, MPLS L2 VPN, VPLS, PPTP, L2TP и др.) и сетевого уровня (технологии IP VPN, MPLS L3 VPN, IPSec и др.).

Необходимо отметить, что используемые структурно-технологические решения по сопряжению транспортных сетей из состава СС СН с сетями в составе СС ОП операторов связи обеспечивают связность на сетевом уровне, как правило, за счет использования единых протокольных решений на основе протоколов IPv4 и IPv6. В целях обеспечения безопасности при сопряжении СС СН с СС ОП оператора связи должны использоваться решения, обеспечивающие изоляцию адресных пространств отдельных сетей в составе СС СН и передаваемых потоков трафика от тех сегментов и потоков, которые обслуживаются оператором связи СС ОП.

Ряд экспертов считает, что в настоящее время развертывание отдельной телекоммуникационной инфраструктуры СС СН является экономически нецелесообразным, и что современные и перспективные СС СН активно используют

и будут использовать ресурсы гражданских операторов СС ОП национального и регионального масштаба. Однако, при таком пути развития СС СН, на нее существенное влияние будут оказывать технологии, на основе которых строится и модернизируется сети гражданских операторов связи [9-11].

Таким образом, из самого факта сопряжения СС СН и СС ОП следует два важных вывода:

- 1) технологии связи СС СН должны быть «обратно совместимыми» с технологиями, используемыми в гражданских СС ОП, для обеспечения использования ресурса СС ОП в интересах СС СН;
- 2) сквозное сопряжение СС СН с СС ОП, а также последней с гражданскими СС ОП других государств, делает СС СН потенциально уязвимой для преднамеренных дестабилизирующих воздействий со стороны других государств.

Эти выводы определяют следующие современные тенденции развития СС СН:

- 1) мировой тенденцией является использование для построения перспективных СС СН современных «гражданских технологий», широко используемых в СС ОП, а не разработка специализированных технологических решений;
- 2) использование в СС СН «гражданских технологий» одновременно с их фактической интеграцией через общие сегменты СС ОП в мировое информационное пространство существенно расширяет спектр уязвимостей СС СН, которые могут быть использованы противником при реализации преднамеренных дестабилизирующих воздействий.

4.3. Массовое использование в современных сетях связи специального назначения технологий коммутации пакетов и коммерческих протоколов связи

В настоящий момент в мире происходит активное замещение специализированных технологий связи на открытые коммуникационные технологии, которые являются общими как для гражданских СС ОП, так и для СС СН. Например, в органах государственного и военного управления США и НАТО эксплуатируется большое количество СС СН, используемых различными ведомствами и базирующихся на использовании как специализированных военных, так и коммерческих телекоммуникационных ресурсов.

Принципиальным изменением, которое происходит в области построения транспортных сетей СС СН является переход к пакетной коммутации с одновременным обеспечением мультисервисного и интерактивного обслуживания абонентов. При этом в качестве базовых технологий в транспортных сетях доступа широко используются технологии коммутации пакетов IPv4 и IPv6, а также технология коммутации по меткам MPLS, которые начинают вытеснять технологии транспортных сетей PDH, SDH и ATM [8-11, 25-28].

Анализ работ [8-11, 25-28, 54, 56, 57], посвященных возможным вариантам технологического построения перспективных СС СН позволил сформиро-

вать основные принципы и технологии, используемые в них для организации связи.

Транспортная сеть СС СН представляет собой совокупность множества объединенных между собой пакетных ТКС, выполняющих задачи по доставке пакетов от абонента-источника к абоненту-потребителю.

Перспективные СС СН, как правило, строятся на основе ТКС, использующих IP протоколы. Кроме того, в них могут использоваться сети на основе технологий MPLS и MPLS-TE (для сетей на основе ресурсов ВОЛС и радиорелейной связи), технологии ATM, протоколов DVB-S/DVB-S2 (для CCC), протоколов на основе открытых стандартов STANAG (для сетей ДКМВ радиосвязи). Для обеспечения работы по каналам низкого качества, в большинстве случаев, в СС СН сохранено использование протоколов X.25 (для проводных аналоговых каналов с вероятностью ошибки 10^{-3}) и AX.25 (для аналоговых радиоканалов с вероятностью ошибки 10^{-2} и $5 \cdot 10^{-2}$) [51-53].

Таким образом, в транспортной сети СС СН используются следующие протокольные решения [2, 10, 22]:

- IP/MPLS самостоятельно или поверх PDH/SDH/OTH/ATM (для построения проводного транспортного сегмента);
- X.25 (для обеспечения работы по проводным аналоговым каналам и каналам связи низкого качества);
- AX.25 (для обеспечения работы по аналоговым радиоканалам и каналам связи низкого качества в условиях мирного времени, а также для построения мобильной (полевой) транспортной сети СС СН в условиях военного времени);
- протоколы семейства DVB (DVB-S/DVB-S2/DVB-RCS) для организации спутниковых каналов связи.

Применение пакетных технологий на основе протоколов IP/MPLS позволяет обеспечить организацию связи в транспортной сети СС СН на сетевых принципах, которые ранее были недоступны для ТКС на основе технологий коммутации каналов PDH/SDH/OTH. Это позволяет обеспечить в СС СН следующие эффекты [10]:

- возможность взаимодействия абонентов по принципу «каждый с каждым» (по схемам «point-to-point» и «multipoint-to-multipoint») в любой момент времени при условии эффективного использования сетевых ресурсов;
- эффект повышения устойчивости транспортной сети и улучшения качества обслуживания (QoS – Quality of Service), несмотря на возможное использование разных операторов связи, в условиях выхода из строя большинства узлов связи, за счет оперативной организации обходных маршрутов в статическом и динамическом режимах.

Объединение отдельных ТКС организуют путем обмена маршрутной информацией, необходимой для правильного выбора маршрута доведения пакетов с учетом отказов и возможной перегрузки элементов СС СН. Для СС СН, состоящей из большого числа ТКС и сетей с высоким числом взаимных связей используются динамические протоколы маршрутизации. При обмене маршрут-

ной информацией между ТКС и сетями в СС СН, как правило, используется маршрутный протокол BGP4 [51-53].

В ТКС и сетях, входящих в состав СС СН, используются известные модели и механизмы обеспечения качества обслуживания (Int Serv, Diff Serv), применяемые в пакетных сетях с целью обеспечения требуемых показателей QoS. С целью исключения случаев перегрузки трафиком в состав каждой ТКС включаются граничные маршрутизаторы. Передаваемый трафик котируется путем соглашения между абонентами и службой администрирования как ТКС, так и всей СС СН в целом. При превышении квот трафик сбрасывается, либо доводится без гарантий по соблюдению требуемых показателей качества обслуживания [50].

Таким образом, транспортная сеть СС СН строится с использованием единых подходов, архитектуры и принципов построения, технологий и средств передачи, защиты данных и управления в части как стационарного, так и мобильного (полевого) сегмента:

- стационарный сегмент транспортной сети СС СН строится с использованием ТКС, основанных на технологии пакетной коммутации IP/MPLS с встроенными функциями динамической маршрутизации, а также с использованием ТКС, основанных на технологиях коммутации каналов PDH/SDH/OTN с каналами типа E1-E4, STM-n. Причем, эти ТКС могут являться как сегментами самой СС СН, так и сегментами СС ОП региональных и национальных операторов связи;
- мобильный (полевой) сегмент СС СН строится с использованием ТКС, основанных на приоритетном использовании пакетных технологий IP/X.25/AX.25;
- унаследованное оборудование СС СН сопрягается с новыми средствами связи и современными ТКС через модули сопряжения, которые инкапсулируют трафик унаследованных средств связи в пакетный трафик, что позволяет обеспечить единый подход к транспортировке всех видов информации с использованием пакетной коммутации.

Вышеуказанные подходы к построению транспортной сети СС СН позволяют:

- организовать единый подход к передаче информации, основанный на технологиях коммутации пакетов, как по проводным (оптическим, медным и др.) и беспроводным (радиорелейным, тропосферным, спутниковым, широкополосного радиодоступа, КВ/УКВ и иным) аналоговым и цифровым каналам связи СС СН, так и по каналам связи СС ОП региональных и национальных операторов связи, включая глобальную сеть Интернет;
- осуществлять оперативное динамическое управление ресурсами СС СН, в том числе адаптивную маршрутизацию потоков трафика с учетом динамики изменения структуры транспортной сети СС СН в результате дестабилизирующих воздействий.
- обеспечить согласованное взаимодействие отдельных ТКС, сетей и унаследованных средств связи, входящих в транспортную сеть СС СН,

и в итоге – объединить их в единое телекоммуникационное пространство;

- получить ряд технологических преимуществ от внедрения в состав СС СН новых ТКС, основанных на новейших коммерческих технологиях из гражданской отрасли связи.

Обобщенная структурная схема сети СС СН приведена на рис. 7.

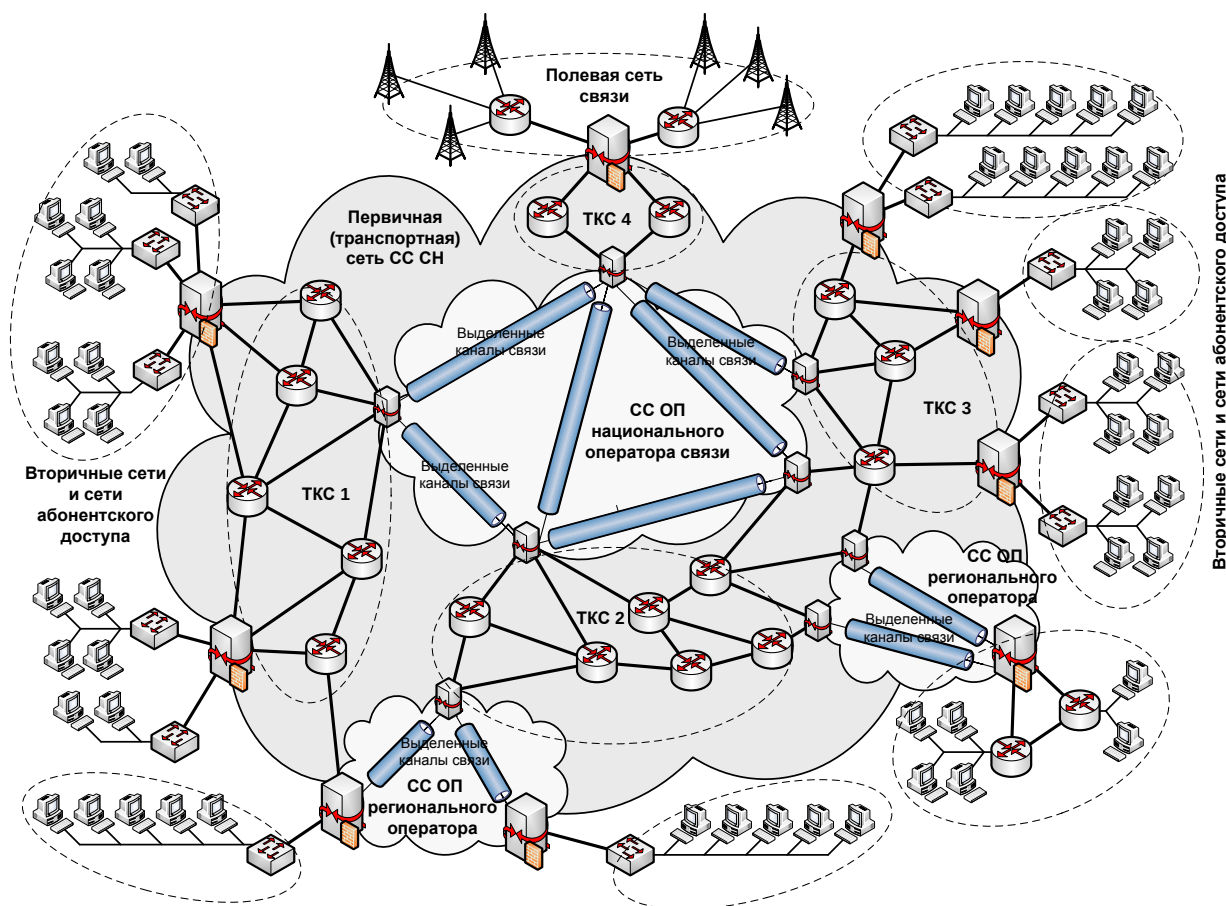


Рис. 7. Обобщенная структурная схема СС СН

4.4. Перспективы построения сетей связи специального назначения в соответствии с концепцией NGN

Анализ работ по глобальным перспективам развития СС СН [8-11, 25-28] позволяет сделать вывод об эволюционном развитии СС СН в направлении перехода к концепции NGN. В частности, в данном направлении эволюционируют СС СН США, в которых приняты концептуальные решения по объединению в единое информационное пространство разнородных сетей и систем связи, с переходом к персонализированным услугам связи для каждого абонента вне зависимости от его географического местонахождения. Обзор основных технологических решений концепции NGN представлен в более ранней работе автора [42], а возможности по использованию концепции NGN для построения СС СН в достаточно полном виде представлены в работе А.Н. Назарова и К.И. Сычева [8].

Базовым принципом построения сети связи следующего поколения является строгое разделение функций переноса и коммутации информационных потоков, управления вызовами и услугами. При этом в соответствии с рекомендацией МСЭ-T Y.2011 базовая архитектура сети NGN может быть представлена четырьмя функциональными уровнями [8]:

- 1) уровня приложений и услуг;
- 2) уровня коммутации услуг;
- 3) уровня транспорта, включающего функции управления сетевыми ресурсами и уровень доступа;
- 4) уровня управления сетью.

Для построения сети NGN необходимо в дальнейшем реализовать каждый из этих уровней в виде соответствующего набора элементов сети NGN (рис. 8). При этом на различных логических уровнях сети могут использоваться различные технологии и протоколы.

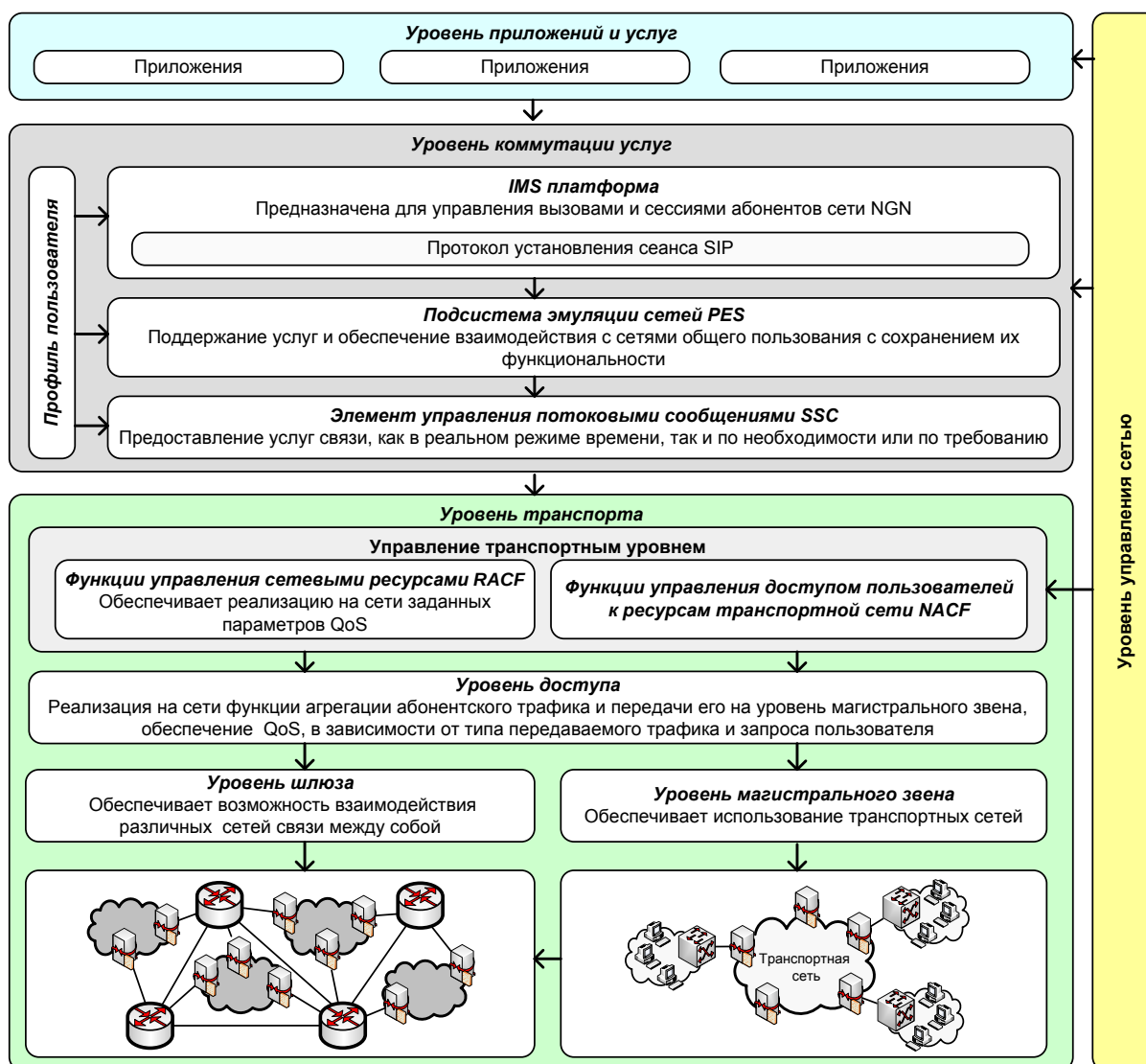


Рис. 8. Схема основных уровней сети NGN [42]

Уровень приложений и услуг содержит функции управления логикой услуг и приложений и представляет собой распределенную вычислительную среду, обеспечивающую следующие потребности [42]:

- предоставление инфокоммуникационных услуг;
- управление услугами;
- создание и внедрение новых услуг;
- взаимодействие различных услуг.

Уровень коммутации услуг позволяет реализовать специфику услуг, и применять одну и ту же логику оказания услуги вне зависимости от типа транспортной сети (IP, ATM, FR и т. п.) и способа доступа. Наличие этого уровня также позволяет вводить в сети любые новые услуги без вмешательства в функционирование других уровней. В основе этого уровня лежит взаимодействие с центральными элементами сети NGN – элементами уровня коммутации (IMS, PES и SSC), которое осуществляется по стандартным интерфейсам ANI (Access Network Interface) для доступа в сеть. Данный уровень может включать множество независимых подсистем («сетей услуг»), базирующихся на различных технологиях, имеющих своих абонентов и использующих свои, внутренние системы адресации [42].

С функциональной точки зрения, данный уровень должен решать основные задачи по установлению соединений и предоставлению услуг в сети NGN. Основными функциями данного уровня являются [42]:

- регистрация пользователей (аутентификация и авторизация) для предоставления им доступа к определенным услугам NGN;
- управление сессиями, вызовами (установление, разрыв и поддержание соединений);
- управление коммутацией и передачей, обработку информации сигнализации, маршрутизация вызовов и управление потоками;
- управление ресурсами сети, включая шлюзы, установленные на транспортном уровне сети NGN.

Транспортный уровень сети NGN обеспечивает функции коммутации и прозрачной передачи информации пользователя. Данные функции образуются двумя подгруппами [42]:

- функции управления сетевыми ресурсами (RACF – Resource and Admission Control Functions), обеспечивающие реализацию в сети заданных параметров QoS. В их задачи входит резервирование требуемых сетевых ресурсов, управление доступом к ресурсам транспортной сети, управление ресурсами шлюзов и т.д.;
- функции управления доступом пользователей к ресурсам транспортной сети NGN (NACF – Network Attachment and Control Functions), осуществляемые на основе информации авторизации пользователей, соглашений об уровне обслуживания SLA, приоритета предоставляемой услуги, а также доступных сетевых ресурсов на транспортной сети и сети доступа.

Транспортный уровень включает в себя ряд функциональных подуровней [42].

- Уровень доступа. Доступ должен предполагать реализацию в сети функции агрегации абонентского трафика и передачи его на уровень магистрального звена. Данный уровень предполагает наличие функций обеспечения QoS, которые зависят от типа передаваемого трафика и запросов пользователя.
- Уровень магистрального звена. Магистральное звено в виде отдельной ТКС должно обеспечивать передачу агрегированного пользовательского трафика в соответствии с требованиями по QoS. На данном уровне применяются те же механизмы по управлению QoS, что и на уровне доступа.
- Уровень шлюза. Данный уровень обеспечивает возможность взаимодействия различных ТКС, построенных на основе различных технологий, а также взаимодействие с другими сетями NGN;

Технологической основой построения транспортного уровня является транспортная сеть NGN, строящаяся в настоящее время на основе технологий коммутации каналов PDH/SDH/OTN и, преимущественно, коммутации пакетов IP, ATM, MPLS. В дальнейшем планируется, что связка протоколов IP/MPLS и технология построения виртуальных сетей VPN будут базовыми для транспортного уровня NGN. Данные технологии способны обеспечивать управление и мониторинг качества всех уровней магистрального звена: сетевого, канального и физического. Это обеспечивает возможность предоставления абонентам сети услуг с заданным качеством.

Уровень управления сетью отвечает за организацию системы управления сетью NGN. В задачи уровня входят мониторинг и управление инфраструктурой и ресурсами сети, поддержание в сети заданных параметров качества, а также ряда параметров, характеризующих работу сети в целом (безопасность и устойчивость) [42].

Система управления должна обеспечивать [42]:

- управление процедурами устранения ошибок и сбоев;
- управление процедурами конфигурации;
- управление автоматизированной системой расчетов;
- управление сетевыми характеристиками;
- управление безопасностью.

Основу сети NGN составляет мультипротокольная ТКС (как правило, на основе ATM, IP, MPLS), которая предоставляет услуги переноса и реализует функции транспортного уровня и уровня управления вызовами. Целью построения транспортной сети NGN является переход от отдельных сетей предыдущего поколения, предназначенных для отдельных групп пользователей или услуг (телефония, данные и др.) к интегрированной сети с гарантированным качеством обслуживания.

В состав интегрированной транспортной сети NGN могут входить [8]:

- 1) транзитные узлы, выполняющие функции переноса и коммутации;
- 2) оконечные и граничные узлы, обеспечивающие доступ абонентов;
- 3) контроллеры сигнализации или контроллеры медиашлюзов (Media Gateway Controller, MGC/Softswitch), выполняющие функции обработ-

ки информации сигнализации, управления вызовами (запросами) и соединениями, а также управления транспортной сетью NGN;

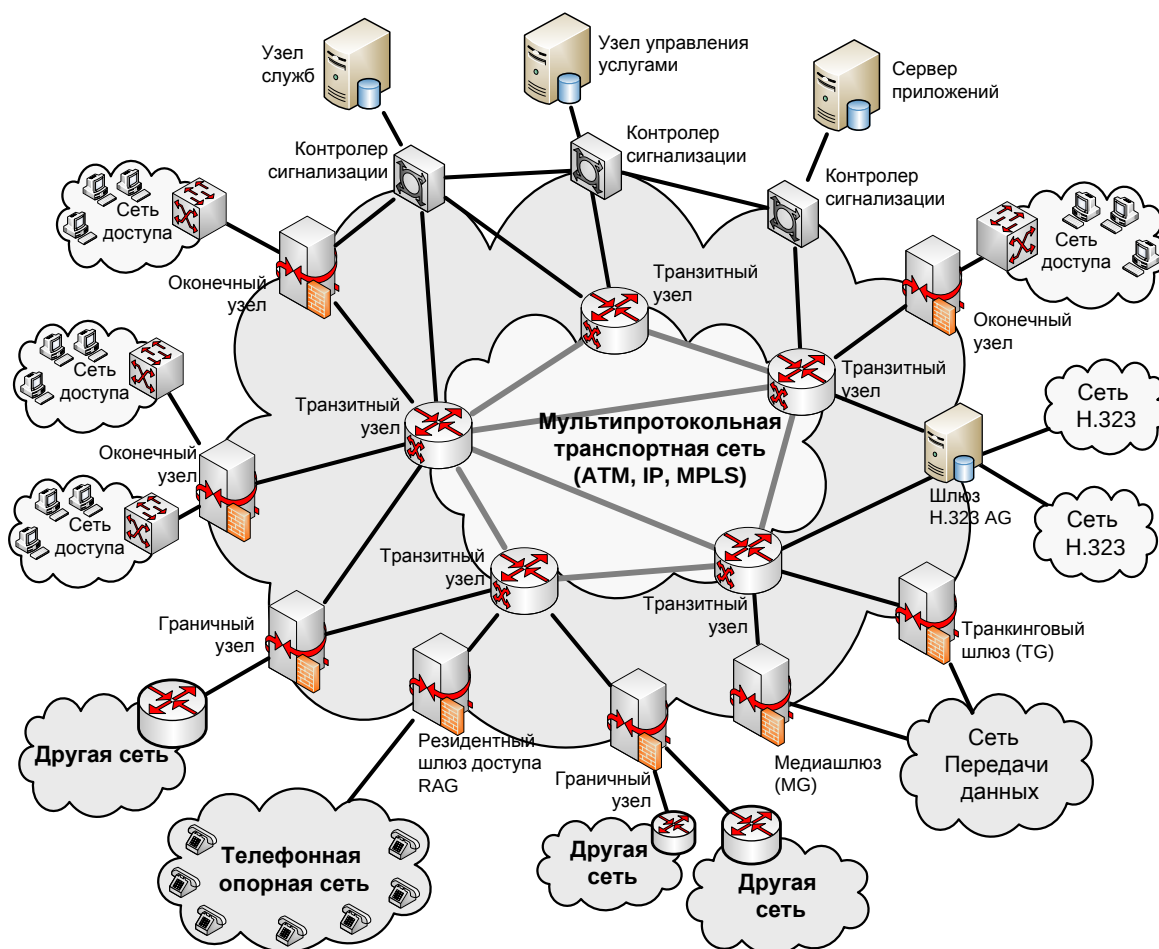


Рис. 9. Мультипротокольная (ATM, IP, MPLS) транспортная сеть NGN [42]

4) шлюзы, осуществляющие подключение сетей связи предыдущих поколений:

- медиашлюз или транспортный шлюз MG (Media Gateway), предназначенный для преобразования речевой информации в IP-пакеты или ATM-ячейки и их маршрутизации;
- сигнальный шлюз SG (Signalling Gateway), предназначенный для преобразования систем межстанционной сигнализации;
- транкинговый шлюз TG (Trunking Gateway), выполняющий функции транспортного и сигнального шлюзов;
- шлюз доступа AG (Access Gateway), выполняющий функции транспортного и сигнального шлюзов при подключении по интерфейсу V.5;
- резидентный шлюз доступа RAG (Residential Access Gateway), предназначенный для подключения пользователей телефонных сетей и сетей ISDN;

5) пограничный контроллер соединений SBC (Session Border Controller), обеспечивающий сопряжение оборудования нескольких производителей и выполняющий функции шлюза сигнализации и медиа-шлюза,

- контроля за установлением соединений САС (Call Admission Control), управления QoS, концентрации голосового и сигнального трафика;
- б) сетевые устройства на основе стандарта H.323 для реализации узкополосных аудио и видео услуг в комбинированных коммутируемых и пакетных сетях:

- шлюз H.323 AG (Access Gateway), предназначенный для преобразования медиа-потокa между коммутируемыми и пакетными сетями;
- шлюз-привратник (Gatekeeper H.323), предназначенный для преобразования адресации (IP, телефонных номеров) между коммутируемыми и пакетными сетями, а также управления полосой пропускания;
- блок многоточечного управления MCU (Multipoint Control Unit), предназначенный для обеспечения соединений «point-to-multipoint», «multipoint-to-multipoint», а также конференцсвязи.

Концепция NGN предполагает создание регионального и магистрального сегментов сети. При этом на региональном уровне должно обеспечиваться подключение пользователей и предоставление им транспортных услуг, а также взаимодействие с аналогичными региональными транспортными сетями. На магистральном уровне должно обеспечиваться предоставление услуг переноса конвергентного трафика для взаимодействия региональных сетей, а также для передачи трафика всех существующих сетей [8].

Модель звена транспортной сети NGN представлена на рис. 9. При этом в данной модели для реализации любых сетевых услуг в ТКС предполагается использование IP-технологии.

При построении сетей NGN обеспечиваются следующие сочетания транспортных технологий [8]:

- IP/ATM/SDH/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/ATM/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/SDH/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/ВОЛС;
- IP/MPLS/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи.

Технология IP
Технологии установления соединений, маршрутизации и обеспечения QoS (MPLS, Int Serv, Diff Serv ...)
Технологии формирования тракта связи (PDH, SDH, OTH, xWDM, ATM, DVB, ...)
Технологии среды передачи

Рис. 10. Модель звена транспортной сети NGN [8]

Для построения сетей NGN нового поколения могут применяться технологии цифровых транспортных иерархий нового поколения OTN/OTH, а также технологии автоматически коммутируемых транспортных сетей ASON/ASTN, которые будут обеспечивать более высокую эффективность использования се-

тевых ресурсов при передаче разнородного трафика. В перспективе построение транспортной сети NGN будет эволюционировать к однородной конвергентной структуре на базе связки протоколов IP/MPLS – концепция «все по IP» (рис. 5). При этом данная транспортная сеть будет включать две плоскости: сетевой и сервисный [8].

Сетевая плоскость включает [8]:

- транспортную сеть IP/MPLS выполняющую функции канального сетевого и транспортных уровней модели OSI;
- пограничный интеллектуальный слой (шлюзы MG, SG, MGC), предназначенный для объединения, преобразования и передачи трафика по IP/MPLS сети;
- уровень доступа.

В свою очередь сервисный домен включает различные платформы приложений (в том числе IMS) и серверы приложений.

Данный подход обеспечит дальнейшее повышение эффективности использования сетевых ресурсов при внедрении NGN за счёт объединения различных ТКС фиксированной и мобильной связи в составе СС СН в единую транспортную сеть IP/MPLS, поддерживающую широкий спектр технологий доступа.

4.5. Перспективы перехода от сетей связи специального назначения к инфокоммуникационным сетям специального назначения

Дальнейшее развитие концепции NGN в практике построения СС СН привело к эволюционной миграции от СС СН к инфокоммуникационным сетям специального назначения. Ключевым в таком переходе является развитие на основе концепции NGN информационных услуг, связанных не только с передачей информации, но и с ее сбором, обработкой, хранением, а также представлением ее пользователям по их запросам. Переход от СС СН на основе NGN к инфокоммуникационным сетям связан с развитием автоматизированных систем управления связью и интеграцией в них существующего задела в области управления ресурсами связи в СС ОП (прежде всего стандартов концепции TMN), виртуализации сетевых и вычислительных ресурсов, а также использование новых технологических решений по обеспечению устойчивости такой сети в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий.

Основные принципы формирования инфокоммуникационных сетей достаточно подробно рассмотрены в работах К.Е. Легкова [16-21] и А.Н. Буренина [20, 21].

Инфокоммуникационная сеть специального назначения (ИКС СН) – информационная система, обеспечивающая предоставление набора как связных, так и информационных услуг с гибкими возможностями по управлению ими и их персонализации, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [17].

Главное отличие ИКС СН от СС СН на основе NGN – это дополнительное предоставление пользователям и техническим средствам помимо связных еще и информационных услуг, связанных со сбором, обработкой, хранением и предоставлением информации пользователям. Предоставление этих услуг унифицировано и осуществляется соответствующими программно-аппаратными комплексами услуг, которые поддерживают широкий спектр ТКС в составе ИКС СН. Тем самым обеспечивается предоставления всем пользователям полного спектра услуг, связанных с как обменом информацией и ее передачей, так и с ее обработкой, хранением и накоплением [17].

Как правило, различные ИКС СН существенно отличаются друг от друга потребностями в ресурсах, объемом, структурой, возможностями, реальной пропускной способностью, а также безопасностью и устойчивостью [17].

Создаваемые в настоящее время ИКС СН следуют концепции NGN. Основой архитектурного построения ИКС СН являются транспортная сеть (как правило, двухуровневая), сети доступа, узлы информационных служб, узлы телекоммуникационных служб и узлы управления услугами [17].

В современных ИКС СН двухуровневая транспортная сеть связи, входящая в их состав, является мультипротокольной, и обеспечивает перенос разных видов информации с использованием различных протоколов передачи (PDH, SDH, ATM, FR, IP/MPLS и др.), т. е. реализует универсальную услугу связи, которая заключается в бесшовной передаче информации пользователей между отдельными ТКС в составе ИКС без какого-либо анализа или обработки ее содержания [17].

Средства ИКС СН помимо услуги связи, предоставляют также информационные услуги, основанные на обработке и анализе информации пользователей. В рамках ИКС СН информационные услуги характеризуются транзакциями, которые осуществляются при запросе/активизации услуги. При этом сервис предоставления информационной услуги основан на том, что соответствующие услуги связи для информационных транзакций оказываются с заданным качеством. Пользователи могут воспользоваться информационными услугами ИКС СН напрямую или с помощью пользовательских приложений. При этом компоненты пользовательских услуг обычно объединяются в пакеты, чтобы создать для конкретного пользователя требуемую сложную услугу или предоставить доступ к нескольким приложениям. Спектр информационных и связных услуг, которые обычно обеспечиваются в рамках современных ИКС СН, достаточно широк. При этом он может динамически меняться вместе с изменением доступных ресурсов [17].

В целом ИКС СН составляет совокупность баз данных, средств обработки информации, взаимодействующих ТКС и множество терминалов пользователей. При этом доступ к информационным ресурсам ИКС СН реализуется посредством услуг нового типа – инфокоммуникационных услуг. Предполагается, что именно они будут преобладать в ИКС СН перспективных систем связи уже в ближайшем будущем [17].

К основным технологическим особенностям, отличающим инфокоммуникационные услуги от услуг связи, можно отнести следующие [17]:

- инфокоммуникационные услуги оказываются на прикладном уровне модели OSI, в то время как услуги связи предыдущего поколения предоставляются на транспортном и сетевом уровнях OSI;
- стандартизация инфокоммуникационных услуг ведется на основе стандарта OSE/RM (Open System Environment / Reference Model) и ISO/IEC TR 14252 которые существенно расширяют и дополняют модель OSI в части детализации прикладного уровня [18];
- большинство инфокоммуникационных услуг предполагает наличие клиентской и серверной частей, где клиентская часть реализуется в оборудовании пользователя, а серверная – на специальном выделенном узле ИКС, называемом узлом служб;
- инфокоммуникационные услуги, как правило, предполагают передачу мультимедийной информации, которая характеризуется высокими скоростями передачи и асимметричностью входящего и исходящего информационных потоков;
- для предоставления инфокоммуникационных услуг зачастую необходимы сложные многоточечные топологические конфигурации сетевых соединений;
- для инфокоммуникационных услуг характерно разнообразие прикладных протоколов и возможностей по управлению услугами со стороны пользователя;
- для идентификации абонентов инфокоммуникационных услуг, как правило, используется дополнительная адресация в рамках данной инфокоммуникационной услуги.

Обобщенная информационная архитектура перспективной ИКС СН представлена на рис. 11.

Особенностью интеграции сервиса оказания информационных услуг пользователя в ИКС СН является то, что существенно возрастает роль систем управления, как услугами, так и сетью. Для реализации функций управления создаются службы NMS (Network Management System), которые обеспечивают оптимальное функционирование сетей, распределенное планирование, управление и контроль сетевых элементов и ресурсов. Функции службы NMS описываются специальной моделью (рекомендации МСЭ-Т серии X.700, стандарт ISO 7498-4), которая определяет функции управления, виды услуг сетевой службы, предоставляемые для управления, структуру управляющей информации и протоколы, определяющие ее транспортировку по сети [19].

В соответствии с моделью ISO 7498-4 управление сетью обеспечивается локальным управлением всеми элементами, входящими в сеть. Модель охватывает следующие основные функции управления [19]:

- базовые протоколы технологии IP;
- маршрутные протоколы;
- протоколы групповой рассылки;
- протоколы повышения надежности маршрутизации;
- протоколы и технологии обеспечения качества обслуживания;
- протоколы обеспечения безопасности.

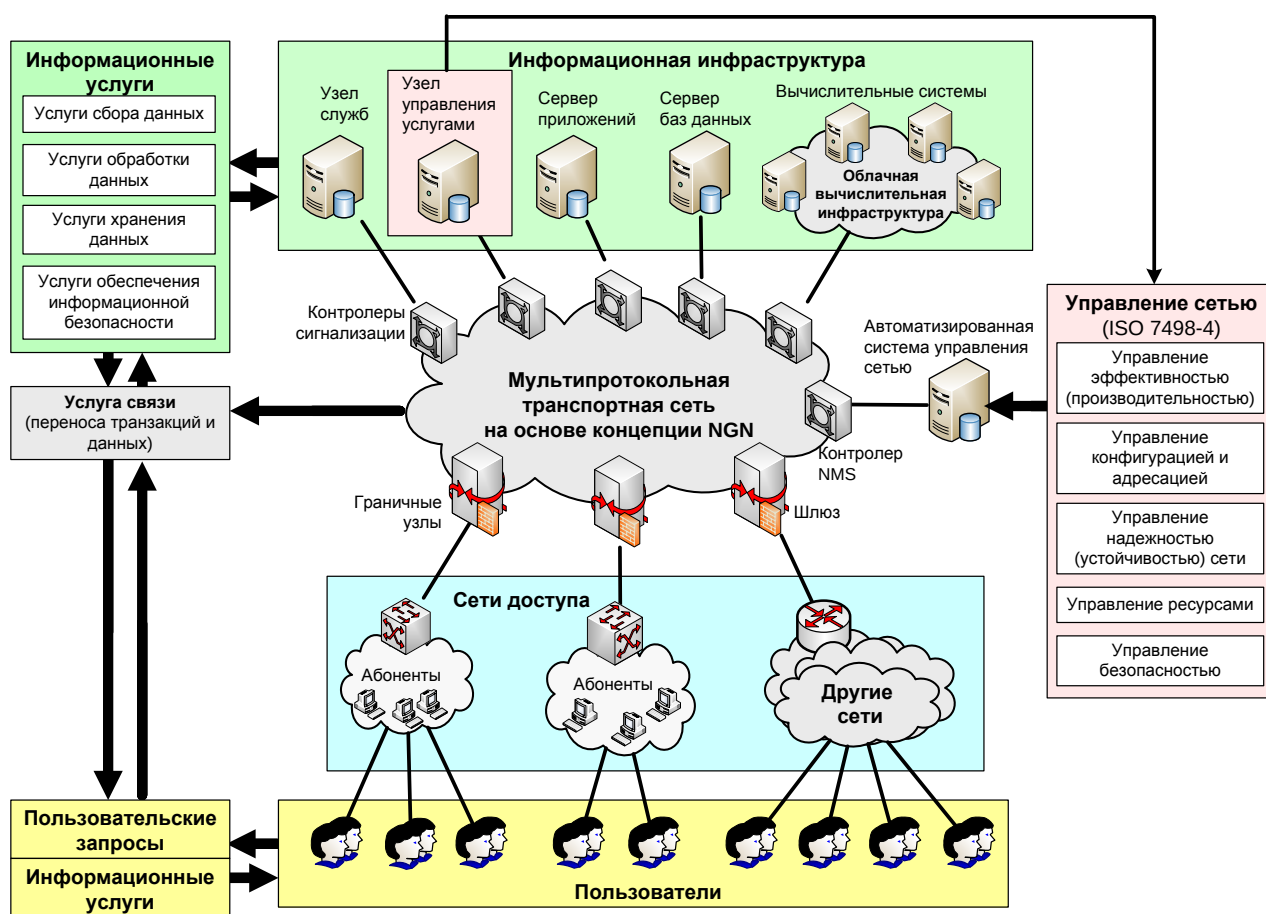


Рис. 11. Обобщенная архитектура перспективной ИКС СН

Подробные сведения о реализации процессов управления в сети в соответствии с моделью ISO 7498-4, а также о современных протоколах мониторинга и управления сетью представлены в работе [19].

Таким образом, наблюдается устойчивая тенденция по все более широкому использованию в сетевом оборудовании СС СН технологий и протоколов из гражданской отрасли связи. Это, с одной стороны, позволяет значительно сократить время и финансовые расходы на разработку и внедрение в СС СН новейших технологий, однако с другой, делает такие СС СН уязвимыми к преднамеренным дестабилизирующим воздействиям, характерным для военного времени.

5. Проблемные вопросы обеспечения эксплуатации и модернизации сетей связи специального назначения

5.1. Проблемные вопросы обеспечения устойчивости сетей связи специального назначения в условиях перехода от технологий коммутации каналов к технологиям коммутации пакетов

Проведенный на основании работ [9-10, 25-28] анализ развития транспортной сети СС СН показал, что модернизация сетей связи, в первую очередь, была направлена на замену устаревших технологий новыми в интересах достижения более высокой пропускной способности и обеспечения абонентам новых

услуг связи. При этом для решения задач повышения пропускной способности транспортной сети используются наработанные подходы и технологии из гражданской сферы связи. Однако при выборе протольно-технологического базиса транспортной сети следует руководствоваться не только необходимостью кардинального повышения пропускной способности и расширения спектра услуг связи, но и специфическими требованиями, предъявляемыми к СС СН, а именно устойчивого функционирования в мирное время, угрожаемый период и военное время. Последнее обуславливает целый ряд дополнительных параметров, вытекающих из необходимости обеспечивать своевременный, скрытный и достоверный обмен информацией между пунктами управления и абонентами СС СН в условиях ведения противником информационной, разведывательно-диверсионной борьбы и РЭБ.

Можно выделить три вида дестабилизирующих воздействий, которые потенциально будут иметь место при функционировании СС СН в угрожаемый период и в военное время:

- 1) информационно-технические воздействия (ИТВ) на узловое телекоммуникационное оборудование и на протоколы связи СС СН;
- 2) воздействия на радиоканалы и радиосети в составе СС СН средствами радиоэлектронного подавления (РЭП), воздействия на узловое оборудование СС СН средствами функционального поражения электромагнитным излучением;
- 3) воздействия на узловое оборудование и проводные линии связи СС СН обычным оружием.

Дестабилизирующие воздействия на объекты физического уровня будут отображаться на сетевом уровне в виде следующих эффектов [3, 24]:

- снижение качества каналов;
- снижение скоростей информационного обмена;
- возникновение одиночных и групповых ошибок приема;
- сбои тактовой синхронизации функционирующего в синхронном режиме оборудования, приводящие к потере данных;
- перерывы в связи;
- сбой или выход из строя телекоммуникационного оборудования сетевых узлов;
- сбой или неправильное функционирование протоколов связи в сети.

Анализ, проведенный в работах [2, 10, 22], показал, что, например, ВС США при построении своей СС СН исходят из того, что в военное время при массированном применении средств РЭП единственным видом связи может остаться передача данных в КВ-диапазоне. Однако информационный обмен по КВ-радиоканалу в режиме пакетной коммутации возможен только с применением протокола AX.25 (так как вероятность ошибки в канале может достигать значений 10^{-3} - 10^{-2} , а в отдельных случаях и $5 \cdot 10^{-2}$). В то время, как стандартные протоколы IP предусматривают работу только по каналам связи среднего качества и выше.

Ранее используемые технологии транспортных сетей, такие как PDH и SDH, так же не способны обеспечить устойчивость связи. Так сети PDH, ввиду

отсутствия возможностей по развитой маршрутизации информационных потоков не способны обеспечить должной оперативности реконфигурации сети. Сети SDH, несмотря на развитый методический аппарат построения устойчивых топологических решений на основе колец и схем резервирования каналов, в результате дестабилизирующего воздействия противника подвержены недопустимо частым сбоям синхронизации, приводящим к непоправимой потере данных.

Недостатки сетей PDH/SDH/OTH следуют из самого принципа их псевдостатического построения, когда все проистекающие в них процессы носят статический характер и фактически не позволяют реконфигурировать транспортную сеть в режиме реального времени. Использование технологии автоматически коммутируемых транспортных сетей ASON/ASTN применительно к существующим сетям PDH/SDH/OTH лишь частично решает вопросы обеспечения структурной устойчивости. По сути технология ASON/ASTN предоставляет только сервис автоматической реконфигурации PDH/SDH/OTH сетей не решая задачи повышения оперативности управления ресурсами сетей.

Однако и пакетные транспортные сети эффективны только при условии, что они поддерживают динамическое равновесие при обеспечении QoS абонентов и приспособляются к быстро изменяющимся условиям. Так, в сетях с использованием пакетных технологий IP/MPLS длительность процессов перемаршрутизации находится в секундном диапазоне [55], что на порядки превышает аналогичные показатели для SDH-сетей, в которых гарантированная длительность переключения на резервную конфигурацию обеспечивается механизмами физического уровня и составляет 50 мс.

Кроме того, сама возможность маршрутизации, порождает специфическую уязвимость пакетных сетей, источником которой является сбой в протоколах маршрутизации [30, 45]. При этом в силу особенностей работы протоколов маршрутизации подобные нарушения могут распространяться по сети лавинообразно. Именно на это обстоятельство обращает внимание в своем отчете [46] Проблемная группа по NGN Консультативного комитета по связи для национальной безопасности при Президенте США. Рекомендация МСЭ-T G.1000 [47] также указывает, что использование сетей и служб на основе IP выдвигает целый ряд проблем, таких, как отсутствие апробированных, надежных и масштабируемых технологий для решения целого ряда задач, в частности, быстрого восстановления связности на сетевом уровне после серьезных сбоев.

Реальным и конкретным примером, показывающим опасность перехода к инфраструктуре на основе IP, является выход из строя значительной части IP сети японского оператора NTT, имевший место 15 мая 2007 г. [49]. При этом от 2 до 4 тыс. маршрутизаторов производства Cisco прекратили работу, и их неработоспособность продолжалась около 7 ч. При этом первопричиной события стало переключение на резервные маршруты, вызвавшее некорректное обновление маршрутных таблиц, что и привело к массовой неработоспособности маршрутизаторов [30].

Еще одной проблемой пакетных сетей является широкий диапазон значений джиттера времени передачи пакетов. Даже если отправитель посылает па-

кеты в сеть через равные интервалы времени, получатель может получать их через промежутки времени, отличающиеся на десятки миллисекунд. Это происходит из-за того, что задержки передачи отдельных пакетов существенно зависят от загруженности маршрутизаторов и каналов связи, от структуры пакетного трафика, а также от длины маршрута, состоящего из разного числа промежуточных приемо-передач. Корректировку джиттера отдельных пакетов, который образуется из-за разности во времени передачи отдельных пакетов по сети, приходится производить в конечном оборудовании данных. При этом сети PDH/SDH/OTN являются детерминированными – задержка распространения сигнала в них мала и постоянна, синхросигнал передается вместе с данными, а на джиттер наложены строгие ограничения, что позволяет добиться передачи информации в режиме времени, близком к реальному. Так для этих сетей изменения задержки должны лежать в пределах от 40 нс до 18 мкс. В то время как в пакетных сетях, в которых данные передаются с использованием таких протоколов как IP и MPLS, изменения задержки передачи пакетов в них могут составлять десятки миллисекунд [10].

В работе [10] указывается, что проблема джиттера пакетов якобы решается путем использования технологий CES (Circuit emulation service) для передачи потоков E1, E3 и STM-1 через пакетные сети при сохранении высоких требований к синхронизации. Технология CES основана на алгоритмах адаптации и инкапсуляции трафика сетей PDH и SDH в пакеты и последующей его передачи через пакетную сеть (технология TDMoIP или TDMoP). Однако технология CES, решая проблемы обеспечения передачи потоков PDH и SDH, а также обеспечивая синхронизацию этих сетей через пакетные сети, не гарантирует постоянный уровень джиттера передачи пакетов, в которые инкапсулируются потоки E1, E3 и STM-1.

Проблемой пакетных сетей также являются гигантские пульсации трафика. Если коэффициент пульсации телефонного трафика имеет значения от 5 до 15, то при передаче данных данный коэффициент составляет значения сотни тысяч [43]. Однако технологии PDH/SDH/OTN в моменты роста трафика вообще не способны динамически предоставить большую полосу пропускания, а в моменты спада не в состоянии использовать свободную полосу.

5.2. Проблемные вопросы обеспечения устойчивости сетей связи специального назначения в условиях внедрения концепции NGN

Одной из основных проблем при построении СС СН в соответствии с концепцией NGN является устойчивость сетевой инфраструктуры. При этом, как отмечается в работе [30], обеспечение устойчивости в сетях NGN является более сложной задачей, чем обеспечение устойчивости сетей предыдущего поколения, основанных на коммутации пакетов или каналов.

Во-первых, в основе сетей NGN лежат IP-сети. В связи с этим все проблемные вопросы, связанные с недостаточно быстрым восстановлением этих сетей, рассмотренные выше, являются актуальными и для сетей NGN.

Во-вторых, для сетей предыдущего поколения, основанных на коммутации каналов, основной нормируемой составляющей надежности является го-

товность узла, требование к которой задавалось в виде $K_T=0,99999$ [44]. При переходе к NGN вместо традиционного узла коммутации используется гибкий коммутатор (Softswitch). Возникает комплекс из большого числа отдельных устройств (контроллеров, шлюзов, серверов). Все они имеют высокую надежность: значение коэффициента готовности каждого из них, как обычно заявляют производители, составляет все те же «пять девяток». Однако для выполнения функций узла коммутации необходима совместная работа нескольких таких устройств, поэтому результирующая надежность будет равняться произведению их коэффициентов готовности, т. е. в итоге она оказывается более низкой [30].

В-третьих, еще более важным фактором, негативно влияющим на надежность сетей NGN, является централизация управления процессами обслуживания вызовов. Критическим элементом сети NGN становится контроллер шлюзов или сервер вызовов (Softswitch в узком понимании этого термина). При этом один такой контроллер или сервер управляет многими шлюзами, поэтому его отказ может привести к прекращению работы сети на большой территории. Подобная ситуация негативно влияет на устойчивость сети. Неслучайно ведущие производители оборудования NGN предусматривают возможность резервирования контроллеров шлюзов, в том числе с географическим разнесением. Однако многие операторы связи подобное резервирование при проектировании своих сетей не используют из соображений экономии [30].

5.3. Проблемные вопросы управления сетью связи специального назначения в условиях внедрения концепции NGN

Вышеуказанные проблемы обеспечения устойчивости СС СН в условиях дестабилизирующих воздействий при ограничениях на качество обслуживания специальных абонентов предъявляют жесткие требования к системе управления связью. Несмотря на то, что концепция NGN предусматривает стандартные подходы к управлению услугами и средствами связи, она не рассматривает условия перманентных дестабилизирующих воздействий как повседневные условия функционирования сети. Таким образом, переход СС СН к концепции NGN требует существенной доработки принципов и подходов NGN в части управления связью применительно к СС СН. Исследование этой тематики проводилось в работах К.Е. Легкова [16-21], А.Н. Буренина [20, 21], Н.А. Соколова [29], А.Е. Давыдова [31].

Система управления связью является важнейшей подсистемой СС СН. В настоящее время практически во всех современных СС СН и СС ОП развитых стран развернуты центры управления связью с той или иной степенью автоматизации, выполняющие необходимые функции, связанные с мониторингом, контролем состояния и изменением конфигурации удаленных сетевых устройств. Большинство этих систем управления строится по иерархическому принципу, позволяющему обеспечивать более гибкое, эффективное и оперативное управление за счет сегментирования СС СН на более мелкие элементы – региональные и местные сети, а также отдельные ТКС. При этом разработка систем централизованного управления связью является довольно сложной

наукоемкой задачей, в рамках которой необходимо объединить разнотипное оборудование различных производителей, которое имеет различный функционал, принципы и возможности управления [31].

Надо отметить, что в этом смысле задачи управления, решаемые в СС СН и в СС ОП, идентичны и в равной степени актуальны. Однако существенные различия в подходах и методах решения задач управления проявляются в уровне наблюдаемости, управляемости, а также в своевременности принятия решений применительно к СС СН. Это обусловлено большим количеством специфичных требований, предъявляемых к СС СН, по сравнению с СС ОП, таких как: устойчивость, боевая готовность, мобильность, управляемость, разведзащищенность и др. Степень выполнения этих специфичных требований зависит от подходов к управлению связью, и, что самое главное, эти требования предъявляют крайне жесткие требования к оперативности управления [31].

Оперативность управления определяет время реакции системы связи на различные виды изменений, вносимые в состав, конфигурацию или режимы функционирования СС СН. В свою очередь характеристики оперативности управления во многом определяются, с одной стороны, уровнем автоматизации процессов управления связью, а с другой – самими принципами организации управления, закладываемыми при разработке телекоммуникационного оборудования [31].

Так, недостаточный уровень автоматизации процессов управления некоторых СС СН уже сегодня стал их ключевой проблемой, решить которую можно только путем перехода от повсеместно применяемого принципа управления отдельно взятым сетевым элементом, предложенного ведущими производителями телекоммуникационного оборудования, к принципу единого сетевого управления, которая рассматривает СС СН как совокупность различных сетевых ресурсов. Такое изменение принципов управления обусловлено не только необходимостью выполнения жестких требований по оперативности управления и автоматизацией связных процессов, но и изменениями самих телекоммуникационных технологий [31].

В большинстве работ под управлением связью понимается настройка оборудования первичной сети с последующим наложением на транспортную сеть различного рода услуг связи. В условиях, когда перечень услуг исчисляется единицами, такой подход подразумевал лишь выделение абоненту номерной емкости и определенного сетевого ресурса. При переходе СС СН к концепции NGN резко увеличивается номенклатура предоставляемых услуг связи и их персонализация. В результате ведущее значение приобретает не настройка отдельных средств связи, а именно персонализация услуг, в зависимости от которых формируется сначала телекоммуникационная инфраструктура СС СН, а затем на ее основе формируется единый пул сетевых ресурсов, который должен использоваться с высокой эффективностью, а также с учетом условий дестабилизирующего воздействия на элементы телекоммуникационной инфраструктуры [31].

Вместе с тем, использование в составе СС СН сегментов СС ОП и коммерческого оборудования связи не позволяет в полной мере реализовать ука-

занные подходы к управлению связью. Разработчики СС СН вынуждены использовать подходы к управлению, принятые ведущим производителями коммерческого сетевого оборудования, ввиду их широкого использования в составе СС СН. В основу управления коммерческим сетевым оборудованием, согласно современным стандартам по NMS, среди прочего включается [19]:

- управление неисправностями;
- управление конфигурацией;
- управление ресурсами.

Как правило, эти функции управления реализуются в отношении одного или группы однотипных устройств в соответствии с моделью «агент – сервер». При этом управление осуществляется с помощью ввода соответствующих команд вручную или с помощью графического интерфейса пользователя и предполагает наличие сервисной инженерной службы, которая в случае отказа или сбоя средства связи диагностирует и конфигурирует его удаленно [31].

Условия функционирования СС СН характеризуются динамическим воздействием преднамеренных дестабилизирующих факторов, выходом из строя элементов СС СН из-за их огневого или радиоэлектронного поражения, динамическим переходом на дополнительные каналы связи, подключением дополнительных сетевых ресурсов в условиях блокировки имеющимися средствами ИТВ. Такие условия функционирования вступают в противоречие с поэлементным автоматизированным управлением СС СН. В таких условиях никакая сервисная инженерная служба не сможет обеспечить требуемый уровень оперативности и эффективности управления. То есть такой подход противоречит современным требованиям к управлению, так как [31]:

- не отвечает требованиям управляемости, оперативности управления, мобильности и боевой готовности;
- требует содержания многочисленной сервисной инженерной службы;
- не отвечает критериям обеспечения информационной безопасности (так как возможен радиоэлектронный и информационный доступ противника к элементам контролируемой зоны СС СН);
- «размывает» функционал и зоны ответственности при предоставлении услуг связи специализированным абонентам (оператор СС СН должен осуществлять полное наблюдение и управление сетью, в то время как сегменты СС ОП в составе СС СН оказываются ограниченно наблюдаемыми и недоступными для управления).

Одним из путей решения задачи создания автоматической системы управления связью СС СН, предложенным в работе [31], является создание единой базы сетевых ресурсов СС СН и автоматической системы управления этими ресурсами. При этом подразумевается, что база сетевых ресурсов и система управления ими будет размещаться в доверенной зоне СС СН и частично реплицироваться в территориальные центры управления отдельных ТКС. Единая база сетевых ресурсов будет содержать агрегированную информацию обо всех сетевых элементах и их конфигурации, в том числе [31]:

- сетевые адреса и параметры;

- профили безопасности и межсетевых экранов (на основе политики безопасности как для уровня должностных лиц, так и для устройств и сетей);
- параметры протоколов обеспечения качества обслуживания, приоритетной обработки трафика и выделения полос пропускания;
- параметры протоколов маршрутизации и протоколов обеспечения функционирования виртуальных наложенных сетей;
- временные параметры и критерии блокировки и разблокировки пользователей, устройств и сетей;
- частоты и режимы работы радиосредств;
- документацию под соответствующую конфигурацию сети и др.

Создание такой базы сетевых ресурсов является одной из подзадач управления связью и осуществляется либо заранее, либо в режиме реального времени при наличии автоматической системы управления связью. Впоследствии каждый сетевой элемент СС СН получает только необходимую ему информацию. При таком централизованном подходе к управлению СС СН конфигурации всех сетевых элементов будут семантически согласованы и централизованно оттестированы на корректность введения тех или иных настроек во избежание конфликтных ситуаций и ошибок, связанных с человеческим фактором, целенаправленными действиями внутреннего нарушителя и др. [31].

Таким образом, задача разработки системы управления связью для СС СН является актуальной научной и технической задачей. При этом, принципы и технологии управления, используемые для СС ОП не приемлемы для управления СС СН ввиду того, что последние функционируют в условиях перманентных дестабилизирующих воздействий. Одним из вариантов решения задачи управления СС СН является создание единой базы сетевых ресурсов СС СН и автоматической системы управления этими ресурсами.

Выводы

СС СН – это сеть связи, функционирующая в интересах государственной и военной систем управления. В условиях перехода этих систем управления к сетевым принципам построения для СС СН становятся характерны следующие основные тенденции по ее технологическому построению:

- переход от иерархического принципа построения СС СН к децентрализованной сетевой структуре, которая в большей степени соответствует современным требованиям к системам государственного и военного управления, а также условиям ведения боевых действий, характеризующимся высокой динамикой развития и мобильностью ее участников;
- отказ от построения СС СН на основе отдельной связной инфраструктуры и переход к построению СС СН на основе гибридного подхода, когда отдельные сегменты СС ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН;

- отказ от использования в СС СН закрытых и специализированных протоколов связи и максимальное широкое использование для построения элементов СС СН коммерческих протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций.

Использование в качестве сегментов СС СН арендуемых каналов и сетей СС ОП, а также массовое использование в СС СН коммерческих протоколов связи делает СС СН уязвимой к атакам средств РЭП и ИТВ. Эти атаки (особенно атаки ИТВ) могут проводиться на СС СН через сетевые сегменты общие с СС ОП, так как СС ОП, как правило, подключены к глобальной информационно-телекоммуникационной сети Интернет. При этом среди коммерческих сетевых протоколов, которые широко используются в СС СН, не отработаны механизмы защиты от воздействий ИТВ и РЭП, а также механизмы быстрого восстановления после сбоев.

Одним из актуальных направлений снижения негативных эффектов от внедрения в состав СС СН элементов СС ОП и массового использования в СС СН коммерческих протоколов связи может быть создание высокоэффективной централизованной автоматической системы управления сетевыми ресурсами СС СН. Наличие такой системы управления позволит предотвратить ряд негативных эффектов при функционировании СС СН в условиях воздействия перманентных дестабилизирующих факторов, за счет оперативного управления сетевыми ресурсами СС СН.

Литература

1. Барашков П. Н., Родимов А. П., Ткаченко К. А., Чуднов А. М. Модель системы связи с управляемыми структурами в конфликтных условиях. – Л.: ВАС, 1986. – 52 с.
2. Лялюк И. Н. С4I: системы связи, АСУ и разведки вооруженных сил США. – М.: ВАТУ, 2000.
3. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
4. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
5. Будко П. А., Чихачев А. В., Баринов М. А., Винограденко А. М. Принципы организации и планирования сильносвязной телекоммуникационной среды сил специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 8-12.
6. Линец Г. И. Системные аспекты теории синтеза и практика построения телекоммуникационных сетей. – Ставрополь: Альфа-Принт, 2010. – 460 с.
7. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. – 34 с.
8. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых

параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.

9. Давыдов А. Е., Хейстонен Д. П. Построение модели системы управления телекоммуникационной сетью специального назначения // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 2. С. 124-130.

10. Давыдов А. Е. Концептуальные подходы к построению адаптивных мультисервисных сетей специального назначения // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 10.12.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya/ (дата обращения 08.06.2017).

11. Сухотеплый А. П., Давыдов А. Е., Савицкий О. К., Лукьянчик В. Н. К вопросу создания стационарной компоненты наземного эшелона ОАЦСС ВС РФ на территории РФ и сопредельных государств в условиях сетецентрических войн // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 10.12.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/k_voprosu_sozdaniya_stacionarnoj_komponenty_nazemnogo_eshelona_oacss_vs_rf_na_territorii_rf_i_sopredelnyh_gosudarstv_v_usloviyah/ (дата обращения 08.06.2017).

12. Лебедев С. Ф., Сызранцев Г. В., Добровольский В. С., Лукин К. И., Даниленко А. Н. Базовые положения методики формирования (построения) рационального варианта автоматической полевой сети связи общего пользования специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 1-2. С. 79-84.

13. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Даниленко А. Н. Модель функционирования автоматической сети связи общего пользования полевой системы связи специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 1-2. С. 85-93.

14. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Шмелев А. А., Неверов А. П. Модель функционирования автоматической первичной сети связи высокودинамичной системы связи специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 11-12. С. 65-69.

15. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Лебедев С. Ф. Автоматическая первичная сеть связи на телекоммуникационном оборудовании технологий NGPDH и NGSDH // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 3-4. С. 63-69.

16. Легков К. Е. Многоуровневые модели инфокоммуникационных сетей специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 12. С. 32-36.

17. Легков К. Е. Организация и модели функционирования современных инфокоммуникационных сетей специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 8. С. 14-20.

18. Легков К. Е., Мясникова А. И. Управление инфокоммуникационными услугами в мультисервисных сетях специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2012. № 3. С. 20-22.
19. Легков К. Е., Емельянов А. В. Концепция управления сетями в модели взаимодействия открытых систем // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 3. С. 83-92.
20. Буренин А. Н., Легков К. Е. Особенности архитектур, функционирования, мониторинга и управления полевыми компонентами современных инфокоммуникационных сетей специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2013. № 3. С. 12-17.
21. Буренин А. Н., Легков К. Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения управления. – М.: Медиа паблишер, 2015. – 348 с.
22. Исаков Е. Е. Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 400 с.
23. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.
24. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3 (48). С. 93-101.
25. Шнепс-Шнеппе М.А. «Красный телефон» на DISN сети как родимое пятно в среде AS-SIP // International Journal of Open Information Technologies. 2015. Т. 3. № 6. С. 7-12.
26. Шнепс-Шнеппе М. А., Намиот Д. Е. Об эволюции телекоммуникационных сервисов на примере GIG // International Journal of Open Information Technologies. 2015. Т. 3. № 1. С. 1-13.
27. Шнепс-Шнеппе М. А. От IN к IMS. О сетях связи военного назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 1. С. 1-11.
28. Шнепс-Шнеппе М. А., Намиот Д. Е, Цикунов Ю. В. Телекоммуникации для военных нужд: сеть GIG-3 по требованиям кибервойны // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 10. С. 3-13.
29. Соколов Н. А. Системные аспекты построения и развития сетей электросвязи специального назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 9. С. 4-8.
30. Нетес В. А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN // Вестник связи. 2007. № 9. С. 1-8.
31. Давыдов А. Е. Концептуальные подходы к построению автоматизированной системы управления связью адаптивных мультисервисных сетей специального назначения // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 12.11.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/conceptual_approaches_to_construct

ing_an_automated_control_system_for_adaptive_multi-service_special-purpose_networks/ (дата обращения 08.06.2017).

32. О связи. Федеральный закон РФ от 07.07.2003 № 126-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации от 14 июля 2003 г. № 28 ст. 2895.

33. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.

34. Макаренко С. И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 352 с.

35. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. Учебник. Часть 1. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения / Под ред. С.М. Одоевского. – СПб.: ВАС, 2010. – 432 с.

36. Коробицин А. А., Кудрявцев А. М., Смирнов А. А. Информационные и сетевые технологии в автоматизированных системах специального назначения: Учебное пособие. – СПб.: ВАС, 2015. – 132 с.

37. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005. Информационная технология. Практические правила управления информационной безопасностью. Национальный стандарт РФ. – М., 2007.

38. Макаренко С. И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161-213. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/09-Makarenko.pdf> (дата обращения 07.06.2017).

39. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.053-2005. Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации. – М., 2006.

40. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М., 2009.

41. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63-78.

42. Макаренко С. И., Чаленко Н. Н., Крылов А. Г. Сети следующего поколения NGN // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 81-102. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/05-Makarenko.pdf> (дата обращения 07.06.2017).

43. Кархов А. SDH не умрет, но уже никогда не будет приоритетом. Интервью с директором по перспективному развитию сети Comstar United Telesystems // Connect! Мир связи. 2006. № 6. – URL: <http://www.connect.ru/article.asp?id=4943> (дата обращения 09.06.2017).

44. Гольдштейн Б. С. 10 лет эволюции коммутационной техники // Вестник связи. 2007. № 5. С. 1-6.

45. Norros I. A broad approach to the dependability of IP networks // European CUP Newsletter. 2006. Vol. 2. № 3.
46. Next Generation Networks Task Force Report // The President's National Security Telecommunications Advisory Committee. 2006.
47. ITU-T Recommendation G.1000 (11/2001). Communications Quality of Service: A framework and definitions. 2001.
48. Об информации, информационных технологиях и о защите информации. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ // Собрание законодательства РФ, 31.07.2006, № 31 (1 ч.), ст. 3448.
49. Duffy J. Cisco routers caused major outage in Japan: report // Network World. 16.05.2007.
50. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
51. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / По ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова, И.П. Иванова, С.В. Дворянкина, А.В. Куц, А.В. Квитко, П.А. Важева, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. 156 с. – URL: www.informost.ru (дата обращения 03.02.2015).
52. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. 216 с. URL: www.informost.ru (дата обращения 03.02.2015).
53. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.
54. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями войск (сил) [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 16-20.
55. Макаренко С. И., Афанасьев О. В., Баранов И. А., Самофалов Д. В. Экспериментальные исследования реакции сети связи и эффектов перемаршрутизации информационных потоков в условиях динамического изменения сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 4. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/4/text.pdf> (дата обращения 09.06.2017).
56. Паршин С., Кожанов Ю. Современные тенденции в совершенствовании системы управления вооруженными силами ведущих зарубежных стран в информационную эпоху // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 7. С. 3-9.

57. Янов О., Ширяев В. Участие Министерства обороны США в федеральной программе создания «Среды совместного использования информации» // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 12. С. 15-21.

58. Гаврилов А. Автоматизированная система сбора, обработки и распределения разведывательной информации СВ США DCGS-A // Зарубежное военное обозрение. 2010. № 7. С. 32-40.

59. Военная сеть США будет построена на маршрутизаторах Juniper Networks // Poplar Systems [Электронный ресурс]. 13.01.2004. – URL: <http://www.poplar.ru/view.php3?cls=news&vguid=1256&guid=1256&parent=1255> (дата обращения 13.06.2015).

60. Кобозев Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. М.: ОАО «Концерн «Созвездие», 2013. С. 7-9.

References

1. Barashkov P. N., Rodimov A. P., Tkachenko K. A., Chudnov A. M. *Model' sistemy sviazi s upravliaemyimi strukturami v konfliktnykh usloviakh* [Model of communication system with controlled structures in conflict settings]. Leningrad, Military Communications Academy, 1986. 52 p. (in Russian).

2. Lialiuk I. N. *C4I: sistemy sviazi, ASU i razvedki vooruzhennykh sil SShA* [C4I: communications systems, automation and intelligence of the armed forces of the United States.]. Moscow, Military aviation technical University, 2000. (in Russian).

3. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoi sviazi i metody ee otsenki* [The effectiveness of military communications systems and assessment methods]. Saint-Petersburg, Military Communications Academy, 2006. 183 p. (in Russian).

4. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevij sintez informacionno-telekommunikacionnykh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizatsii* [Multi-Level Synthesis of Information Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization. Treatise]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011. 476 p. (in Russian).

5. Budko P. A., Chikhachev A. V., Barinov M. A., Vinogradenko A. M. Principles of the organization and planning of strongly connected telecommunication environment of forces of a special purpose. *T-Comm*, 2013, vol. 7, no. 6, pp. 8-12 (in Russian).

6. Linets G. I. *Sistemnye aspekty teorii sinteza i praktika postroeniia telekommunikatsionnykh setei* [System aspects of the theory of fusion and practice the design of telecommunication networks]. Stavropol, Alfa-Print Publ., 2010. 460 p. (in Russian).

7. Linec G. I. *Metody strukturno-parametricheskogo sinteza, identifikacii i upravlenija transportnymi telekommunikacionnymi setjain dlja dostizhenija maksimal'noj proizvoditel'nosti*. Diss. dokt. tehn. nauk [The Methods of Structural Parametric Synthesis, Identification and Control of Transport Telecommunication Networks for Achievement of the Maximum Productivity. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Stavropol, Northern-Caucasus State University, 2013. 34 p. (In Russian).

8. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevyh parametrov setej svjazi sledujushhego pokoleniya* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (In Russian).

9. Davydov A. E., Heystonen D. P. Building the model for controls of a special-purpose telecommunication network. *Questions of radio-electronics*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 124-130.

10. Davydov A. E. Conceptual approaches to constructing adaptive multi-service special-purpose networks. *Research Institute 'Masshtab'*. 10.12.2012. Available at: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).

11. Suhoteply A. P., Davydov A. E., Savicky O. K., Luk'yanchik V. N. Fixed component of ground echelon of the integrated automatic digital communications network of the armed forces of the Russia and neighbouring states under the conditions of network-centric wars. *Research Institute 'Masshtab'*. 10.12.2012. Available at: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/k_voprosu_sozdaniya_stacionarnoj_komponenty_nazemnogo_eshelona_oacss_vs_rf_na_territorii_rf_i_sopredelnyh_gosu_darstv_v_usloviyah/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).

12. Lebedev S. F., Syzrantsev G. V., Dobrovol'skii V. S., Lukin K. I., Danilenko A. N. Bazovye polozheniia metodiki formirovaniia (postroeniia) ratsional'nogo varianta avtomaticheskoi polevoi seti sviazi obshchego pol'zovaniia spetsial'nogo naznacheniiia [The basic provisions of a technique of forming (constructing) a reasonable option for automatic field communications network for General use special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 1-2, pp. 79-84 (in Russian).

13. Syzrantsev G. V., Lukin K. I., Inshin G. V., Danilenko A. N. Model funktsionirovaniia avtomaticheskoi seti sviazi obshchego pol'zovaniia polevoi sistemy sviazi spetsial'nogo naznacheniiia [The model of functioning of the automated communication network of General use field communication systems of special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 1-2, pp. 85-93 (in Russian).

14. Syzrantsev G. V., Lukin K. I., Inshin G. V., Shmelev A. A., Neverov A. P. Model funktsionirovaniia avtomaticheskoi pervichnoi seti sviazi vysokodinamichnoi

sistemy svyazi spetsial'nogo naznacheniiia [The model of functioning of the automated primary communications network with highly dynamic communication systems of special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 11-12, pp. 65-69 (in Russian).

15. Sizranchev G., Lukin K., Inshin G., Lebedev S. Automatic primary communication net on telecommunication equipment NGPDH NGSDH technology. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2013, no. 3-4, pp. 63-69 (in Russian).

16. Legkov K. E. A layered model of the special puprose infocommunication networks. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no.12, pp. 32-36 (in Russian).

17. Legkov K. E. Organization and models of functioning modern infocommunication networks of a special purpose. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no. 8, pp. 14-20 (in Russian).

18. Legkov K. E., Myasnikova A. I. Control of the infocom-munication services on special purpose multiservice networks. *High tech in Earth space research*, 2012, no. 3, pp. 20-22 (in Russian).

19. Legkov K. E., Emelianov A. V. Kontseptsiiia upravleniia setiami v modeli vzaimodeistviia otkrytykh sistem [The concept of governance networks in the model of open systems interconnection]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2015, no. 3, pp. 83-92 (in Russian).

20. Burenin A. N. Legkov K. E. Features of architecture, functioning, monitoring and control of field components of the modern infocommunication networks of the special purpose. *High tech in Earth space research*, 2013, no. 3, pp. 12-17 (in Russian).

21. Burenin A. N., Legkov K. E. *Sovremennnye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniiia. Osnovy postroeniia upravleniia* [Modern infocommunication systems and networks for special purposes. Fundamentals of management]. Moscow, Media Publisher, 2015. 348 p. (in Russian).

22. Isakov E. E. *Ustoichivost' voennoi svyazi v usloviakh informatsionnogo protivoborstva* [The stability of military communications in the conditions of information warfare]. Saint-Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 2009. 400 p. (in Russian).

23. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei svyazi spetsial'nogo naznacheniiia. Monografiia* [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p. (in Russian).

24. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mihaylov R. L., Ushanev K. V. New means of destructive effects on network centric military command, control and communication systems in the information space. *Vestnik Akademii voennykh nauk*. 2014, vol. 48, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).

25. Shneps-Shneppe M. A. «Krasnyi telefon» na DISN seti kak rodimoe piatno v srede AS-SIP [The "red phone" on DISN network as a birthmark in the environment AS-SIP]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, vol. 3, no. 6, pp. 7-12 (in Russian).

26. Shneps-Shneppe M. A., Namiot D. E. Ob evoliutsii telekommunikatsionnykh servisov na primere GIG [The evolution of telecommunication services on an example GIG]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1-13 (in Russian).
27. Shneps-Shneppe M. A. Ot IN k IMS. O setiakh svyazi voennogo naznacheniiia [About communication networks for military purposes]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1-11 (in Russian).
28. Shneps-Shneppe M. A., Namiot D. E, Tsikunov Iu. V. Telekommunikatsii dlia voennykh nuzhd: set' GIG-3 po trebovaniyam kibervoiny [Telecommunications for military purposes: the network is GIG-3 according to the requirements of cyberwar]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 10, pp. 3-13 (in Russian).
29. Sokolov N. A. Sistemnye aspekty postroeniia i razvitiia setei elektrosvyazi spetsial'nogo naznacheniiia [The system aspects of the construction and development of telecommunication networks of special purpose]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 9, pp. 4-8 (in Russian).
30. Netes V. A. Nadezhnost' setei svyazi v period perekhoda k NGN [Reliability of communication networks in the period of transition to NGN]. *Vestnik svyazi*, 2007, no. 9, pp. 1-8 (in Russian).
31. Davydov A. E. Conceptual approaches to constructing an automated control system for adaptive multi-service special-purpose networks. *Research Institute 'Masshtab'*. 12.11.2012. Available at: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/conceptual_approaches_to_constructing_an_automated_control_system_for_adaptive_multi-service_special-purpose_networks/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).
32. O svyazi [About the connection]. Federal law of Russia. 2003. (in Russian).
33. Makarenko S. I., Fedoseev V. E. *Multichannel communication systems. Secondary networks and subscriber access networks*. Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2014, 179 p. (in Russian).
34. Makarenko S. I. *Computer systems, networks and telecommunication*. Stavropol, Sholokhov Moscow State University for the Humanities (Stavropol Branch) Publ., 2008, 352 p. (in Russian).
35. Odoevskiy S. M. *Novye informatsionnye i setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia. Chast 1. Novye setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia* [New information and network technologies in control systems for military use. Part 1. New networking technologies in control systems for military use]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2010. 432 p. (in Russian).
36. Korobitsin A. A., Kudriavtsev A. M., Smirnov A. A. *Informatsionnye i setevye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Information and network technology in automated systems special purpose]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2015. 132 p. (in Russian).
37. ISO/IEC 17799-2000. Information technology. Code of practice for security management. 2000.

38. Makarenko S. I. Information-Space Systems and Space Weapons – Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 161-213. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/09-Makarenko.pdf> (accessed 7 June 2017) (in Russian).

39. Recommendations for standardization R 50.1.053-2005. Information technologies. Basic terms and definitions in scope of technical protection of information. Moscow, 2006.

40. GOST R 53111-2008. Stability of functioning of the public communications network. Requirements and check methods. Moscow, 2009. (in Russian).

41. Popkov V. K., Blukke V. P., Dvorkin A. B. Modeli analiza ustoichivosti i zhivuchesti informatsionnykh setei [Model analysis the sustainability and survivability of information networks]. *Problems of informatics*, 2009, no. 4, pp. 63-78 (in Russian).

42. Makarenko S. I., Chalenko N. N., Krylov A. G. Next Generation Networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 1, pp. 81-102. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/05-Makarenko.pdf> (accessed 7 June 2017) (in Russian).

43. Karkhov A. SDH ne umret, no uzhe nikogda ne budet prioritom [SDH will not die, but will never be a priority]. *Connect!* 2006, no. 6. Available at: <http://www.connect.ru/article.asp?id=4943> (accessed 9 June 2017) (in Russian).

44. Goldshtein B. S. 10 let evoliutsii kommutatsionnoi tekhniki [10 years of evolution of the switching technology]. *Vestnik sviazi*, 2007, no. 5, pp. 1-6 (in Russian).

45. Norros I. A broad approach to the dependability of IP networks. *European CUP Newsletter*, 2006, vol. 2, no 3.

46. *Next Generation Networks Task Force Report*. The President's National Security Telecommunications Advisory Committee. 2006.

47. ITU-T Recommendation G.1000 (11/2001). Communications Quality of Service: A framework and definitions.

48. Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii [About information, information technologies and protection of information]. Federal law of Russia. 2006. (in Russian).

49. Duffy J. Cisco routers caused major outage in Japan: report. *Network World*. 16.05.2007.

50. Kucheryavii E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [Traffic Management and the Quality of Service on the Internet]. Saint-Petersburg, Science and Technology Publ., 2004. 336 p. (in Russian).

51. Tiurkin M. L., Shadaev M. I., Adzhemov A. S., Ivanov I. P., Dvoriankin S. V., Kuts A. V., Kvitko A. V., Vazhev P. A., Bystrov Iu. A. *Informatsionnye tekhnologii, svyaz' i zashchita informatsii v MVD Rossii* [Information Technology, Communication and Information Protection in the Ministry of Internal Affairs of Russia]. Moscow, "Company "Information Bridge", 2013, 156 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (in Russian).

52. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii - 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation - 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (in Russian).

53. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

54. Sheptura V. N. *Arkhitektura perspektivnoi sistemy sviazi gruppirovki voisk (sil) dlia obespecheniia upravleniia adaptivnymi deistviiami voisk (sil)* [Architecture of Advanced Communication Systems Forces to Ensure Adaptive Management Actions of the Troops]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Modern Trends in the Theory and Practice of Control Systems for Special Purposes"], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 16-20 (in Russian).

55. Makarenko S. I., Afanasev O. V., Baranov I. A., Samofalov D. V. Experimental analysis of the network reaction and the routing effects under conditions of noise-to-signal ratio dynamic changes. *Journal of radio electronics*, 2016, no. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/4/text.pdf> (accessed 9 June 2017) (in Russian).

56. Parshin S., Kozhanov Iu. *Sovremennye tendentsii v sovershenstvovanii sistemy upravleniia vooruzhennymi silami vedushchikh zarubezhnykh stran v informatsionnoi epokhu* [Modern trends in improving the system of management of the armed forces of the leading countries in the information age]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 7, pp. 3-9 (in Russian).

57. Janov O., Shiriaev V. *Uchastie Ministerstva oborony SShA v federal'noi programme sozdaniia 'Sredy sovместного испол'zovaniia informatsii'* [The participation of the Ministry of defense in the Federal program of creating an "Environment of information sharing"]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2011, no. 12, pp. 15-21 (in Russian).

58. Gavrilov A. *Avtomatizirovannaia sistema sbora, obrabotki i raspredeleniia razvedyvatel'noi informatsii SV SShA DCGS-A* [Automated system of collection, processing and distribution of intelligence information, US army DCGS-A]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2010, no. 7, pp. 32-40 (in Russian).

59. *Voennaia set' SShA budet postroena na marshrutizatorakh Juniper Networks* [Military network, the US will be built on Juniper Networks routers]. *Poplar Systems*. 13.01.2004. Available at: <http://www.poplar.ru/view.php3?cls=news&vguid=1256&guid=1256&parent=1255> (accessed 13 June 2015) (in Russian).

60. Kobozev Iu. N. *Perspektivy razvitiia sistem sviazi i telekommunikatsii v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Prospects for the Development of Communication and Telecommunication Systems in

Management Information Systems, Special Purpose]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniia»* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sozvezdie", 2013, pp. 7-9 (in Russian).

Статья поступила 15 июня 2017 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose

S. I. Makarenko

Relevance. The leading countries develop communication networks of a special purpose (CNSP) operating for the government, the Ministry of defence, Agency of security etc. Main trends in the development of CNSP are the use of resources of civil networks, as well as the use of commercial communication protocols. New network technologies of civil networks (NGN concept, packet transmission technology etc.) are introduced in CNSP. Consequently, it is important to analyze the current state of CNSP, as well as trends and problems of development their. **The aim of this paper** is to analyze the technologies and principles of CNSP, as well as the prospects and problems of their development. The analysis is based only open sources. DISN and GIG networks are used as examples of CNSP. **Results and their novelty.** Elements of novelty of the paper are main trends and problems of building of CNSP. The analysis showed that modern CNSP moving to a decentralized network structure that is more in line with modern requirements to systems of state and military administration. Also, modern CNSP move to a hybrid structure where the individual segments of civil networks are used as parts of the transport infrastructure of CNSP. Commercial protocols and technologies widely used in CNSP instead specialized communication protocols too. This trends make the modern CNSP more vulnerable. **Practical significance.** The presented analysis is useful for technical professionals in the justification of new technological solutions in the field of CNSP. In addition, this analysis will be useful for researchers to justify as improvements CNSP and protection it.

Key words: communication system, network communication, communication networks of a special purpose, civil network, network protocols, military communications system, sustainability communications, electronic warfare, information technology, NGN, control communication system.

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint Petersburg, Zhdanovskaya ulica, 13.

УДК 623.465

Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения

Смирнов С. В.

Актуальность. В настоящее время существует определенная вероятность применения Воздушно-космических сил России за пределами ее территории. Основной задачей при этом является организация управления авиацией при отсутствии наземных пунктов управления. В этом случае для управления авиацией используется воздушный пункт управления который представляет собой авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). **Целью работы** является анализ способов и средств управления авиацией с АК РЛДН, а также формирование предложений по перспективам развития такой системы управления. **Результаты и их новизна.** Элементом новизны работы являются выявленные общие подходы к управлению, методам наведения и средствам управления авиации с АК РЛДН. В частности, анализ показал следующее. Современным трендом в развитии АК РЛДН является управление не только пилотируемой авиацией, но и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Причем для управления БПЛА характерно решение нового класса задач, связанных с управлением ими на основе принципа «интеллектуального роя», а также при полувавтономном и автономном управлении. Кроме решения задач управления актуальным направлением исследований является разработка высокосвязных сетей радиосвязи, которые бы использовались для реализации сетецентрического управления с АК РЛДН и обладали повышенной устойчивостью при применении противником средств радиоэлектронного подавления. **Практическая значимость.** Представленный анализ будет полезен техническим и военным специалистам для обоснования новых способов боевого применения авиации с АК РЛДН за пределами территории России, а также для обоснования новых технических систем управления и связи в составе АК РЛДН.

Ключевые слова: система управления, авиация, БПЛА, система связи, командная радиополоса управления, авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения, сеть воздушной радиосвязи.

Введение

Современная политическая обстановка отличается неопределенностью и высокой вероятностью применения Воздушно-космических сил (ВКС) в интересах обеспечения геополитических интересов России и ее союзников за пределами территории РФ. Вместе с тем такое боевое применение авиации сопряжено с определенной сложностью, а именно – отсутствие наземной инфраструктуры обеспечивающей поле управления авиацией. В этом случае основным способом управления авиацией является использование воздушных пунктов управления (ПУ) на основе авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Вышесказанное подтверждает опыт использования АК РЛДН А-50 в Сирии при проведении там операции ВКС России.

Библиографическая ссылка на статью:

Смирнов С. В. Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 69-100. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf>

Reference for citation:

Smirnov S. V. The Analysis of Ways and Means to Control the Aircrafts from AWACS. Systems of Control, Communication and Security, 2017, no. 2, pp. 69-100. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf>

Целью статьи является анализ основных режимов, способов и технологий управления авиацией с АК РЛДН. Данный анализ проводится в интересах поиска путей дальнейшего совершенствования способов и технических средств управления авиацией, особенно при ее действиях за пределами России.

Ввиду большого объема материала он был декомпозирован на несколько подразделов:

- режимы работы авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения нового поколения;
- управление авиацией при наведении ее на воздушные цели;
- управление авиацией при наведении ее на наземные цели;
- система командного наведения АК РЛДН и его роль при организации одиночных и групповых действий авиации;
- методы наведения, используемые в АК РЛДН для управления авиацией;
- управление БПЛА с АК РЛДН;
- особенности управления группой БПЛА с АК РЛДН;
- иерархическое управление группой БПЛА;
- децентрализованное сетевое управление группой БПЛА;
- проблемные вопросы информационного обеспечения групповых действий БПЛА;
- командная радиоперехватная линия управления – как основное средство управления авиацией с АК РЛДН;
- перспективные направления совершенствования командных радиоперехватных линий управления авиацией.

Режимы работы авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения нового поколения

Как показывает анализ современных работ в области организации боевого управления авиацией [1–3], существует два основных способа управления:

- 1) управление с наземного пункта управления (ПУ);
- 2) управление с воздушного ПУ.

При этом управление с наземных ПУ осуществляется при наличии развернутой наземной инфраструктуры управления, как правило, на территории России или дружественных стран. При необходимости проведения военных операций в других странах, в которых наземная инфраструктура управления отсутствует, основным способом управления авиацией становится управление с воздушного ПУ. В качестве такого воздушного ПУ традиционно используется авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) – рис. 1.

Современный АК РЛДН осуществляет управление летательными аппаратами различных классов в процессе полета по маршруту, наведение на воздушные и наземные цели, а также управление сопрягаемыми комплексами аналогового типа, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), самолетами-ретрансляторами, топливозаправщиками и т. д. Эта специфика обуславливает

необходимость использовать в АК РЛДН две группы режимов, которые условно можно классифицировать как:

- «воздух-воздух»;
- «воздух-поверхность».

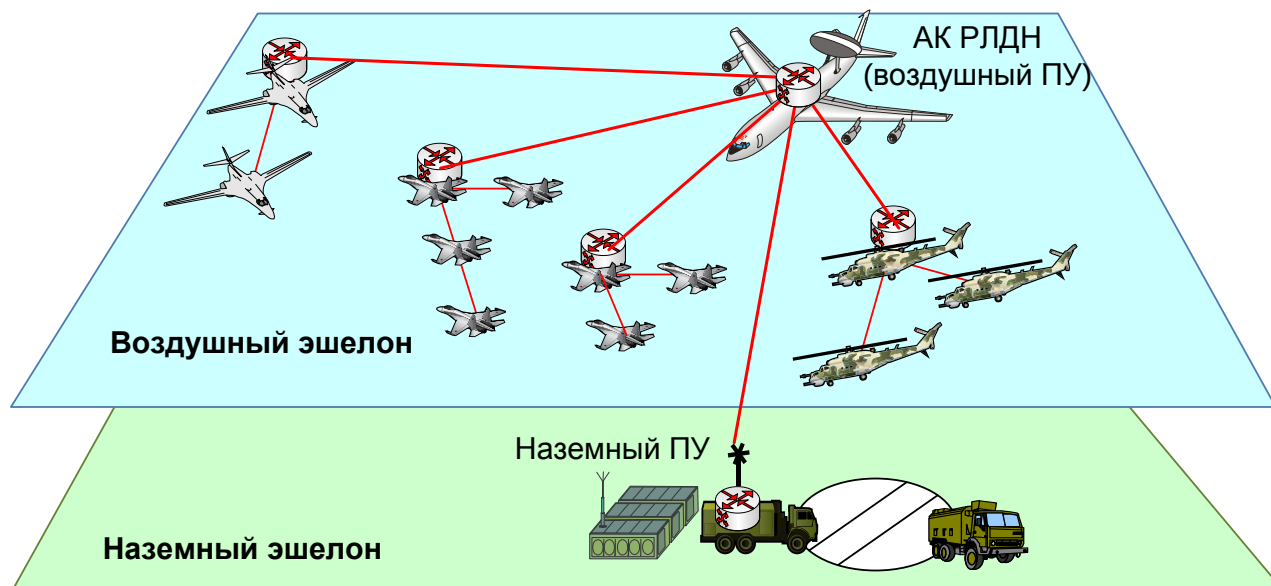


Рис. 1. Использование АК РЛДН для управления авиацией

Режимы, включенные в группы «воздух – воздух» и «воздух – поверхность» [3, 4]:

- обнаружение – позволяет получить данные о воздушной и наземной обстановке, выполнить государственное опознавание по критерию «свой – чужой»;
- сопровождение – ранжирование целей по степени их важности и формирование оценок координат их состояния, используемых для формирования управления наводимыми ЛА и БПЛА;
- управление ЛА в рамках решаемых оперативных и тактических задач.

Основными преимуществами АК РЛДН по сравнению с наземными АСУ управления боевой авиации являются его потенциально высокие характеристики обнаружения малоразмерных и маловысотных воздушных, наземных и морских целей и возможность оперативного создания адаптивно перемещаемых в заданных областях пространства подвижных полей информации и управления. Вследствие этого АК РЛДН имеет определенные преимущества перед наземными ПУ по обеспечиваемым рубежам ввода в бой самолетов, особенно на предельно малых высотах.

Важнейшие задачи АК РЛДН — информационное обеспечение боевых действий и управление ЛА, среди которых, прежде всего, нужно выделить задачи, условно объединенные в группы работы по воздушным целям, наземным объектам и с сопрягаемыми летательными аппаратами. При этом под сопрягаемыми ЛА понимают истребители прикрытия, ведомые АК РЛДН, самолеты-заправщики, ретрансляторы воздушного базирования и т. д.

Управление авиацией при наведении ее на воздушные цели

Для управления наведением авиации на воздушные цели в АК РЛДН закладывается совокупность алгоритмов, реализующих методы наведения управляемых ЛА. Из этих методов можно выделить как традиционные методы [1, 3] погони, маневра и перехвата, так и некоторые новые.

Методы наведения групп ЛА реализуются посредством управления ЛА командиров групп, которые взаимодействуют с ведомыми ЛА группы посредством телекодовой связи [1]. Методы наведения сверхманевренных и гиперзвуковых ЛА (ГЗЛА) – это набор новых методов, в которых, учитываются относительное ускорение целей и наводимых ЛА [5]. Такой учет потребует использования в информационных режимах бортовых радиолокационных станций (БРЛС) и оптико-электронных системах (ОЭС) алгоритмов обнаружения маневров и оценивания вторых производных отслеживаемых координат. Кроме того, необходимость надежного сопровождения ГЗЛА приводят к необходимости принятия мер по расширению диапазона скоростей и ускорений, более устойчивой работы систем сопровождения целей и уменьшению временных интервалов обращения к ним.

Использование методов управления повышенной скрытности обусловлено требованиями повышения боевой эффективности и живучести. Для решения задач скрытого управления могут быть использованы различные приемы как однопозиционного, так и многопозиционного наведения с применением полупассивных и пассивных режимов работы систем радиосвязи. Кроме того, могут быть использованы и специальные приемы повышения скрытности передачи команд управления на наводимые ЛА.

Существенное возрастание номенклатуры воздушных радиоизлучающих целей, включая постановщики помех в виде специализированных авиационных комплексов РЭБ [6], определяют необходимость использования в АК РЛДН специальных методов наведения на воздушные источники радиоизлучений (ИРИ), учитывающих особенности их перемещения в пространстве. Следует отметить, что при перехвате движущихся ИРИ могут быть использованы как однопозиционные, так и многопозиционные системы наведения. Однако, для всеракурсного перехвата движущихся воздушных объектов необходимо иметь достаточно точные оценки дальности и скорости, что является непростой задачей в условиях, когда в пассивном режиме измеряются только угловые координаты ИРИ. Использование однопозиционных приемов наведения требует выполнения достаточно длительного маневра наводимого самолета и не позволяет получить высокую точность оценивания дальности и скорости. Более эффективным является использование методов многопозиционного (как правило, двухпозиционного) наведения, дающих возможность практически мгновенно сформировать более точные оценки дальности и скорости. Необходимо отметить, что для повышения точности оценивания дальности и скорости один или оба носителя должны выполнять специальный маневр [3].

Методы траекторного управления наблюдением направлены не только на решение основных задач перехвата, но и на получение траекторий, обеспечи-

вающих наилучшие условия для функционирования информационных систем. Это позволяет улучшить показатели эффективности системы наведения АК РЛДН практически без улучшения тактических и технических показателей БРЛС и ОЭС. Следует отметить, что использование методов многопозиционного наведения, давая существенное улучшение показателей эффективности, живучести и информативности, приводит к значительному усложнению алгоритмов управления. Это усложнение обусловлено появлением еще одного более высокого иерархического управленческого уровня, а также усложнением процедур взаимной синхронизации и обмена информацией. Кроме того, использование многопозиционных систем наведения приводит к значительному ухудшению показателей экономичности, поскольку требует, как минимум, удвоенного расхода топлива и ресурса носителей и информационных систем.

Как показал опыт боевого применения авиации в локальных войнах [7] при управлении авиацией необходимо учитывать зоны барражирования истребительной авиации противника, зоны его противовоздушной обороны (ПВО) и применения им средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Одним из способов устранения данных угроз является использование метода обхода зон тактического превосходства противника. Суть этого метода состоит в заблаговременном обходе областей пространства, в которых ЛА могут быть обнаружены средствами противника, превосходящего по летно-техническим характеристикам самолетов или оружия. Следует подчеркнуть, что для использования этого приема необходимо иметь неизлучающие пассивные средства обнаружения большой дальности и достоверные алгоритмы идентификации обнаруженных целей, вплоть до их типа [3].

Спецификой методов наведения ЛА на групповые цели является необходимость получения информации о пространственных размерах группы. При наличии такой информации наведение самолетов осуществляется на головную часть группы, а наведение средств поражения – на геометрический или энергетический центр группы. Для высокоточного индивидуального наведения используется траекторное управление наблюдением, обеспечивающего разрешение целей в плотной группе [8].

Перспективным, но достаточно сложным приемом повышения эффективности наведения является использование метода смешанного наведения, базирующегося как на командах, поступающих от АК РЛДН, так и на сигналах управления, формируемых на самом наводимом самолете с использованием своих информационных средств. Сложность такого приема состоит в необходимости применения универсального метода наведения, инвариантного к пространственному положению источников информации.

Управление авиацией при наведении ее на наземные цели

Система наведения на наземные цели реализованная в АК РЛДН представляет совокупность методов управления ЛА в процессе их наведения на наземные объекты. В общем случае наводимыми ЛА могут быть самолеты-

штурмовики, фронтовые и дальние бомбардировщики и многофункциональные истребители при работе по наземным целям, а также ударные БПЛА [9].

Управление этими ЛА осуществляется в процессе их полета по маршруту в район цели и далее непосредственно в область применения средств поражения.

При управлении ЛА на маршруте используются в основном смешанные методы. Суть этих методов состоит в том, что в процессе полета команды управления формируются на самих ЛА в соответствии с тем или иным методом автономного наведения. Из этих методов получили наибольшее распространение – маршрутный, курсовой и путевой [10]. Маршрутный метод наведения выполняется по жестко фиксированной траектории полета, намечаемой заранее до полета. Управление при этом сводится к регистрации отклонений от программной траектории и их устранению. Суть курсового метода состоит в совмещении продольной оси наводимого ЛА с направлением на цель. При использовании путевого метода с направлением на цель совмещается вектор путевой скорости управляемого самолета.

Управляющая роль АК РЛДН как воздушного пункта управления сводится к периодической передаче на борт, наводимых ЛА, корректирующих команд или передаче команд на изменение маршрута при наведении на новые цели или при выявлении опасных зон, обусловленных обнаружением систем ПВО противника.

Необходимо отметить, что появление высокоскоростных надводных и наземных целей (суда на воздушной подушке, катера, автомобили на автобанах, высокоскоростные поезда) предопределяет использование более сложных законов наведения, практически не отличающихся от методов наведения на воздушные цели.

Отдельный специфический режим управления АК РЛДН ракетами большой дальности основан на формировании для этих ракет команд радиокоррекции, особенно при их наведении на движущиеся корабли. Следует отметить, что команды радиокоррекции для таких ракет могут передаваться через управляемый ЛА и на этапе его самонаведения, при котором, как правило, используются разновидности метода последовательных упреждений [3]. При этом методе в процессе формирования сигналов управления используются взвешенные ошибки наведения по бортовым пеленгам цели и угловой скорости линии визирования. Последнее позволяет учесть влияние бокового ветра и движение цели.

Процедура передачи команд с АК РЛДН на борт самонаводящегося бомбардировщика особенно актуальна в условиях применения против него БРЛС активных помех [3, 6].

Методы наведения групп ударных самолетов, как и при наведении на воздушные цели, сводятся к управлению самолетом командира группы.

Спецификой управления ударными БПЛА является передача на их борт команд целеуказания информационным системам, а также контроль правильности «захвата» ими нужной цели. Это дает возможность по полученному от них на борт АК РЛДН телевизионному или радиолокационному изображению цели сформировать и передать на борт БПЛА команды управления. В наиболее про-

стом варианте для решения этих задач могут быть использованы трехточечные методы наведения [10], учитывающие динамику взаимного перемещения пункта управления, наводимого ЛА и цели.

Методы наведения повышенной скрытности базируются на тех же принципах, что и при наведении на воздушные цели. Наиболее рациональным является использование методов пассивной локации, как при однопозиционном, так и многопозиционном наведении.

Спецификой методов наведения на наземные ИРИ, отличающей их от типовых методов, является необходимость наведения на движущиеся излучатели, размещаемые не только на кораблях, но и на мобильных наземных РЛС, работающих в движении. Особенностью использования методов многопозиционного наведения является возможность применения полуактивных режимов работы, при которых первичным источником информации являются сигналы подсвета, излучаемые АК РЛДН и отражаемые целью.

Такой способ актуален при управлении высокоточными средствами поражения, использующими синтезирование апертуры антенны. В перспективе полуактивный режим может быть использован и при маловысотном полете.

Большие информационные возможности АК РЛДН и наличие протоколов обмена информацией с большинством сопрягаемых наземных ПУ предопределяет их использование в качестве базовых элементов единой сетевой системы управления авиацией на необорудованном театре военных действий (ТВД). В составе такой сети, кроме своих обычных задач, АК РЛДН должны обеспечивать наземные и корабельные системы ПВО целеуказаниями по загоризонтным целям. Перспективными режимами АК РЛДН являются режимы совместной работы не только с наводимыми ЛА, но и с космическими, наземными и корабельными РЛС в полуактивных и пассивных режимах [3].

Практическое решение задач информационного сопряжения продемонстрировали АК РЛДН в ходе операции ВКС России в Сирии. АК РЛДН А-50 действуя с авиабазы «Хмеймим» обеспечивал обнаружение наземных ИРИ, наведение на наземные цели самолетов фронтовой авиации, а также информационную поддержку пусков высокоточного оружия (ВТО) из акватории Средиземного моря корабельной группировкой России.

Система командного наведения АК РЛДН и его роль при организации одиночных и групповых действий авиации

Система командного радиоуправления – это совокупность функционально связанных подсистем (устройств), предназначенных для наведения ЛА по командам, формируемым на пункте управления и передаваемым на борт управляемого объекта с помощью радиолинии [11].

Система наведения истребителей с АК РЛДН представляет собой одну из наиболее сложных разновидностей систем командного радиоуправления (КРУ). В современных АК РЛДН командное наведение выполняет следующие функции [1].

1. Дежурство истребителей в воздухе.
2. Наведение истребителей на все типы воздушных целей из положения дежурства на аэродроме и в воздухе.
3. Проводка истребителей по маршруту при их действиях по наземным (морским) целям.
4. Проводка истребителей по маршруту для расчистки воздушного пространства и блокирования аэродромов противника.
5. Вывод на назначенный рубеж для последующего сопровождения самолетов других родов авиации.
6. Вывод самолетов к топливозаправщику.
7. Привод на аэродром посадки.
8. Организация приема/передачи управления.

Решение всех функциональных задач системы командного наведения обеспечивается в процессе совместной работы информационно-управляющих систем АК РЛДН и управляемых самолетов.

В общем случае, в АК РЛДН используются следующие режимы наведения [3]:

- командное наведение;
- командное наведение с координатной поддержкой;
- полуавтономные действия.

Командное наведение самолетом осуществляется путем выдачи на его борт команд наведения и целеуказания, сформированных на ПУ, при наличии на нем регулярной информации о целях и самолете.

Командное наведение с координатной поддержкой наряду с командами наведения и целеуказания предусматривает периодическую передачу на борт самолета информации о координатах цели, что позволяет в любой момент перейти к таким способам выхода в боевое соприкосновение, как бортовое наведение или бортовой поиск. Последние иногда рассматриваются как разновидности обобщенного способа выхода в боевое соприкосновение, называемого бортовым управлением и используемого при полуавтономных действиях истребителей.

Режим полуавтономных действий используется для наведения одиночных и групп истребителей в автоматизированных системах управления, при которых задачи поиска, наведения и атаки решаются их бортовыми средствами управления по информации, поступающей от внешних источников.

Возможность осуществления полуавтономных действий истребителей обеспечивается их бортовой вычислительной системой, по регулярной и прерывистой информации о координатах и параметрах движения целей, передаваемой по командной радиолнии управления с АК РЛДН. В этом режиме летчик может самостоятельно решать задачу управления самолетом для вывода в район обнаружения и атаки воздушного противника. Различают следующие режимы полуавтономных действий [3]:

- бортовое наведение;
- бортовой поиск.

Следует иметь в виду, что при таких режимах управления (бортовое наведение, бортовой поиск) команды наведения для истребителя на ПУ не формируются. При бортовом наведении информация координатной поддержки выдается ПУ с темпом, позволяющим истребителю устойчиво выходить в область атак цели. Бортовое наведение, как правило, используется для действий ударных групп.

Бортовой поиск используется при наличии на АК РЛДН разовой прерывистой, либо априорной информации о цели, по которой нельзя реализовать командное и бортовое наведение. Кроме того, в случае длительного прекращения поступления на борт информации при командном и бортовом наведении истребитель автоматически переключается на бортовой поиск, используя принятые ранее и сохраненные координаты. При этом аппаратура истребителя осуществляет экстраполяцию положения цели на текущий момент времени по последним данным координатной поддержки. В случае возобновления передачи на борт истребителя соответствующей информации имеется возможность «вернуться» к управлению по командам или по информации, передаваемой через КРУ.

Бортовой поиск характерен для действий поисковых групп и реализуется в результате совместного поиска цели бортовыми РЛС группы в боевом порядке, обеспечивающем наибольшую зону просматриваемого пространства и необходимое взаимное перекрытие зон обзора РЛС. Обнаружив цель, ведущий группы организует боевые действия группы по ее уничтожению.

Групповые действия направлены на решение какой-либо общей боевой задачи группой из нескольких истребителей. Групповые действия обеспечиваются наличием на борту аппаратуры автоматизированного обмена информацией между самолетами группы и ее отображения на специальных индикаторах. Это позволяет использовать в АК РЛДН один канал наведения для управления группой, передавая команды и информацию о координатах цели и тактической обстановке на борт ведущего группы. В свою очередь, ведущий самостоятельно управляет своей группой, осуществляя координацию действий всех ее экипажей.

Группа истребителей может вести боевые действия одним из трех способов [3]:

- 1) путем командного управления с АК РЛДН;
- 2) полуавтономно;
- 3) автономно.

Командное управление с АК РЛДН предполагает движение ведущего истребителя группы в соответствии с передаваемыми ему командами. Остальные истребители группы, получая и выполняя те же команды или выполняя команды ведущего, выдерживают определенный боевой порядок.

Полуавтономные действия состоят в том, что непосредственные команды управления движением истребителей формируются ведущим группы на основании информации, передаваемой с АК РЛДН.

Автономные действия группы осуществляются без какого-либо участия пункта наведения, а только по командам ведущего.

Методы наведения, используемые в АК РЛДН для управления авиацией

Рассмотрим более подробно методы наведения, используемые в АК РЛДН для управления истребителями, особенности функционирования системы наведения в различных режимах, принципы построения и особенности функционирования командных радиолиний управления.

Методы наведения истребителей с АК РЛДН на воздушные цели должны обеспечивать формирование такой требуемой траектории, наведение по которой обеспечивает вывод ЛА к определенному времени в зону уверенного захвата цели хотя бы одной из визирных систем (БРЛС, ОЭС, оптическим прицелом и т. д.).

В связи с тем, что на этапе дальнего наведения самолет управляется по курсу, высоте и скорости [10], различают и соответствующие методы наведения.

Методы наведения по высоте определяют формирование требуемых значений высоты для любого момента времени, обеспечивающих желаемый профиль полета в вертикальной плоскости.

Методы наведения по курсу предопределяют формирование требуемых значений курса, обуславливающих желаемую траекторию наведения в горизонтальной плоскости.

Методы наведения по скорости обуславливают вычисление требуемых значений скорости, гарантирующих выход истребителя в район цели к заданному времени.

В качестве наиболее простого и надежного метода наведения в горизонтальной плоскости оправданно использовать метод перехвата, целесообразный во всех случаях, когда нет жестких ограничений на ракурс атаки цели.

Метод погони (прямой метод) используется при наведении в заднюю полусферу и соответствующих взаимных положениях истребителя и цели или в начале наведения, когда еще отсутствуют устойчивые оценки параметров движения цели. Во всех остальных случаях применяется метод маневра.

При методе маневра для истребителей старых типов, как правило, назначается атака из задней полусферы.

Формирование пространственной траектории самолета обеспечивается соответствующими алгоритмами наведения. При расчете профиля полета используются характеристики полета по базовой программе набора высоты, скорости и характеристики схода с нее. В расчетные формулы входят путь, время и топливо, необходимые для выполнения рассматриваемого элемента профиля, а также секундные расходы топлива при различных режимах работы двигателей. В алгоритмах также используются характеристики БРЛС истребителя и характеристики ракет.

Координированное наведение имеет место при одновременном наведении группы истребителей на воздушные, особенно групповые цели. Координация процедур наведения на цель различных групп ЛА должна обеспечить их одновременный вывод в заданные районы относительно цели на заданные расстоя-

ния и под заданными углами к траектории движения поражаемых объектов. При этом целесообразно обеспечивать вывод наводимых групп ЛА с различных сторон. Наиболее приемлемым способом координированного наведения считается наведение трех групп истребителей, одна из которых выводится в зону атаки под ракурсом близким к нулю.

При выходе истребителя в боевое соприкосновение в режиме бортового наведения на его борт выдается только регулярная координатная поддержка по сопровождаемой цели. Сближение с целью, и последующая атака выполняются истребителем самостоятельно.

Управление БПЛА с АК РЛДН

Одним из направлений повышения эффективности воздушной разведки, особенно в зонах повышенной опасности, является организация с АК РЛДН управления БПЛА предназначенных для обнаружения и распознавания наземных целей [12]. При этом наиболее простым является вариант боевого применения БПЛА, предусматривающий выполнение двух этапов.

Этап 1 – взлет и полет БПЛА по маршруту. Маршрут полета формируется на борту БПЛА по введенной перед взлетом информации о маршрутных точках полета. При этом взлет и полет БПЛА осуществляются по определенной программе. Аналогично осуществляется и посадка БПЛА.

Этап 2 – боевое применение БПЛА. Когда БПЛА находится в зоне предполагаемого боевого применения, управление им берет оператор, находящийся на АК РЛДН. После этого БПЛА могут совершать полет по задаваемой оператором программе или находиться под его непосредственным управлением.

При использовании ударных БПЛА, предназначенных для уничтожения наземных объектов в зонах повышенной опасности или на больших удалениях от АК РЛДН, скорее всего, будут применяться несколько вариантов управления.

При использовании первого варианта ударный БПЛА пускает ракеты «воздух – земля» (или сбрасывает бомбы), автоматически наводящиеся на цели в соответствии с командами целеуказания, поступающими от АК РЛДН.

При втором варианте управление запущенными ракетами осуществляет штурман наведения АК РЛДН, используя трехточечный метод, в соответствии с которым линия визирования ракета-цель должна совмещаться с линией визирования БПЛА-цель.

Возможен и третий вариант управления БПЛА, при котором он используется в качестве средства поражения (так называемый режим «камикадзе»).

Особенности управления группой БПЛА с АК РЛДН

Использование групповых средств, как для нападения, так и защиты является одной из особенностей ведения современных боевых действий. Следует подчеркнуть, что групповое использование различных видов ЛА, обеспечивая существенные преимущества по сравнению с одиночным применением, вместе

с тем в значительной мере усложняет процедуру группового управления и информационного обеспечения.

Преимуществами группового применения БПЛА являются [3]:

1. Сложность обнаружения, разрешения и оценки количественного состава и сопровождения для средств противоборствующей стороны, особенно при использовании группы БПЛА в виде «роя».
2. Возможность организации совместной обработки информации в группе, обеспечивающей повышение информативности и живучести.
3. Расширение объема и площади информационно-управляющего покрытия.

Факторы, характеризующие сложность группового применения БПЛА [3]:

1. Появление еще одного более высокого иерархического уровня управления, обеспечивающего реализацию целевого назначения группы.
2. Сложность управления информационными потоками внутри группы.
3. Сложность формулирования коллективного интереса, который должны реализовать системы управления и информационного обеспечения каждого участника группы.
4. Сложность ранжирования целей в группе по степени важности.
5. Сложность целераспределения как в группах наведения, так и защиты.

При этом сложность, характерная для одной и противостоящих групп, автоматически становится преимуществом для другой стороны.

Общая проблема группового применения средств нападения и защиты – высокие требования к производительности вычислителей, рассчитывающих алгоритмы траекторного управления и их информационного обеспечения. Эти требования обусловлены значительным увеличением размерности обобщенного вектора состояния группы, что вследствие «проклятия размерности» приводит к неадекватно большому возрастанию размерности решения задачи синтеза управления и фильтрации [13].

Разработка принципиально нового математического аппарата оптимизации высокоразмерных систем, обеспечивающего синтез управляющих сигналов в рамках разумных требований к вычислительной производительности, весьма проблематична. Более рациональным оказывается подход, основанный на использовании разновидностей классической теории оптимизации для декомпозированных обобщенных моделей состояния [3].

Наиболее простым вариантом такой декомпозиции является разбиение обобщенного вектора состояния группы на подвекторы, определяющие состояние отдельного элемента группы с учетом состояния других элементов. Этот подход дает возможность перейти от одновременного управления всей группой к последовательному во времени управлению отдельными элементами, с учетом состояния других участников группы [3].

Еще один подход основан на переходе к иерархическому управлению отдельными элементами – лидерами, которые, в свою очередь, управляют лидерами групп более низкого уровня и т. д.

Таким образом, способами управления группами БПЛА могут быть [14]:

- *централизованное управление*, при котором все команды, передаваемые на БПЛА, формируются на ПУ (наземном или воздушном).
- *децентрализованное управление*, при котором индивидуальные команды для каждого БПЛА формируются внутри группы, обеспечивая достижение общей цели.
- *управление ведущими*, при котором на ПУ формируются команды управления отдельными ведущими БПЛА (ведущими групп), каждый из которых, в свою очередь, управляет несколькими ведомыми БПЛА.

Отличительной особенностью групповых действий БПЛА является то, что при обеспечении заданной пространственной конфигурации группы управление конкретным БПЛА (его позицией) зависит не только от его собственного состояния, но и от пространственного положения других БПЛА группы. В связи с этим, важное значение имеет решение задачи построения заданной пространственной конфигурации группы БЛА за заданное (минимальное) время [15].

Многовариантность описания процедур траекторного управления конфигурацией группы БПЛА приводит к чрезвычайному разнообразию используемых методов синтеза законов управления. Выбор метода синтеза управления группами БПЛА обусловлен как формой описания математической модели отдельных элементов, так и классом управлений, получаемых в процессе синтеза. Анализ различных подходов к синтезу управления [16, 17] показал, что весьма перспективным направлением в решении задачи построения требуемой топологии группы БПЛА является использование математического аппарата концепции обратных задач динамики [17], который позволяет сформировать достаточно простые законы управления для широкого класса моделей состояния, включая и нелинейные, что характерно для описания пространственных эволюций БПЛА.

Иерархическое управление группой БПЛА

Одним из способов уменьшения размерности задачи группового управления БПЛА является использование иерархического подхода к ее решению [18]. В рамках такого подхода БПЛА разбиваются на подгруппы, в которых выделяется ведущий БПЛА (лидер). Затем подгруппы разбиваются на более мелкие части с выделением «своих» ведущих БПЛА и т. д. Управление всей группой и внутри нее осуществляется ступенчато от ведущего БПЛА верхней подгруппы к ведущим БПЛА нижней подгруппы.

Преимущества такого управления [3]:

- относительная вычислительная простота решения задачи управления из-за существенного снижения ее размерности;
- высокая живучесть сети управления, так как отказ (уничтожение одного из ведущих БПЛА) не приводит к полной потере управления, а если учесть возможность взаимозаменяемости ведущих БПЛА, то уничто-

жение одного или нескольких из них практически не ограничивает функциональные возможности всей группы.

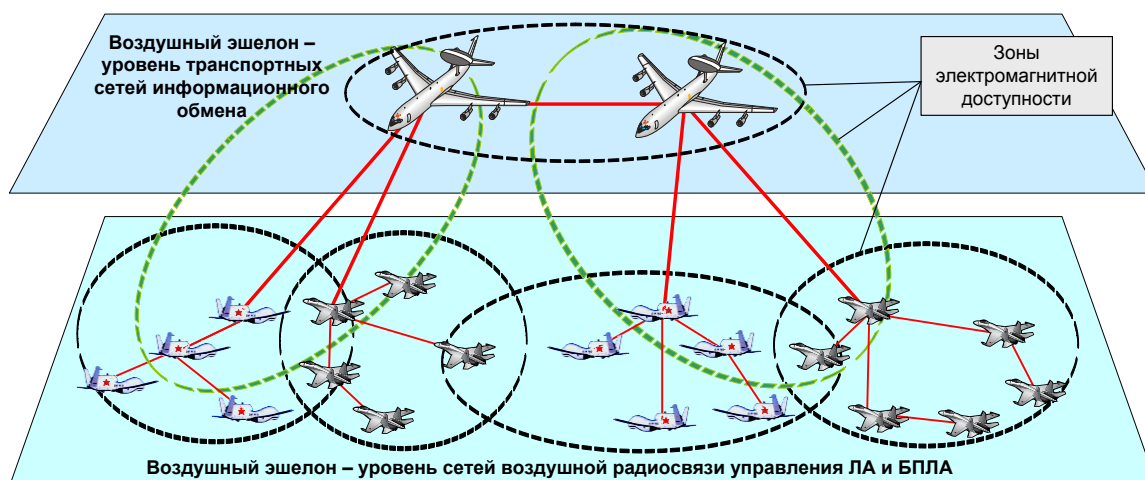


Рис. 2. Иерархическое управление ЛА и БПЛА с АК РЛДН

Отметим, что такое формальное представление системы управления в виде иерархической системы позволяет существенно уменьшить размерность задачи синтеза оптимального управления и упростить данную задачу [3].

Децентрализованное сетевое управление группой БПЛА

Кроме иерархического управления группой БПЛА возможны и другие различные способы [14, 19]. Одним из самых эффективных является управление группой БПЛА в составе сетецентрической системы [20-23].

При сетевом способе построения системы управления выполнение спланированных действий в процессе решения общей целевой задачи возлагается на бортовые системы управления БПЛА, которые одновременно корректируются оператором ПУ с помощью распределенной сети связи. Таким образом, оператор и группа БПЛА объединяются в единую информационную сеть, в которой всем ее участникам доступны информационные ресурсы друг друга, а отдельные БПЛА обладают определенной автономностью действий.

Воздействия оператора сводятся к постановке целевой задачи для группы и контролю за ходом ее выполнения. Все БПЛА поддерживают между собой связь и постоянно обмениваются информацией.

Основным принципом сетецентризма является возможность для любого элемента системы получать информацию от любого другого элемента. Преимуществами такой сетевых системы управления группой БПЛА по сравнению с другими способами реализации совместных действий является следующее [20-23]:

- решение задачи планирования и управления групповыми действиями всех БПЛА может осуществляться параллельно во времени для всех элементов группы;

- возможность оперативного создания и реконфигурации БПЛА различных типов (ударных, разведывательных, БПЛА-ретрансляторов и т. д.) в группы различного боевого назначения;
- высокая скрытность обмена данными по радиолиниям, так как расстояния между БПЛА в группе невелики и для обмена могут быть использованы сигналы с низкой энергетикой, а данные от оператора БПЛА принимают в пассивном режиме;
- высокая живучесть группы БПЛА, так как функции вышедших из строя участников могут быть оперативно перераспределены между оставшимися БПЛА.

Следует отметить, что теоретические и прикладные вопросы организации управления в таких децентрализованных сетевых системах проработаны в недостаточной степени, в том числе и потому, что отсутствуют методы синтеза алгоритмов управления отдельными объектами в процессе решения общей задачи [3].

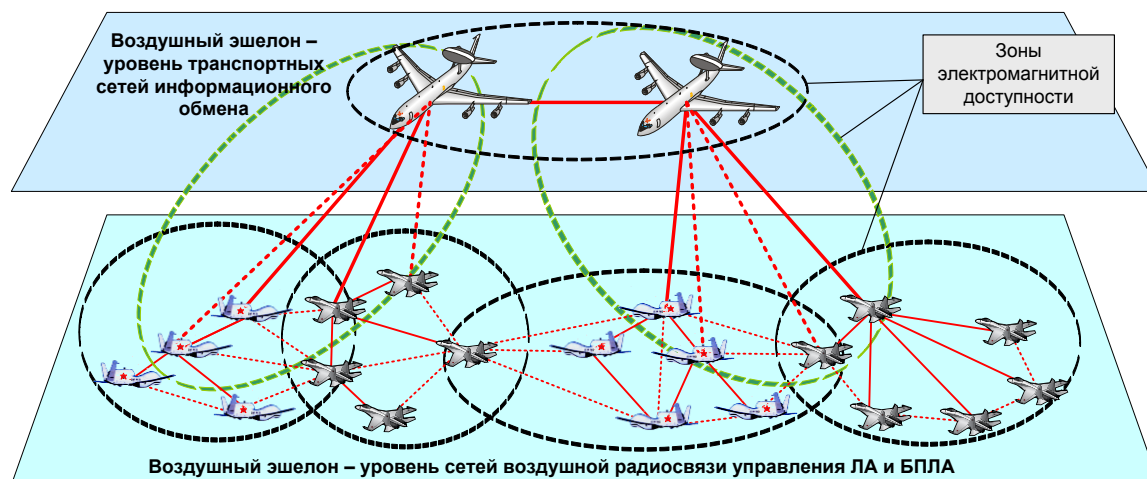


Рис. 3. Децентрализованное сетевое управление ЛА и БПЛА с АК РЛДН

Проблемные вопросы информационного обеспечения групповых действий БПЛА

Специфика групповых действий, как средств нападения, так и средств защиты, предопределяет необходимость информационного обмена между участниками группы и использования режима многоцелевого сопровождения с достоверной идентификацией измерений. Использование для этих целей комплексной обработки сигналов [24] на основе канонического алгоритма оптимального оценивания с одновременным приходом измерений от различных датчиков становится непродуктивным. Это обусловлено, прежде всего, неодновременностью прихода сигналов от разнородных датчиков как внутри одного БПЛА, так и от других БПЛА за счет изменения их взаимного расположения в пространстве. В связи с этим настоятельной необходимостью является разра-

ботка алгоритмов оптимального оценивания, инвариантных ко времени поступления измерений.

Другая особенность – необходимость в получении постоянной информации о пространственном положении как своих БПЛА, так и целей, что определяет использование режимов многоцелевого сопровождения. Особенностью такого сопровождения являются достаточно большие интервалы времени между поступлениями измерений от одной цели, достигающие нескольких секунд [25], в то время как целеуказания средствам поражения и сигналы управления носителем должны формироваться непрерывно.

Задача непрерывного формирования этих сигналов при дискретном поступлении измерений может быть решена в рамках математического аппарата аналого-дискретной фильтрации. Суть этого варианта фильтрации состоит в том, что экстраполяция оцениваемых координат осуществляется с малым шагом, приближаясь по своей точности к аналоговым алгоритмам, в то время как коррекция прогноза выполняется редкоприходящими измерениями.

Точность и устойчивость алгоритма аналого-дискретной фильтрации, как и других классических алгоритмов оценивания, зависит от соответствия условий функционирования тем моделям состояния, которые были положены в основу синтеза. Между тем, спецификой функционирования авиационных информационных систем, включая радиолокационные, является высокая степень неопределенности априорных сведений, обусловленная произвольным маневрированием целей, наличием различного рода радиопомех и т. д. В таких условиях классические алгоритмы оптимального оценивания функционируют с точностью, существенно худшей, чем это определяется уравнениями потенциальных апостериорных дисперсий ошибок фильтрации, или вообще теряют устойчивость вследствие расходимости процессов оценивания.

Перспективным направлением, позволяющим уменьшить влияние отмеченных недостатков, является использование алгоритмов адаптивной фильтрации [5, 26], позволяющих приспособить алгоритмы фильтрации к условиям функционирования путем изменения (усложнения) структуры фильтров или путем оценивания их параметров. К настоящему времени известно большое число процедур адаптации [5, 26]:

- процедуры совместного оценивания переменных состояния и параметров модели, положенной в основу синтеза;
- многоканальная адаптивная фильтрация;
- скользящие алгоритмы адаптации, основанные на регулировке параметров систем фильтрации.

Наиболее простые и чаще всего используемые на практике алгоритмы адаптации основаны на автоматической коррекции коэффициентов усиления невязки или на коррекции результатов прогноза [13].

При местоопределении и сопровождении маневрирующих целей обостряется проблема отождествления приходящих от них измерений. Существующие способы идентификации измерений [28], основанные на использовании стробов отождествления, не обеспечивают требуемую достоверность, разрешение и точность дальнейшего сопровождения. Суть этого способа состоит в том, что

относительно экстраполированного положения на момент прихода измерения строится пространственный строб по дальности, скорости и угловым координатам. Если сигнал, отраженный от цели, попадает внутрь этого stroba, то принимается решение об ее идентификации, в противном случае – нет.

При сопровождении интенсивно маневрирующих целей необходимо значительно увеличивать размеры стробов, что при групповых действиях может привести к их перекрытию и снижению достоверности отождествления.

В связи с этим нужно использовать более эффективные приемы идентификации, основанные на использовании экстремальных критериев на базе квадратичных функционалов, позволяющих учесть существенно большее количество признаков принадлежности полученных измерений конкретной цели.

Командная радиолиния управления – как основное средство управления авиацией с АК РЛДН

Основным средством для управления одиночными и групповыми действиями самолетов является технические средства радиосвязи реализующие командную радиолинию управления, посредством которой и осуществляется передача команд различного назначения на борт самолетов и их воспроизведение в них для решения задач траекторного управления, информационного обеспечения и управления аппаратурой управляемого ЛА.

В общем случае, на борт самолета передаются главные (функциональные) и разовые команды.

Главные команды (значения которых изменяются в процессе наведения) [3]:

- требуемый курс;
- требуемая скорость наводимого ЛА;
- скорость сближения;
- дальность до цели;
- высота полета;
- азимут;
- угол места цели;
- координаты перехватчика и др.

Среди разовых команд различают информационные, управляющие и команды взаимодействия.

Информационные команды (дают летчику представление о воздушной и наземной обстановке) [3]:

- разовая дальность до цели;
- полусфера атаки;
- перенацеливание;
- признак способа выхода в боевое соприкосновение;
- признак государственной принадлежности;
- признак поражаемого объекта (тип наземной цели: одиночная, групповая);
- число своих самолетов в группе и т.д.

Управляющие команды [3]:

- форсаж;
- разворот (вправо, прямо, влево);
- включение РЛС на излучение;
- номер программы полета в вертикальной плоскости;
- привод на аэродром и др.

Команды взаимодействия (передаются на борт наводимого ЛА перед переходом в зону ответственности другого ПУ) [3]:

- номер пункта наведения;
- номер новой волны;
- номер нового шифра и т.д.

В зависимости от конкретной ситуации вся передаваемая информация формируется в виде циклограмм (наборов команд), которые и передаются на борт управляемого объекта. В общем случае различные наборы команд используются для командного наведения на воздушные цели, для обеспечения координатной поддержки, привода на аэродром, передачи информации о тактической обстановке при полуавтономных действиях, передачи команд взаимодействия.

Набор любой команды формируется в виде цикла, содержащего несколько подциклов, в число которых могут входить сигналы кадровой (цикловой) и пословной (подцикловой) синхронизации, адрес (шифр) ЛА, для которого передается информация, признак номера команды и значения передаваемых команд в определенной последовательности.

В КРУ возможно засекречивание передаваемых команд, выполняемое по тем же процедурам, что и в технике радиосвязи.

При применении в КРУ передающей антенны с узкой диаграммой направленности повышается помехоустойчивость, скрытность и облегчается решение задачи электромагнитной совместимости. Ориентация передающей антенны КРУ в направлении объекта управления обеспечивается различными способами.

В системах командного радиоуправления истребителями передающая антенна КРУ может иметь очень узкую диаграмму направленности, что существенно затрудняет процесс передачи команд, так как перед его началом надо убедиться в возможности приема передаваемых команд наводимым истребителем. С этой целью КРУ сопрягается с системой активного запроса-ответа (САЗО) и, в частности, может иметь общую с ней передающую антенну. Для работы с конкретным истребителем САЗО получает целеуказание от ЭВМ пункта наведения. При нахождении истребителя в луче диаграммы направленности передающей антенны САЗО посылает сигнал запроса. В случае приема этого сигнала на борту истребителя ответчик последнего формирует ответный сигнал, который свидетельствует о возможности приема команд данным истребителем. Наряду с ответными сигналами по обратному каналу САЗО с истребителя может передаваться и различная другая информация [10].

Перспективные направления совершенствования командных радиоперехватных систем управления авиацией

Все основные показатели системы «АК РЛДН – ЛА (БПЛА)» зависят от совершенства информационного обмена в рамках этой системы. Можно иметь самые совершенные методы наведения и системы их информационного обеспечения, но при низких показателях надежности, скрытности и помехоустойчивости и при низкой скорости передачи информации по КРУ конечный результат наведения будет неэффективным. В связи с этим помимо развития системы управления БПЛА первостепенное внимание необходимо уделить развитию соответствующей системы связи – командным радиоперехватным системам управления.

Необходимо отметить, что при ведении групповых действий авиации в условиях РЭП значимость радиоперехватных систем возрастает еще больше, поскольку они должны обеспечивать не только автономное наведение индивидуальных ЛА, полуавтономные действия, координированное наведение, но и информационный обмен между собой для всех участников группы.

При этом выполнение согласованных групповых действий при взаимном удалении ЛА требует применения сетевых принципов информационного обмена как внутри группы, так и в АК РЛДН, который является не только центром управления, но и одновременно абонентом сети [3].

Сетевой информационный обмен в группе ЛА реализуется путем частотного, временного или кодового метода разделения абонентов радиосети [29].

Частотное разнесение (FDMA) при большом числе абонентов радиосети требует значительного частотного ресурса, который на сегодня отсутствует, а также наличия частотных защитных интервалов для исключения взаимного влияния каналов управления друг на друга.

В настоящее время наиболее распространено временное разделение абонентов (TDMA). Возможности этого метода [3]:

- исключение влияния каналов управления ЛА в группе друг на друга, так как они разнесены во времени;
- выделение большего количества временных слотов тем ЛА которые имеют более высокие требования к темпу информационного обеспечения при управлении;
- обеспечение жесткой взаимной синхронизации абонентов за счет единого времени радиосети;
- осуществление временной скрытности за счет применения методов пакетной передачи информации.

При этом анализ работ [30-34] показал, что наиболее эффективным является использование временного разделения абонентов на основе алгоритма случайного множественного доступа.

Перспективным методом разделения абонентов является метод кодового разделения CDMA, но его реализация требует применения большого числа взаимортогональных в широком смысле псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСП). Число таких ПСП зависит от их длины, а увеличение этой длины приводит к задержкам доставки информации, т. е. налицо противоречие

– увеличение числа абонентов радиосети приводит к росту задержки доставки информации. Это противоречие разрешается применением квазиортогональных кодовых последовательностей, поскольку их значительно больше, чем взаимортогональных, и цифровых компенсаторов взаимного влияния каналов связи. Однако использование квазиортогональных кодовых последовательностей приводит к значительному аппаратному усложнению аппаратуры связи [3].

Оптимальное решение современных боевых задач требует не только огромного потока информации внутри радиосети, но и адаптивного управления скоростью информационного обмена на каждом участке наведения. До непосредственного выполнения этапа атаки достаточен темп обновления информации в 10 с. Однако на конечном этапе атаки темп обновления должен быть увеличен и составлять не более 1 с. Радиосети TDMA позволяет управлять темпом обновления информации индивидуально для каждого ЛА [32]. Если к каким-то абонентам радиосети необходимо более частое обращение, то в цикле их временные окна размещаются чаще, чем у абонентов с более низким темпом обновления информации.

Применение на АК РЛДН и ЛА антенн на базе АФАР с узкими электронно-управляемыми диаграммами, позволяет организовать для определенной группы выделенных абонентов радиосети, находящихся в раскрыве диаграммы направленности антенны, отдельный кластер и обеспечить в нем информационный обмен с максимально возможной для данного кластера скоростью, без уменьшения скорости информационного обмена в остальной части радиосети. При управлении от АК РЛДН индивидуальных ЛА таким же образом может быть реализован режим «точка-точка», при котором достигается максимально возможная скорость информационного обмена излучения [3].

Важным свойством системы управления ЛА является скрытность. Обычно различают пространственную, энергетическую и имитационную скрытность.

Пространственная скрытность обеспечивается применением узконаправленных антенн с электронным управлением диаграммой направленности при помощи, например, АФАР или адаптивной антенной решетки (ААР). Обнаружить факт их излучения на больших расстояниях можно только при ориентации основного луча на разведприемник на малых расстояниях по боковому или фоновому излучению, которое обычно ослаблено на 20-30 дБ. При быстром и особенно хаотичном переключении направлений излучения обнаружение становится еще более затруднительным. Применение ААР антенн, позволяющих формировать цифровым способом нули в диаграмме направленности, ориентированные на источники радиоэлектронного подавления, еще больше затрудняют обнаружение факта излучения [3].

Энергетическая скрытность обеспечивается применением сигналов с большой базой за счет использования методов расширения спектра излучения с целью снижения его спектральной плотности ниже уровня шумов. Обнаружение таких сигналов собственным приемником осуществляется автокорреляционным методом поиска по частоте и задержке известного по форме сигнала. Для приема таких сигналов используется метод согласованной фильтрации. Поскольку форма сигнала разведприемнику неизвестна, то он реализует его об-

наружение энергетически, а поскольку спектральная плотность такого сигнала меньше плотности шума, то обнаружение факта излучения становится серьезной проблемой. К сожалению, данный метод в двоичных системах применим только к низкоскоростным системам связи, поскольку при увеличении базы сигнала спектр излучения расширяется в пропорциональное количество раз по сравнению с информационной полосой. Для решения этой проблемы в высокоскоростных системах применяют m -ичные методы передачи, при которых расширяющие ПСП замещают не двоичный элемент, а m -ичный. Для повышения эффективности обнаружения таких сигналов разведприемником, применяют различные переборные методы определения формы расширяющей ПСП, что требует больше времени на обнаружение [3].

Имитационная скрытность обычно обеспечивается применением длинных расширяющих ПСП с нелинейной структурой или периодического изменения формы ПСП, что не позволяет определить структуру сигнала в произвольный момент времени. В радиосети для преобразования произвольного канала в канал с биномиальным распределением ошибок применяются различные виды перемежения кодовых символов в радиоканале, которые можно использовать для имитационной скрытности. Применение псевдослучайного закона перемежения, который изменяется в каждом временном окне по другому псевдослучайному закону, создает практическую невозможность вскрытия информации без знания этих законов и их временной привязки [3].

Включение в состав радиосети самого АК РЛДН, как элемента управления и источника координатной поддержки, позволяет осуществлять передачу команд управления и координаты каждому ЛА группы индивидуально, что существенно уменьшает задержки доставки информации и позволяет оператору АК РЛДН управлять каждым ЛА группы индивидуально и одновременно всей группой. Знание каждым ЛА своих координат и взаимный обмен ими позволяет осуществить взаимную ориентацию антенн каждого самолета друг на друга и на АК РЛДН [3].

Гарантированное закрытие информации на уровне источника обеспечивается программно-аппаратными средствами криптографической защиты информационного обмена, путем шифрования информации источника криптографическими ключами. Применение криптографической защиты обеспечивает техническое закрытие доступа к информации, циркулирующей в радиосети [3].

Применение режима радиоэлектронной защиты основано на псевдослучайном изменении параметров излучения, например, рабочей частоты, т. е. применении метода псевдослучайной перестройки рабочей частоты ППРЧ [35]. Используя очень длинную ПСП для формирования закона ППРЧ и уменьшая длительность использования каждой частоты, можно вынудить противника отказаться от вскрытия закона ППРЧ или постановки ретранслированной помехи вслед и перейти к более энергоемкой заградительной помехе.

Для повышения достоверности и скрытности информационного обмена необходимо решить, как минимум, две задачи [3]:

- 1) удостовериться, что это нужный абонент;

- 2) определить координаты нужного абонента для осуществления целенаправленной передачи и приема.

Для решения этих задач используются различные виды идентификации.

Идентификация ЛА по первичному признаку использует запросно-ответный метод «свой-чужой» с применением аппаратуры активного запроса и ответа (гос. опознавания). Совместное функционирование системы передачи команд (СПК) и системы активного запроса и ответа (САЗО) рассмотрены в [36]. Идентификация ЛА по вторичным признакам позволяет выполнить операцию отождествления путем сравнения координат и других параметров полета ЛА, измеренных АК РЛДН, с координатами, полученными от самих ЛА в результате радиосетевого информационного обмена. При этом для обеспечения надежности идентификации и требуемой степени доверия информации, получаемой от этих ЛА, учитываются результаты контроля качества каналов связи с каждым ЛА и вероятность подавления средствами РЭП линий и сетей радиосвязи [6, 33, 35, 37-39].

Взаимное опознавание ЛА на основе координатно-связного принципа основано на привязке каждого ЛА радиосети к текущему времени и к координатам таким образом, что ЛА будет находиться в каждый дискретный момент времени в ограниченной области пространственно временных координат. Далее алгоритмически, зная тактико-технические возможности ЛА и результаты информационного обмена с ним, вычисляется вероятность его нахождения в данной области пространства. Если эта вероятность больше некоторого порогового значения, то информация, поступающая от данного ЛА, считается достоверной с учетом качества канала связи и вероятности поражения его средствами РЭП [6]. Комплекс всех этих мер защиты информации позволяет с высокой степенью достоверности отличить свой ЛА от чужого ЛА, убедиться в его управляемости от своего АК РЛДН и в степени достоверности получаемой от него информации [3].

Для решения этих задач организации сетецентрического управления группой ЛА или БПЛА необходимо применение высокоскоростного внутригруппового информационного обмена внутри группы по принципу «каждый – с каждым». Такой информационный внутригрупповой обмен реализуется с помощью полносвязной радиосети. Полносвязная радиосеть информационного обмена за счет большой избыточности внутригрупповых связей позволяет обеспечить более высокую вероятность доставки информации абонентам такой радиосети, чем вероятность доставки сообщения между абонентами, не объединенными в радиосеть. Актуальность исследования полносвязных радиосетей заключается в оптимизации информационной загрузки радиосети и процесса информационного обмена в ней, а также оптимизации их топологии к условиям применения средств РЭП [6, 40, 41]. При этом наиболее перспективным способом построения полносвязной радиосети воздушного обмена, реализующего как сетецентрические принципы управления, так и устойчивый информационный обмен в условиях РЭП является применение Mesh-технологий [27, 42-44].

Как показано в работе [6] современные средства РЭП являются высокодинамичными и постоянно адаптируются под сложившуюся ситуацию. В таких условиях на АК РЛДН необходим постоянный контроль устойчивости радиосети в изменяющейся помеховой обстановке. В связи с непредсказуемостью радиоэлектронных атак противника система связи АК РЛДН должна в реальном времени находить зоны уверенной связи при всех видах информационного обмена, в том числе с ПУ, наилучшие с точки зрения обеспечения связи при выбранных траекториях барражирования АК РЛДН и полета ЛА в зону, выполнения боевых задач, а также участки поражения зон связи средствами РЭП, осуществлять прогноз качества каналов связи и выдавать рекомендации по адаптации системы связи к текущим условиям боевого применения ЛА и БПЛА при управлении ими с АК РЛДН [3].

Выводы

Основой современного подхода к управлению авиацией на неподготовленных, с точки зрения поля управления, ТВД за пределами территории РФ является АК РЛДН. Данный авиационный комплекс, используя в качестве воздушного ПУ, способен обеспечить различные способы боевого применения авиации и методы наведения на воздушные и наземные цели.

Дальнейшими направлениями развития системы управления на основе АК РЛДН является:

- совершенствование способов группового управления ЛА и БПЛА;
- совершенствование способов автономных и полуавтономных действий БПЛА на основе организации «интеллектуального роя»;
- совершенствование системы управления ЛА и БПЛА за счет перехода ее к сетевым принципам;
- совершенствование системы информационного обеспечения применения авиации за счет перехода от иерархических к децентрализованным радиосетям, построенным на основе Mesh-технологий.

Литература

1. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунцов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. — 816 с.
2. Антонов Д. А., Бабич Р. М., Балыко Ю. П., Белоглазов И. Н., Бернинский Е. Я., Борисов Л. В., Виноградов С. М., Войтенко В. И., Герасимов А. А., Гузев Б. Н., Доценко А. В., Жеребин А. М., Зайцев А. В., Зинич В. С., Инсаров В. В., Кислицын В. А., Кичигин Г. Г., Колпаков К. М., Корниенко В. Н., Кравченко В. С., Кульчак М. Г., Махов Е. А., Немыченков И. В., Попов В. А., Пухов А. Л., Селезнев И. С., Сорокин Ю. Н., Топорков Н. В., Федосов Е. А., Червин В. И. Авиация ВВС России и научно-

технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

3. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

4. Канащенков А. И., Меркулов В. И. Герасимов Л. А. и др. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. В 3 т. Том 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Полиграфист. 2006. – 655 с.

5. Меркулов В. И., Канащенков А.И., Перов А. И., Саблин В. Н. Дрогалин В. В., Герасимов А. А., Горгонев Г. И., Лепин В. Н., Петров В. В., Самарин О. Ф., Сирота О. А., Харьков В. П. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах Ч. 1 / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.

6. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетцентрических войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2017. – 546 с.

7. Дрожжин А. И., Алтухов Е. В. Воздушные войны в Ираке и Югославии. – М.: Техника молодежи, 2002. – 80 с.

8. Меркулов В. И. Улучшение разрешающей способности бортовой РЛС по углу путем траекторного управления наблюдением // Радиотехника. 2003. № 1.

9. Ануфриев О. Н., Герасимов А. А., Меркулов В. И., Самарин О. Ф., Чернов В. С. Ударные беспилотные летательные аппараты и их радиолокационные системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7.

10. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

11. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.

12. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

13. Меркулов В. И., Дрогалин В. В., Канащенков А. И., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа /

Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

14. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. 2009. – 280 с.

15. Меркулов В. И., Харьков В. П. Формирование заданной конфигурации сложной распределенной системы управления // Радиотехника. 2011. № 6. С. 96-101.

16. Верба В. С., Капустин С. Г., Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация радиоэлектронных систем управления. Методы и алгоритмы синтеза оптимального управления. Часть 1. Классификация методов решения задачи оптимального управления. Метод динамического программирования. Принцип максимума Понтрягина // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 12. С. 3-16.

17. Верба В. С., Капустин С. Г., Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация радиоэлектронных систем управления. Методы и алгоритмы синтеза оптимального управления. Часть 2. Прикладные методы и алгоритмы теории оптимального управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 3. С. 3-18.

18. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.

19. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.

20. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетевых боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.

21. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетевых концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. – 2008. № 12. С. 63-74.

22. Кондратьев А. Е. Реализация концепции сетевых войн в ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 44-49.

23. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетевых технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник Академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.

24. Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалин В. В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы / под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2012. – 504 с.

25. Антипов В. Н., Исаев С. А., Лавров А. А., Меркулов В. И. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей. – М.: Воениздат, 1994.

26. Первачев С. Р., Перов А. И. Адаптивная фильтрация сообщений. М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.

27. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

28. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Богачев А. С., Забелин И. В., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Сарычев В. А., Соловьев А. А., Турнецкий Л. С., Чернов В. С., Шуклин А. И. Авиационные системы радиоуправления. Том 2. Радиоэлектронные системы самонаведения / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 391 с.

29. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов / под общ. ред. С. И. Макаренко. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

30. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

31. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.

32. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

33. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления, 2010, № 6 (65). С. 807-815.

34. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. №1. С. 67-97. – URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

35. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.

36. Вербя В. С. Авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения как элемент сетецентрической информационно-управляющей системы // Радиотехника. 2014. №5. С. 15-20.

37. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2-2. - URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата обращения 03.10.2017).

38. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих

факторов / Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата обращения 03.10.2017).

39. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (дата обращения 03.10.2017).

40. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69-79.

41. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3(48). С. 93-101.

42. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 7-16.

43. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том 7. № 1. С. 17-25.

44. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

References

1. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

2. Antonov D. A., Babich R. M., Balyko Iu. P., Beloglazov I. N., Berninskii E. Ia., Borisov L. V., Vinogradov S. M., Voitenko V. I., Gerasimov A. A., Guzeev B. N., Dotsenko A. V., Zherebin A. M., Zaitsev A. V., Zinich V. S., Insarov V. V., Kislitsyn V. A., Kichigin G. G., Kolpakov K. M., Kornienko V. N., Kravchenko V. S., Kul'chak M. G., Makhov E. A., Nemychenkov I. V., Popov V. A., Pukhov A. L., Seleznev I. S., Sorokin Iu. N., Toporkov N. V., Fedosov E. A., Chervin V. I. *Aviatsiia VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Aviation of the Russian air

force and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).

3. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

4. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I., Gerasimov L. A. and etc. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsional'nykh samoletov. Tom 1. RLS – informatsionnaia osnova boevykh deistvii mnogofunktsional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [The radar system of multifunctional aircraft. In 3 volumes. Volume 1. Radar – information-based fighting multifunctional aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Poligrafist Publ., 2006. 655 p. (in Russian).

5. Merkulov V. I., Kanashchenkov A. I., Perov A. I., Sablin V. N., Drogalin V. V., Gerasimov A. A., Gorgonov G. I., Lepin V. N., Petrov V. V., Samarin O. F., Sirota O. A., Khar'kov V. P. *Otsenivanie dal'nosti i skorosti v radiolokatsionnykh sistemakh Ch. 1* [Estimation of range and speed in radar systems, Part 1]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 312 p. (in Russian).

6. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentrisheskikh voynakh nachala XXI veka. Monografiia* [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

7. Drozhzhin A. I., Altukhov E. V. *Vozdushnye voyny v Irake i Iugoslavii* [Air war in Iraq and Yugoslavia]. Moscow, Tekhnika molodezhi Publ., 2002. 80 p. (in Russian).

8. Merkulov V. I. Uluchshenie razreshaiushchei sposobnosti bortovoi RLS po uglu putem traektorного управления nabliudeniem [Improving the resolution of the onboard radar in the corner by trajectory control monitoring]. *Radiotekhnika*, 2003, no. 1 (in Russian).

9. Anufriev O. N., Gerasimov A. A., Merkulov V. I., Samarin O. F., Chernov V. S. *Udarные беспилотные летательные аппараты i ikh radiolokatsionnye sistemy* [Percussion unmanned aerial vehicles and radar systems]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2007, no. 7 (in Russian).

10. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

11. Merkulov V. I., Gandurin V. A., Drogalin V. V. and etc. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aircraft systems control]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008.

12. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

13. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

14. Kalyayev I. A., Gaiduk A. R., Kapustin S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. (in Russian).

15. Kharkov V. P., Merkulov V. I. Formation of Specific Spatial Configuration of Complex Distributed Control System. *Radiotekhnika*, 2011, no. 6, pp. 96-101 (in Russian).

16. Verba V. S., Kapustyan S. G., Merkulov V. I., Khar'kov V. P. Optimisation of radio-electronic control systems. Synthesis of optimal control Classification of method of solution of optimal control problem. Dynamic programming. Pontryagin's maximum principle. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 12, pp. 3-16 (in Russian).

17. Verba V. S., Kapustyan S. G., Merkulov V. I., Khar'kov V. P. Optimisation of radio-electronic control systems. Synthesis of optimal control. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 3-18 (in Russian).

18. Kharkov V. P., Merkulov V. I. Synthesis of an algorithm of hierarchical control of UAVs group. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 61-67 (in Russian).

19. Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Conceptual aspects of group application of unmanned aerial vehicles. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 8-16 (in Russian).

20. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiakh [Organization of information exchange in network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

21. Kondratev A. E. Obshchaia kharakteristika setevykh arkhitektur, primeniaemykh pri realizatsii perspektivnykh setetsentricheskikh kontseptsii vedushchikh zarubezhnykh stran [General characteristics of the network architectures used in the implementation of promising network-centric concepts of leading foreign countries]. *Military Thought*, 2008, no. 12, pp. 63-74 (in Russian).

22. Kondratev A. E. Realizatsiia kontseptsii setetsentricheskaia voina v VVS SShA [Implementation of the concept of network-centric warfare in the U.S. air force]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 5, pp. 44-49 (in Russian).

23. Makarenko S. I. Berezhnov A. N. Perspektivy ispol'zovaniia setetsentricheskikh tekhnologii upravleniia boevymi deistviiami i problemy ikh vnedreniia v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii [Prospects of using

network-centric technologies for the management of the fighting and problems of their implementation in the armed forces of the Russian Federation]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 64-68 (in Russian).

24. Iarlykov M. S., Bogachev A. S., Merkulov V. I., Drogalin V. V. *Radioelektronnye komplekсы navigatsii, pritselivaniia i upravleniia vooruzheniem letatel'nykh apparatov. Tom 1. Teoreticheskie osnovy* [Radio-Electronic systems of navigation, sighting and weapons control aircraft. Vol. 1. Theoretical foundations]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 504 p. (in Russian).

25. Antipov V. N., Isaev S. A., Lavrov A. A., Merkulov V. I. *Mnogofunktsional'nye radiolokatsionnye komplekсы istrebitelei* [Multifunction radar complexes fighters]. Moscow, Voenizdat Publ., 1994. (in Russian).

26. Pervachev S. R., Perov A. I. *Adaptivnaia fil'tratsiia soobshchenii* [Adaptive filtering of messages]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1991. 160 p. (in Russian).

27. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using Mesh technology in interworking systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

28. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Bogachev A. S., Zabelin I. V., Lepin V. N., Samarin O. F., Sarychev V. A., Solov'ev A. A., Turnetskii L. S., Chernov V. S., Shuklin A. I. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 2. Radioelektronnye sistemy samonavedeniia* [Aircraft radio system. Volume 2. Electronic guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 391 p. (in Russian).

29. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy svyazi* [Communication systems]. Voronezh, Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 2011. 285 p. (in Russian).

30. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Otsenka effektivnosti setei vozduшной radiosvazi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa [Evaluation of the Effectiveness of the Networks to Air Radio Communications Using Different Algorithms for Multiple Access]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

31. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Modeli setei radiosvazi, ispol'zuiushchie razlichnye algoritmy mnozhestvennogo dostupa [Model Radio Communications Networks that use Different Algorithms for Multiple Access Telecommunications]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

32. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosvazi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

33. Makarenko S. I. Issledovanie vliianiia prednamerennykh pomekh na vozmozhnosti po retransliatsii soobshcheniia i pokazateli kachestva obsluzhivaniia

kanal'nogo urovnia modeli OSI dlia sistemy sviazi so sluchainym mnozhestvennym dostupom abonentov [The Study of the Influence of Intentional Interference at the Relay Capabilities of the Message and the Quality of Service Link Layer of the OSI Reference Model for Communication Systems with Random Multiple Access Subscribers] *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 65, no. 6, pp. 807-815 (in Russian).

34. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

35. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastoty. Monografija* [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

36. Verba V. S. Airborne warning and control systems as part of network-centric information management system. *Radiotekhnika*, 2014, no. 5, pp. 15-20 (in Russian).

37. Makarenko S. I. The Countermeasures of the Radio Networks with the Random Multiple Access by Changing the Radionet State to Non-Stable. *Radio electronics journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (accessed 03 October 2017) (in Russian).

38. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Radio Electronics Journal*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 03 October 2017) (in Russian).

39. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. Issledovanie kanal'nykh i setevykh parametrov kanala sviazi v usloviakh dinamicheskoi izmeniaiushcheisya signal'no-pomekhovoi obstanovki [The Research of Data Link Layer and Network Layer Parameters of Communication Channel in the Conditions Dynamic Vary of the Signal and Noise Situation]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (03 October 2017) (in Russian).

40. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (In Russian).

41. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mihaylov R. L., Ushanev K. V. New means of destructive effects on network centric military command, control and communication systems in the information space. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).

42. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united air-space network with decentralized traffic routing based on Mesh technology. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 7-16 (in Russian).

43. Aganesov A. V., Makarenko S. I. The traffic balancing method between aero and space segments in aerospace network based on Mesh-technology. *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17-25 (in Russian).

44. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

Статья поступила 17 октября 2017 г.

Информация об авторе

Смирнов Сергей Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: маршрутизация трафика, воздушные сети радиосвязи, Mesh-технологии. E-mail: web-shark@mail.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

The Analysis of Ways and Means to Control the Aircrafts from AWACS

Smirnov S. V.

Relevance. At the present time, aerospace forces of Russia are applied outside of Russia. In this case, main of task is to control the aircrafts when ground control stations are not available. For this reason the airborne warning and control system (AWACS) is used as an air command post to control the aircrafts. The aim of paper is to analyse the ways and means to control the aircrafts from AWACS, as well as the formation of proposals for the further development of AWACS control system. **Results and their novelty.** Elements of novelty of the paper are results of analysis of guidance methods and controls aircrafts from AWACS. So the analysis showed that the modern trend in the development of AWACS control system is control as manned aircrafts, as unmanned aerial vehicles (UAVs). Moreover, to control the UAV is characterized by solution of a new class of problems associated with managing on basis of principle of "intelligent swarm" and the implementation of semi-autonomous and autonomous control. Also the actual direction of research is to develop air radio full-networks that can be used to implement network-centric control from AWACS and have increased resistance from jamming. **Practical significance.** The analysis presented will be useful technical and military experts to justify the new methods of combat use of aircrafts outside the territory of Russia, and also for justification of new technical systems of control and communication for AWACS.

Keywords: control system, aircraft, UAVs, communications system, command radio link, airborne warning and control system, network of air communication

Information about Author

Sergei Vladimirovich Smirnov - Doctoral Student. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force "Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin". Field of research: traffic routing, air communication networks, Mesh-networks. E-mail: web-shark@mail.ru

Address: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

УДК 62–50; 519.7; 519.8

Интервальные уравнения и моделирование неопределенных систем

Левин В. И.

Актуальность. При моделировании технических, экономических, социальных систем часто возникает необходимость решения уравнений с интервально-определенными параметрами (интервальные уравнения). Решение таких уравнений требует специальных методов, отличных от методов решения обычных, детерминированных уравнений. В работе предложен новый метод решения интервальных уравнений, основанный на аппарате интервальной математики. **Цель.** Целью работы является разработка полностью формализованного метода решения интервальных уравнений, базирующегося на упомянутом математическом аппарате. **Метод.** Предложенный в статье метод заключается в использовании эквивалентных преобразований обеих частей интервального уравнения по законам интервальной математики, позволяющих перейти от интервального уравнения к обычным детерминированным уравнениям и их последующему решению известными методами. **Результат.** Показано, что решение разнообразных интервальных уравнений можно выполнить двумя различными методами: множественным и интервальным. Выявлены различия между этими двумя методами в понятии решения уравнения, в используемом математическом аппарате, в возможности точного решения, в мощности получаемого множества решений. Приведен пример решения двумя методами интервального уравнения, используемого при расчете зоны загрязнения опасным веществом. **Выводы.** В статье предложен новый подход к решению интервальных уравнений, основанный на эквивалентном преобразовании уравнения по законам интервальной математики. Такое преобразование позволяет привести уравнение к детерминированному виду, что дает возможность решить его хорошо известными методами решения обычных (детерминированных) уравнений. Предложенный подход позволяет находить точное решение интервального уравнения (если оно существует) или его приближенное решение (если точного решения не существует).

Ключевые слова: интервал, интервальная функция, интервальное уравнение, множественный метод, интервальный метод.

Введение

Современная наука и практика успешно справляются с задачами исследования систем с полностью определенными параметрами. Они формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза различных функций с детерминированными параметрами, служащих характеристиками изучаемых систем. Но на практике чаще встречаются системы с неполностью определенными параметрами. Причины появления таких систем – естественная неопределенность реальных процессов, происходящих в системах; неточное задание параметров большинства систем из-за погрешности при их вычислении или измерении; изменение во времени параметров систем; необходимость совместного исследования семейств однотипных систем, имеющих сходные функции-характеристики и раз-

Библиографическая ссылка на статью:

Левин В. И. Интервальные уравнения и моделирование неопределенных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 101-112. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/04-Levin.pdf>

Reference for citation:

Levin V. I. Interval Equations and Modelling of Uncertain Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 101-112. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/04-Levin.pdf>

личающихся лишь значениями параметров этих функций. Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих характеристиками данных систем. Эти задачи сложнее их упомянутых выше детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными параметрами. Это усложнение – результат того, что алгебра недетерминированных чисел всегда сложнее алгебры детерминированных чисел.

В настоящей работе рассматриваются задачи нахождения корней интервальных уравнений. Эти уравнения отличаются от обычных (полностью определенных) уравнений тем, что их параметры – неполностью определенные и задаются в виде интервалов возможных значений. Интервальные уравнения встречаются на практике, например, в задачах оптимизации систем в условиях неопределенности, при нахождении критических точек характеристик и точек пересечения характеристик неполностью определенных (эмпирических) моделей и т. д.

1. Постановка задачи

Рассмотрим обычное (детерминированное) уравнение с одной переменной

$$f(P, x) = 0. \quad (1)$$

Здесь f – некоторая детерминированная функция, x – детерминированная переменная, P – детерминированный вектор параметров вида

$$P = (p, q, \dots, s). \quad (2)$$

Если заменить в уравнении (1) детерминированный вектор параметров P вектором параметров $\tilde{P}$ вида

$$\tilde{P} = (\tilde{p}, \tilde{q}, \dots, \tilde{s}),$$

где $\tilde{p} = [p_1, p_2]$, $\tilde{q} = [q_1, q_2]$, ..., $\tilde{s} = [s_1, s_2]$ – интервальные параметры, то детерминированная функция f перейдет в соответствующую интервальную функцию $\tilde{f} = [f_1, f_2]$, а вещественное число 0 – в соответствующее интервальное число $\tilde{0} = [0, 0]$. В результате детерминированное уравнение (1) перейдет в интервальное уравнение вида

$$\tilde{f}(\tilde{P}, x) = \tilde{0}. \quad (3)$$

Уравнение (3) и будет объектом нашего изучения. Основной задачей этого изучения является нахождение корня (множества корней) уравнения (3), т. е. значений переменной x , которые обращают значение левой части уравнения в значение его правой части, т. е. в интервальный нуль $\tilde{0}$. Эта задача, в отличие от задачи решения обычного уравнения, носит неоднозначный характер. Это связано с тем, что пересечение интервальных кривых, определяющее корни интервального уравнения (3), может пониматься в различных смыслах. Этот эффект не возникает при пересечении обычных кривых, с которым связано решение обычного уравнения.

2. Обзор литературы

Хотя необходимость решения интервальных и других неточно определяемых (стохастических, нечетких и т. д.) уравнений возникает достаточно часто на практике [1-5], систематическое изучение таких уравнений и методов их решения началось сравнительно недавно. По-видимому, первое упоминание об интервальных уравнениях и методах их решения появилось в книге [6]. В этой работе использован множественный подход, при котором интервальное уравнение (3) рассматривается как множество образующих его обычных уравнение (1), получаемых при варьировании их параметров P в границах заданных интервальных параметров $\tilde{P}$. При этом множество решений интервального уравнения получается как множество решений указанных, образующих его обычных уравнений. Аналогичный подход используется в работе [7] для решения конкретного интервального уравнения, возникающего в важной прикладной задаче расчета длины опасной зоны загрязнения поверхности токсичным веществом. Краткий обзор различных ситуаций, возникающих при решении практических задач с помощью указанного подхода, приведен в работе [8]. При этом рассматриваются как ситуации, моделируемые уравнениями с одним корнем, так и ситуации, моделируемые уравнениями с двумя или несколькими корнями. Наконец, в книге [9] был предложен другой, чисто интервальный подход к решению интервальных уравнений вида (3), при котором такое уравнение рассматривается не как множество обычных уравнений вида (1), а как одно уравнение, имеющее интервальные параметры и потому подчиняющееся законам интервальной математики. Использование этих законов позволяют совершать эквивалентные преобразования интервального уравнения, упрощая его и приводя к детерминированному виду, из которого непосредственно вытекает его решение. Таким образом, предложенные в литературе подходы к решению интервальных уравнений существенно различаются по определению того, что считать решением уравнения, и по используемому математическому аппарату. Кроме того, они различаются по своим возможностям в отыскании корней уравнений. В частности, чисто интервальный подход, в отличие от множественного подхода, не всегда обеспечивает существование точного решения интервального уравнения. Однако отсутствие точного решения такого уравнения является не недостатком интервального подхода, а следствием неопределенности задачи, выражающейся в задании параметров уравнения с точностью лишь до интервалов возможных значений [10, 11].

Ближкие проблемы теории и приложений интервальной математики обсуждаются в работах [12, 13]. Специальные вопросы, связанные с решением линейных систем интервальных уравнений, изучаются в работе [14]. Предложен новый алгоритм решения, обобщающий алгоритм Гаусса-Зейделя. В работе [15] рассматривается проблема существования решения систем линейных интервальных уравнений. Для нахождения решения предложен метод максимизации распознавания функционала множества решений.

3. Множественный подход

Будем решать интервальное уравнение (3), используя множественный подход. Рассмотрим первый случай, когда последней операцией в левой части уравнения является сложение. Тогда уравнение (3) можно представить в виде

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) + \tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0}, \quad (4)$$

где $\tilde{f}_A = [f_{A_1}, f_{A_2}]$, $\tilde{f}_B = [f_{B_1}, f_{B_2}]$ – новые по отношению к $\tilde{f}$ интервальные функции тех же переменной x и вектора параметров $\tilde{P}$. Обозначив $-\tilde{f}_B = \tilde{f}_C$, уравнение (4) можно переписать в виде

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) = \tilde{f}_C(\tilde{P}, x). \quad (5)$$

Поскольку интервальные функции в левой и правой части уравнения (5) графически представляются в виде интервальных кривых, решение этого уравнения сводится к нахождению пересечения двух интервальных кривых, т. е. к нахождению множества Ω точек (области), принадлежащих обеим интервальным кривым. В этом, очевидно, и проявляется множественный подход к решению интервальных уравнений. При этом собственно решением интервального уравнения (5) является не само указанное выше множество Ω , а его проекция Ω_x на ось X .

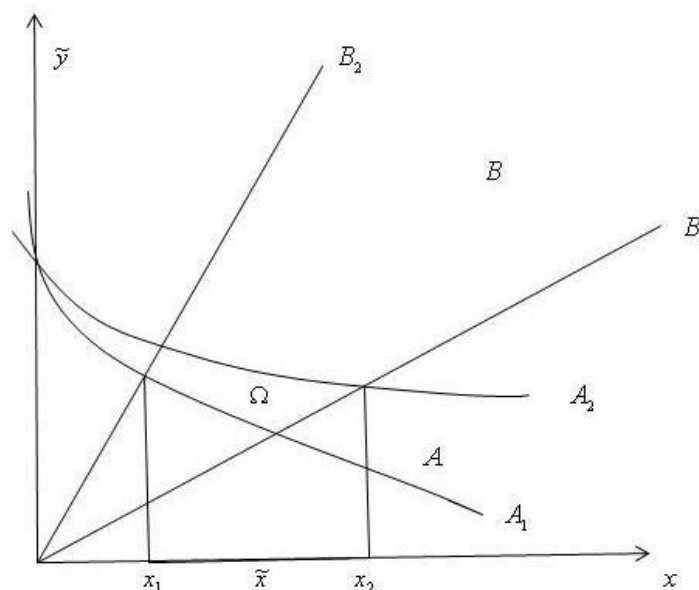
Детали множественного алгоритма нахождения решения интервального уравнения проще показать на примере решения уравнения с одним корнем.

Пример 1. Найти решение интервального уравнения $e^{-\tilde{P} \cdot x} = \tilde{q}x$ с интервальными параметрами $\tilde{P} = [p_1, p_2]$, $\tilde{q} = [q_1, q_2]$. Это уравнение используется при расчете длины опасной зоны загрязнения поверхности токсичным веществом. Графическое изображение интервальных кривых, представляющих функции левой и правой частей заданного уравнения, показаны на рис. 1.

Из рисунка видно, что единственная область Ω , являющаяся общей частью обеих интервальных кривых, расположена между крайней левой точкой x_1 и крайней правой точкой x_2 . Так что проекция Ω_x области Ω на ось X , являющаяся искомым единственным решением уравнения, имеет вид интервала $\tilde{X} = [x_1, x_2]$. Причем, как видно из рис. 1, левая граница x_1 этого решения есть точка пересечения кривых A_1 и B_2 , т. е. решение обычного детерминированного уравнения $e^{-p_2 \cdot x} = q_2 x$, а правая граница x_2 этого решения есть точка пересечения кривых A_2 и B_1 , т. е. решение обычного уравнения $e^{-p_1 \cdot x} = q_1 x$. Таким образом для решения заданного интервального уравнения достаточно решить два указанных обычных уравнения.

Пусть, например, надо найти решение конкретного интервального уравнения $e^{-[0,5;0,7] \cdot x} = [2,3]x$. Тогда для нахождения левой границы решения x_1 надо решить детерминированное уравнение $e^{-0,7 \cdot x} = 3x$, а для нахождения правой границы x_2 - детерминированное уравнение $e^{-0,5 \cdot x} = 2x$. Решая эти уравнения численным методом, находим $x_1 = 0,275$, $x_2 = 0,408$. Отсюда решение заданно-

го конкретного интервального уравнения получается в виде $\tilde{x} = [x_1, x_2] = [0,275; 0,408]$.



A – интервальная кривая $\tilde{y} = e^{-\tilde{p} \cdot x}$, где $\tilde{p} = [p_1, p_2]$;

B – интервальная кривая $\tilde{y} = \tilde{q}x$, где $\tilde{q} = [q_1, q_2]$;

A_1 – детерминированная кривая $y = e^{-p_1 \cdot x}$;

A_2 – детерминированная кривая $y = e^{-p_2 \cdot x}$;

B_1 – детерминированная кривая $y = q_1 x$;

B_2 – детерминированная кривая $y = q_2 x$;

Ω – пересечение интервальных кривых A и B

$x^* = [x_1, x_2]$ – проекция Ω на ось X – решение интервального уравнения

$$e^{-\tilde{p} \cdot x} = \tilde{q}x$$

Рис. 1. Графическое представление решения интервального уравнения множественным методом

Если задано интервальное уравнение, имеющее два или более корней, его решение производится путем последовательного вычисления этих корней, с использованием алгоритма, примененного выше в примере 1.

Мы рассмотрели процедуру решения с помощью множественного подхода интервального уравнения вида (3) в случае, когда последней операцией в левой части уравнения является сложение. В случае, когда последней операцией в левой части является умножение, уравнение (3) можно представить как

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) \cdot \tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0} \quad (6)$$

с теми же функциями $f_A = (\circ)$, $f_B = (\circ)$, что и в формуле (4). Уравнение (6) можно разбить на пару уравнений

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) = \tilde{0} \text{ или } \tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0}, \quad (7)$$

в левых частях которых последней операцией является сложение. Благодаря этому уравнения (7) можно решить с помощью алгоритма, изложенного выше.

4. Интервальный подход

Будем решать интервальное уравнение (3), используя интервальный подход. Этот подход основан на эквивалентных преобразованиях обеих частей интервального уравнения с помощью подходящих законов интервальной математики. В результате таких преобразований левая и правая части интервального уравнения приводятся к явному виду интервала, а все интервальное уравнение – к явному интервальному виду

$$[f_1(P_f, x), f_2(P_f, x)] = [\varphi_1(P_\varphi, x), \varphi_2(P_\varphi, x)], \quad (8)$$

где $f_1, f_2, \varphi_1, \varphi_2$ – детерминированные функции переменной x , а P_f, P_φ – векторы параметров вида (2). От (8), приравняв нижние границы левого и правого интервалов, а также их верхние границы, получаем систему из двух обычных (детерминированных) уравнений, которая эквивалентна исходному интервальному уравнению (8)

$$\left. \begin{aligned} f_1(P_f, x) &= \varphi_1(P_\varphi, x) \\ f_2(P_f, x) &= \varphi_2(P_\varphi, x) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Таким образом, решение x^* системы детерминированных уравнений (9), если оно существует, является точным решением интервального уравнения (3). Если система (9) не имеет решения, но первое и второе ее уравнения имеют решения соответственно x'_1 и x'_2 , которые близки, то можно принять $x^* \approx x'_1$ или $x^* \approx x'_2$ или, что, очевидно, лучше $x^* \approx (x'_1 + x'_2)/2$ или даже $x^* = [x'_1, x'_2]$. В остальных случаях решения системы детерминированных уравнений (9), а значит, и решения интервального уравнения (3) не существует.

В эквивалентных преобразованиях обеих частей интервального уравнения (3) для приведения его к системе (9) используются следующие законы интервальной математики

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \quad [a_1, a_2] - [b_1, b_2] = [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k[a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \\ [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] &= [\min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j)]; \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1] = [\min_{i,j} (a_i / b_j), \max_{i,j} (a_i / b_j)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Детали интервального алгоритма поиска решения интервального уравнения поясним, как и выше, на примере решения уравнения с одним корнем.

Пример 2. Найти решение интервального уравнения $e^{-\tilde{p} \cdot x} = \tilde{q}x$ с интервальными параметрами $\tilde{p} = [p_1, p_2]$, $\tilde{q} = [q_1, q_2]$. Решение данного уравнения множественным способом, с использованием графического представления интервальных кривых, было показано в примере 1. Теперь применим интервальный метод. При этом необходимость графического представления кривых от-

падает, и процедура отыскания решения интервального уравнения упрощается. Алгоритм решения следующий.

Шаг 1. Приводим левую и правую части уравнения к явному виду интервала. Учитывая, что корень уравнения $x > 0$, а функция e^x – монотонно возрастающая, с помощью (10) находим: правая часть $\tilde{q}x = [q_1, q_2] \cdot x = [q_1x, q_2x]$, левая часть $e^{-\tilde{p} \cdot x} = e^{-[p_1, p_2]x} = e^{-[p_1x, p_2x]} = e^{[-p_2x, -p_1x]} = [e^{-p_2x}, e^{-p_1x}]$

Шаг 2. Представляем все уравнение в явном интервальном виде

$$[e^{-p_2x}, e^{-p_1x}] = [q_1x, q_2x] \quad (11)$$

Шаг 3. Переходим от интервального уравнения (11) к системе двух детерминированных уравнений, приравнивая нижние границы правого и левого интервала в (11), а также их верхние границы. Получаем

$$\left. \begin{aligned} e^{-p_2x} &= q_1x \\ e^{-p_1x} &= q_2x \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Шаг 4. Решаем систему уравнений (12). Находим корни 1-го уравнения x'_1 и 2-го уравнения x'_2 . Если $x'_1 = x'_2$, то существует точное решение системы (12), которое равно $x^* = x'_1 = x'_2$. Оно же является решением заданного интервального уравнения. Если $x'_1 \neq x'_2$, то точное решение системы (12) и, соответственно, точное решение интервального уравнения не существует. Однако при $x'_1 \approx x'_2$ существует приближенное решение x^* системы (12) и интервального уравнения: $x^* \approx x'_1$ или $x^* \approx x'_2$ или $x^* \approx (x'_1 + x'_2)/2$ или $x^* = [x_1^*, x_2^*]$, где $x_1^* = \min(x'_1, x'_2)$, $x_2^* = \max(x'_1, x'_2)$. При существенно различных x'_1 и x'_2 решения системы (12) и интервального уравнения не существует.

Найдем решение того же конкретного интервального уравнения, что и в примере 1: $e^{-[0,5;0,7]x} = [2,3]x$. В данном случае система (12) приобретает вид

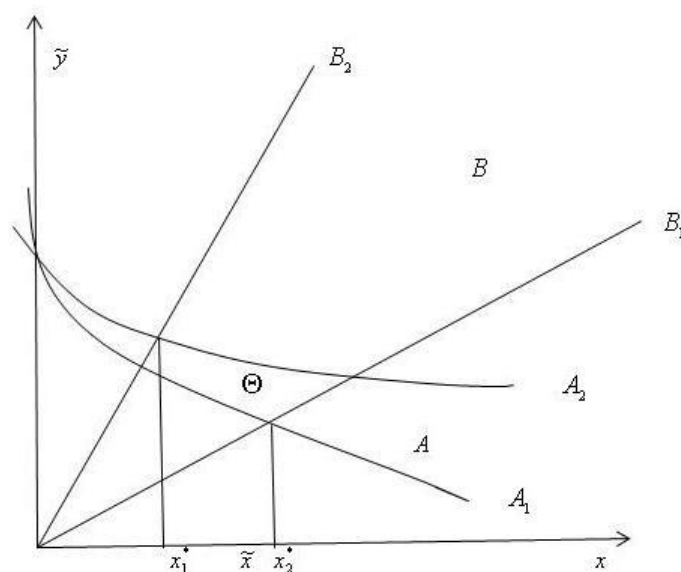
$$\left. \begin{aligned} e^{-0,7x} &= 2x \\ e^{-0,5x} &= 3x \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая 1-е и 2-е уравнения (13) численным методом, находим их решения в виде $x'_1 = 0,381$, $x'_2 = 0,289$. Здесь $x'_1 \neq x'_2$, так что точного решения системы (13) заданного интервального уравнения не существует. Однако можно считать, что $x'_1 \approx x'_2$ и потому существует приближенное их решение

$$\begin{aligned} x^* &\approx 0,381 \text{ или } x^* \approx 0,289 \text{ или } x^* \approx (0,381 + 0,289)/2 = 0,335 \text{ или} \\ x^* &= [0,289, 0,381]. \end{aligned} \quad (14)$$

Графическое изображение интервальных кривых, представляющих функции левой и правой частей рассмотренного в примере 2 интервального уравнения, показано на рис.2.

Из рис. 2 видно, что единственная область Θ , которую следует считать общей частью обеих интервальных кривых, расположена между крайней правой точкой x'_2 и крайней левой точкой x'_1 . Так что проекция области Θ на ось X , являющаяся объединенным решением заданного интервального уравнения, имеет вид интервала $x^* = [x_1^*, x_2^*]$.



A - интервальная кривая $\tilde{y} = e^{-\tilde{p} \cdot x}$, где $\tilde{p} = [p_1, p_2]$;

B - интервальная кривая $\tilde{y} = \tilde{q}x$, где $\tilde{q} = [q_1, q_2]$;

A_1 - детерминированная кривая $y = e^{-p_1 \cdot x}$;

A_2 - детерминированная кривая $y = e^{-p_2 \cdot x}$;

B_1 - детерминированная кривая $y = q_1 x$;

B_2 - детерминированная кривая $y = q_2 x$;

Θ - пересечение интервальных кривых A и B

$x^* = [x_1^*, x_2^*]$ – проекция Θ на ось X – решение интервального уравнения
$$e^{-\tilde{p} \cdot x} = \tilde{q}x$$

Рис. 2. Графическое представление решения интервального уравнения интервальным методом

Левая x_1^* и правая x_2^* границы этого решения являются соответственно точкой пересечения кривых A_2 и B_2 [т.е. решением 2-го уравнения (13)] и точкой пересечения кривых A_1 и B_1 [т.е. решением 1-го уравнения (13)].

Сравнивая рис. 1 и рис. 2, видим, что область Ω , определяющая множество решений рассмотренного интервального уравнения при множественном подходе, шире области Θ , определяющей множество решений этого уравнения при интервальном подходе. Это положение остается справедливым и для других интервальных уравнений. Оно может быть записано в виде $\Theta \subset \Omega$.

Решение с помощью интервального подхода интервальных уравнений с несколькими корнями и уравнений типа (6) (где последняя операция не сложение, а умножение) осуществляется так же, как при использовании множественного подхода.

5. Обсуждение

Выше было показано (теоретически и на конкретных примерах), что решение возникающих на практике разнообразных интервальных уравнений возможно, по крайней мере, двумя различными способами. Первый, множественный способ рассматривает интервальное уравнение как множество образующих его обычных уравнений, полученных варьированием их параметров в границах интервальных параметров интервального уравнения. При этом множество решений интервального уравнения получается как множество решений образующих его обычных уравнений. Второй, чисто интервальный способ рассматривает интервальное уравнение не как множество обычных уравнений, а как одно уравнение, имеющее, однако, интервальные параметры, подчиняющиеся законам интервальной математики. Эквивалентное преобразование интервального уравнения по этим законам приводит его к виду детерминированного уравнения, решение которого можно получить известными методами. Предложенный в данной статье чисто интервальный способ решения интервального уравнения существенно отличается от известного ранее множественного способа. Отличие есть в определении того, что считать решением интервального уравнения (при множественном подходе решением является множество всех точек пересечения интервальных функций в левой и правой частях уравнения, а при интервальном подходе – множество точек, в которых интервальные функции в левой и правой частях уравнения равны или приближенно равны): в используемом математическом аппарате (при множественном подходе это теория множеств, при интервальном подходе – интервальная математика); в возможности нахождения точного решения (при множественном подходе такое решение всегда существует и может быть найдено всегда, при интервальном подходе – не всегда). Кроме того, множество получаемых с помощью интервального подхода решений интервального уравнения всегда уже множества решений, получаемых с помощью множественного подхода, составляя его часть. Последняя особенность интервального подхода связана с тем, что в нем учитываются только часть точек, геометрически относящихся к пересечению интервальных кривых левой и правой частей уравнения. Эта особенность свидетельствует об адекватности предложенного в статье интервального подхода, проявляющейся в том, что сокращение информации об уравнении (переход от детерминированного к интервальному уравнению) приводит к размыванию его решения (переходу от единственности решения к множеству решений).

Заключение

В работе предложен новый подход к решению интервальных уравнений, основанный на эквивалентном преобразовании уравнения по законам интервальной математики, в результате чего оно приводится к детерминированному виду и может быть решено хорошо известными методами решения обычных (детерминированных) уравнений. Этот подход отличается от известного множественного подхода содержанием понятия «решение интервального уравнений» и полной формализацией процесса отыскания корней уравнения. Этот процесс строится на использовании аппарата интервальной математики, благо-

даря чему полностью исключает различные эвристические приемы, что существенно упрощает процесс решения уравнения. Важно отметить, что точные значения корней интервального уравнения при интервальном подходе могут существовать, а могут и не существовать. В первом случае эти значения можно найти. Во втором случае можно найти приближенные значения корней уравнения. Предложенный подход к решению интервальных уравнений имеет важное значение, позволяя решать разнообразные задачи, связанные с исследованием неточно известных характеристик систем в технике, экономике, социальной сфере.

Литература

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2005. – 575 с.
2. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. – М.: Мир, 1987. – 360 с.
4. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. Т. 3. № 5. С. 3-14.
5. Налимов В. В., Чернова Л. А. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 320 с.
6. Вошинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. – М.: МЭИ, София: Техника, 1989. – 226 с.
7. Gorsky V., Shvetzova-Shilovskaya T., Voschinin A. Risk assessment of Accident involving environmental high-toxicity substances // Journal of Hazardous Materials. 2000. no. 78.
8. Вошинин А. П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. 2002. Т. 68. № 1. С. 118-126.
9. Левин В. И. Интервальная математика и исследование систем в условиях неопределенности. – Пенза: ПТИ, 1998. – 68 с.
10. Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации // Информационные технологии. 2014. № 5. С. 14-21.
11. Левин В. И. Метод моделирования поведения функций с помощью раздетерминизации // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2017. № 1. С. 33-41.
12. Орлов А. И. Статистика интервальных данных // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 61-69.
13. Скибицкий Н. В. Построение прямых и обратных статических характеристик объектов по интервальным данным // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. 1. С. 87-98.
14. Хладик М. Новый оператор и способ решения линейных интервальных уравнений // arXiv.org [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1306.6739v1.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).

15. Шарый С. П., Шарая И. А. Распознавание разрешимости интервальных уравнений и его приложения к анализу данных // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 3. С.80-109.

References

1. Ventcel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005. 575 p. (in Russian).
2. Zadeh L. A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. *Information Sciences*, 1975, no 8, 9, pp. 199-249, 301-357, 43-80.
3. Alefeld G., Herzberger J. *Introduction to Interval Computation*. N.Y., Academic Press, 1983. 352 p.
4. Kantorovich L. V. O nekotorykh novykh podhodakh k vychislitel'nykh metodam i obrabotke nablyudeniy [Some new approaches to computational methods and treatment of observations]. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal*, 1962, vol. 3, no. 5, pp. 3-14. (in Russian).
5. Nalimov V. V., Chernova L. A. *Teoriya experimenta* [The theory of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 320 p. (in Russian).
6. Voschinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti* [Optimization under uncertainty]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 1989. 226 p. (in Russian).
7. Gorsky V., Shvetzova-Shilovskaya T., Voschinin A. Risk assessment of Accident involving environmental high-toxicity substances. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, no. 78.
8. Voschinin A. P. Intervalniy analiz dannykh: razvitie i perspektivy [Interval data analysis: development and prospects]. *Zavodskaya laboratoriya*, 2002, vol. 68, no. 1, pp. 118-126 (in Russian).
9. Levin V. I. *Intervalnaya matematika i issledovanie sistem v usloviyakh neopredelennosti* [Interval mathematics and the study of systems under conditions of uncertainty]. Penza, Penza Polytechnic Institute, 1998. 68 p. (in Russian).
10. Levin V. I. The Methodology of Optimization in Condition of Uncertainty by Determination Method. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 5, pp. 14-21 (in Russian).
11. Levin V. I. Method of modeling of behavior of function by dedetermination. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, no. 1, pp. 33-41 (in Russian).
12. Orlov A. I. Statistics of interval data. *Industrial Laboratory*, 2015, vol. 81, no 3, pp. 61-69 (in Russian).
13. Skibitsky N. V. Construction of direct and inverse static characteristics of objects by interval data. *Industrial Laboratory*, 2017, vol. 83, no. 1, part 1, pp. 87-98 (in Russian).
14. Khladik M. New operator and method for solving linear interval equations. *arXiv.org*, 2013. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1306.6739v1.pdf> (accessed 20 September 2017) (in Russian).

15. Shary S. P., Sharaya I. A. Recognition of the solvability of interval equations and its applications to data analysis. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, no 3, pp. 80-109 (in Russian).

Статья поступила 25 сентября 2017 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

Interval Equations and Modelling of Uncertain Systems

V. I. Levin

Relevance. In the modeling of technical, economic, social systems, it is often necessary to solve equations with interval-specific parameters (interval equations). The solution of such equations requires special methods that differ from the methods for solving ordinary, deterministic equations. A new method for solving interval equations based on the apparatus of interval mathematics is proposed. **Goal.** The aim of the work is the development of a completely formalized method for solving interval equations based on the mathematical apparatus mentioned. **Method.** The method proposed in the article consists in using equivalent transformations of both parts of the interval equation according to the laws of interval mathematics that allow one to move from the interval equation to the ordinary deterministic equations and their subsequent solution by known methods. **Result.** It is shown that the solution of various interval equations can be performed by two different methods: multiple and interval. The differences between these two methods in the concept of solving the equation, in the mathematical apparatus used, in the possibility of an exact solution, in the power of the resulting set of solutions are revealed. An example of a solution of the interval equation used in the calculation of the zone of contamination by a dangerous substance is given by two methods. **Conclusions.** The paper proposes a new approach to solving interval equations based on an equivalent transformation of the equation according to the laws of interval mathematics. Such a transformation allows us to bring the equation to a deterministic form, which makes it possible to solve it by well-known methods for solving ordinary (deterministic) equations. The proposed approach allows us to find the exact solution of the interval equation (if it exists) or its approximate solution (if there is no exact solution).

Keywords: interval, interval function, interval equation, set method, interval method.

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: 440039, Russia, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.

УДК 621.39

Описательная модель сети связи специального назначения

Макаренко С. И.

Актуальность. Ведущие технологически развитые страны активно развивают сети связи специального назначения (СС СН), функционирующие в интересах органов государственной власти, органов обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка. Основными мировыми тенденциями развития этих сетей является использование в них ресурсов сетей связи общего пользования (СС ОП), а также коммерческих протоколов связи. Ввиду того, что в коммерческой отрасли связи наблюдается качественный переход к новым сетевым технологиям (концепция NGN, пакетные технологии передачи, использование технологий виртуализации и др.) актуальным является анализ современного состояния СС СН, в части используемых в них технологий. **Целью работы** является разработка описательной модели СС СН на основе качественного анализа технологий и принципов построения СС СН. Для анализа были использованы только открытые источники. **Результаты и их новизна.** Элементом новизны работы являются выявленные общие технологические особенности построения СС СН. В частности, анализ показал следующее. Современным СС СН свойственен переход к децентрализованной сетевой структуре, которая в большей степени соответствует современным требованиям к системам государственного и военного управления. Также для современных СС СН характерен переход к гибриднему построению, когда отдельные сегменты СС ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН. Кроме того, наблюдается устойчивая тенденция отказа от использования в СС СН закрытых и специализированных протоколов связи и максимально широкое использование в СС СН коммерческих протоколов и технологий из гражданской сферы связи и телекоммуникаций. **Практическая значимость.** Представленная в работе описательная модель будет полезна техническим специалистам для обоснования новых технологических решений в области СС СН. Кроме того, данная модель будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования, для прикладного обоснования целесообразности предлагаемых ими улучшений СС СН, а также обоснования защиты СС СН от воздействий со стороны противника.

Ключевые слова: система связи, сеть связи, сеть связи специального назначения, система связи специального назначения, сеть связи общего пользования, сетевые протоколы, система военной связи, устойчивость системы связи, радиоэлектронная борьба, информационно-техническое воздействие, NGN, система управления связью.

Введение

В настоящее время стремительно развиваются телекоммуникационные технологии. Такое стремительное технологическое развитие, а также внедрение концепции сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks) и концепции глобальной информационной инфраструктуры ГИ (Global Information Infrastructure), создает предпосылки для коренного изменения архитек-

Библиографическая ссылка на статью:

Макаренко С. И. Описательная модель сети связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 113-164. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf>

Reference for citation:

Makarenko S. I. Descriptive Model of a Special Purpose Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 113-164. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/05-Makarenko.pdf> (in Russian).

туры и принципов построения сетей специального назначения. Так, концепция NGN связана с конвергенцией сетей связи и расширением диапазона предоставляемых связных услуг, а концепция GII – с образованием единого информационного пространства, в котором услуги связи дополнены другими услугами обработки информации, такими как: накопление, хранение, обработка и поиск необходимой информации. При этом отличительной особенностью сетей специального назначения является то, что с одной стороны они традиционно являются наиболее консервативным объектом в отрасли связи, а с другой стороны – они должны быть основаны на новейших достижениях этой отрасли, чтобы обеспечивать высокое качество обслуживания специальных абонентов.

Вопросам анализа функционирования сетей связи специального назначения посвящены работы: П.Н. Барашкова, А.П. Родимова, К.А. Ткаченко, А.М. Чуднова [1], И.Н. Лялюка [2], А.В. Боговика, В.В. Игнатова [3], П.А. Будко [4, 5, 47], Г.И. Линца [6, 7], А.Н. Назарова, К.И. Сычева [8], А.Е. Давыдова [9, 10, 11, 31], Г.В. Сызранцева, К.И. Лукина, Г.В. Иншина [12-15], К.Е. Легкова [16-21, 64], А.Н. Буренина [20, 21, 64], Е.Е. Исакова [22], Р.Л. Михайлова [23, 24], М.А. Шнепс-Шнеппе [25-28, 38], Н.А. Соколова [29, 49, 50, 55], Б.С. Гольдштейна [49, 50, 55], а также других ученых. При этом критический анализ проблемных вопросов, связанных с переходом СС СН на новые информационные технологии представлен в работах М.А. Шнепс-Шнеппе [25-28], Н.А. Соколова [29], В.А. Нетеса [30], а также в предыдущей работе автора [63].

Вместе с тем в данных работах не в полной мере раскрыты эволюционные процессы развития современных СС СН, не сформулирована четкая описательная модель используемых в СС СН современных протоколов и технологических решений. Решению этих задач посвящена данная работа.

Цель работы – анализ технологий и принципов построения телекоммуникационных систем и сетей связи специального назначения, а также перспектив и проблемных вопросов их развития.

Ввиду объемности материала работы он был декомпозирован на следующие подразделы.

1. Основные используемые термины и определения.
2. Сеть связи специального назначения – определение, состав, требования.
 - 2.1. Характеристика сети связи специального назначения как организационно-технической системы.
 - 2.2. Состав и структура сети связи специального назначения.
 - 2.3. Основные требования, предъявляемые к сети связи специального назначения.
3. Основные тенденции развития современных сетей связи специального назначения.
 - 3.1. Многоэшелонированное построение современных сетей связи специального назначения.

- 3.2. Широкое использование в составе сети связи специального назначения арендуемых сетевых ресурсов коммерческих операторов связи.
- 3.3. Массовое использование в современных сетях связи специального назначения технологий коммутации пакетов и коммерческих протоколов связи.
- 3.4. Построение сетей связи специального назначения в соответствии с концепцией NGN.
- 3.5. Переход от сетей связи специального назначения к инфокоммуникационным сетям специального назначения.
4. Описательная модель сети связи специального назначения – основные протоколы и технологии.
 - 4.1. Базовые протоколы технологии IP.
 - 4.2. Маршрутные протоколы.
 - 4.3. Протоколы групповой рассылки.
 - 4.4. Протоколы повышения надежности маршрутизации и доставки пакетов.
 - 4.5. Протоколы и механизмы поддержки качества обслуживания.
 - 4.6. Протоколы безопасности.
 - 4.7. Межсистемные протоколы и интерфейсы.

1. Основные используемые термины и определения

Для конкретизации понятий, рассматриваемых в статье, введем базовые определения.

Сеть связи – технологическая система, включающая в себя средства и линии связи и предназначенная для электросвязи или почтовой связи [32].

Электросвязь – любое излучение, передача или прием знаков, сигналов, голосовой информации, письменного текста, изображений, звуков или сообщений любого рода по радиосистеме, проводной, оптической и другим электромагнитным системам [32].

Сеть электросвязи – сеть связи, обеспечивающая электросвязь при помощи электромагнитных систем. Сеть электросвязи состоит из сетей следующих категорий: сети связи общего пользования; выделенные сети связи; технологические сети связи, присоединенные к сети связи общего пользования; сети связи специального назначения и другие сети связи для передачи информации. Таким образом, сеть электросвязи фактически представляет собой объединение отдельных категорий сетей, которые классифицируются по их назначению [32].

Сеть связи специального назначения (СС СН) – сеть связи, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [32].

При этом для обеспечения функционирования СС СН могут использоваться как ее собственные ресурсы, так и ресурсы сетей связи общего пользования.

Сеть связи общего пользования (СС ОП) – комплекс взаимодействующих сетей связи, обеспечивающих электросвязь, в том числе – трансляцию телеканалов или радиоканалов, предназначенных для возмездного оказания услуг связи любому пользователю. При этом СС ОП могут иметь присоединение к СС ОП иностранных государств [32].

СС СН и СС ОП включают в себя первичные и вторичные сети.

Первичная (транспортная) сеть связи – совокупность технических средств, комплексов, линий связи и обслуживающего персонала, обеспечивающая потребителей стандартными каналами (трактами) передачи первичных электрических сигналов. Основным видом сервиса, предоставляемого абонентам первичных сетей связи, являются типовые каналы и тракты [3].

Вторичная сеть связи (сеть абонентского доступа) – совокупность технических средств и связей между ними, обеспечивающая потребителей различными видами услуг по доставке, хранению и обработке информации. Основным видом сервиса, предоставляемого абонентам вторичных сетей, являются услуги по информационному обмену [3].

Выделенные сети – сети связи, которые организуются в интересах отдельных категорий должностных лиц, пунктов управления (ПУ) и специальных систем управления. К таким выделенным сетям, например, можно отнести сети навигации, государственного опознавания, системы телеметрии в системах непосредственного управления, сети правительственной связи и др.

Кроме того, в современных нормативных актах используется термин «информационно-телекоммуникационная сеть». Причем в подавляющем числе нормативных актов этот термин ассоциируется с сетью Интернет, а содержание этих актов, прежде всего, ориентировано на использование информационных ресурсов сети Интернет и, в основном, не касается ее технологических особенностей как сети электросвязи.

Информационно-телекоммуникационной сеть – технологическая система, предназначенная для передачи по линиям связи информации, доступ к которой осуществляется с использованием средств вычислительной техники [48].

Кроме того, часто используемым является понятие «телекоммуникационная система», которое в большинстве случаев ассоциируется с отдельной первичной (транспортной) сетью, которая соответствует отдельной области маршрутизации в составе СС СН или СС ОП.

Телекоммуникационная система (ТКС) – это совокупность связанных линиями связи сетевых узлов, которая основана на единой транспортной технологии и эксплуатируется в соответствии с едиными принципами маршрутизации, адресации и управления, при этом в ее составе имеются граничные узлы, ответственные за допуск трафика в сеть или направление его в другие смежные телекоммуникационные системы.

2. Сеть связи специального назначения – определение, состав, требования

2.1. Характеристика сети связи специального назначения как организационно-технической системы

Сеть связи специального назначения – сеть связи, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [32].

Анализ особенностей построения и функционирования СС СН был проведен в работах А.В. Боговика, В.В. Игнатова [3], К.Е. Легкова, А.Н. Буренина [20, 21], А.Н. Соколова [29], С.М. Одоевского [35], М.А. Шнепс-Шнеппе [38]. В данном подразделе будут обобщены принципы построения СС СН и основные их особенности относительно СС ОП.

СС СН выполняет задачи, в первую очередь, по доставке информации между распределенными в пространстве органами и пунктами системы управления вышестоящего уровня – органов государственной власти, органов обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка.

Таким образом, в самом общем виде СС СН может быть определена как совокупность распределенных в пространстве взаимосвязанных технических средств и обслуживающего персонала, выполняющих задачи по обеспечению информационного обмена в системах государственного и военного управления, а также системах управления обеспечения безопасности и правопорядка [3].

Согласно общей классификации систем СС СН может быть отнесена к типу ненаправленных управляемых человеко-машинных систем и, как правило, имеет иерархическую структуру, соответствующую структуре системы управления, в интересах которой она функционирует [3].

Одним из основополагающих принципов исследования сложных организационно-технических систем является принцип декомпозиции, при котором исследуемая система разбивается на ряд более простых составляющих, преследующих локальные цели. При этом успешность решения общей задачи исследования в существенной мере зависит от того, насколько удачно были выбраны признаки, по которым осуществлена декомпозиция. При решении задач информационного обеспечения органов государственного и военного управления, органов обеспечения безопасности и правопорядка для СС СН такими признаками могут быть [3]:

- тип транспортных средств или протоколов, используемых для доставки информации;
- виды обеспечиваемого для абонентов сервиса и услуг связи;
- типы абонентов;
- способы предоставления абонентам сервиса и услуг связи.

Примерная декомпозиция СС СН по некоторым из указанных признаков приведена на рис. 1.

При этом основу современных СС СН как управляемых целенаправленных систем, независимо от их типа и принадлежности, составляют отдельные сети связи (телекоммуникационные системы) и системы управления связью.

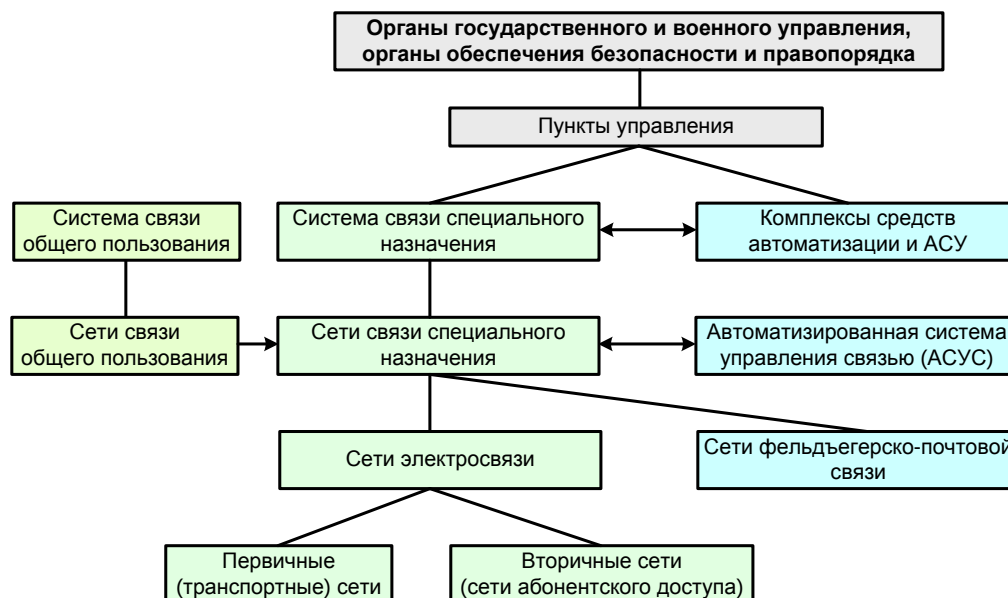


Рис. 1. Вариант декомпозиции СС СН [3]

2.2. Состав и структура сети связи специального назначения

По транспортным средствам, используемым для доставки информации, в составе СС СН различают [3]:

- *сети фельдъегерско-почтовой связи*, в которых доставка информации (в виде карт, схем, посылок, бандеролей, писем и т. д.) осуществляется специальными курьерами (фельдъегерями) с помощью обычных транспортных средств;
- *сети электросвязи*, в которых доставка информации осуществляется с помощью электрических сигналов и электромагнитных волн.

Каналы и тракты транспортных сетей связи в современных СС СН создаются на базе линий и сетей различных родов связи, входящих в состав первичной (транспортной) сети. При этом под *родом связи* понимается классификационная группировка связи, выделенная по среде распространения сигналов или по применяемым средствам связи.

По видам обеспечиваемого для абонентов сервиса и услуг связи сети электросвязи обычно подразделяют на [3]:

- первичные (транспортные) сети связи;
- вторичные сети связи (сети абонентского доступа).

Классификация элементов сетей первичной и вторичной сетей СС СН представлена на рис. 2.

В составе первичных и вторичных сетей СС СН могут быть организованы *выделенные сети*.

Основой построения первичных (транспортных) сетей в составе СС СН в настоящее время являются [3, 33, 34]:

- линии и сети радиосвязи;
- линии и сети спутниковой связи;
- волоконно-оптические линии связи;
- линии радиорелейной и тропосферной связи;
- кабельные линии электрической связи.

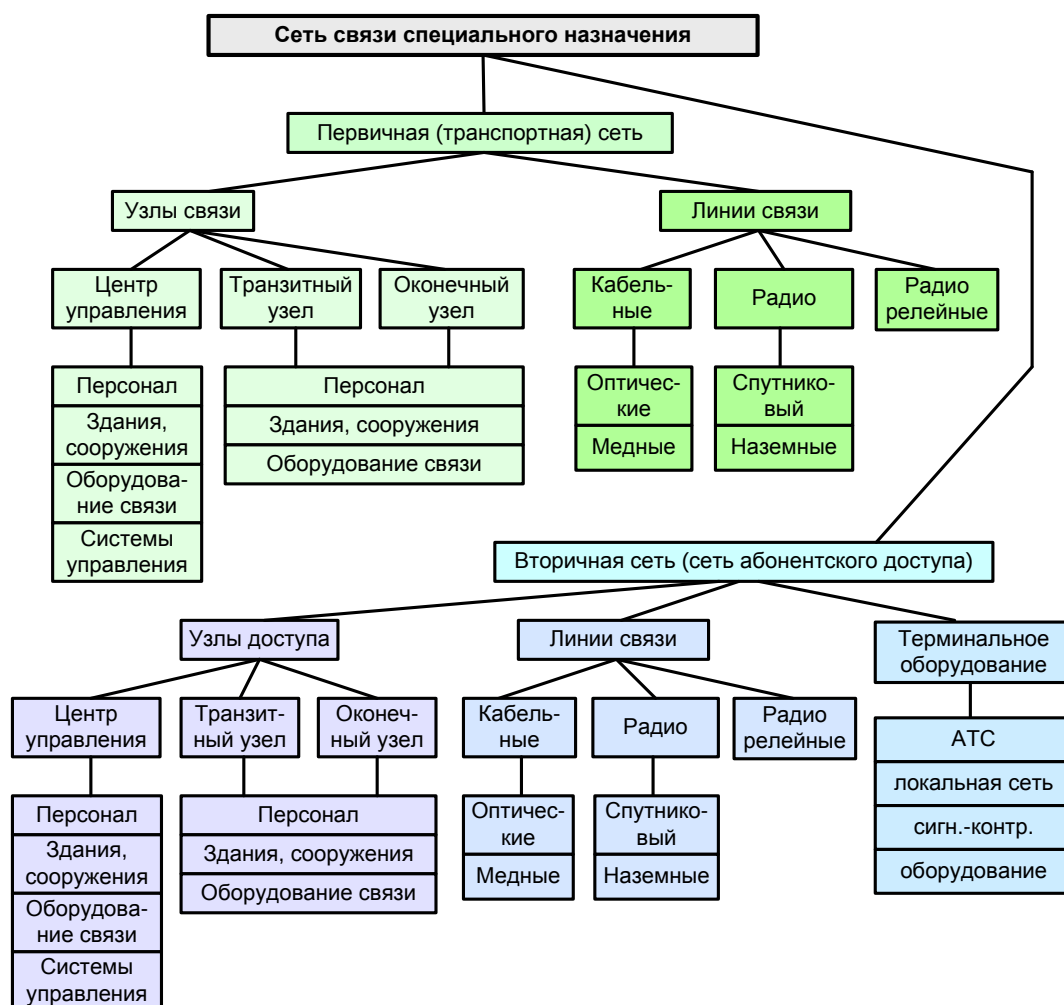


Рис. 2. Классификация элементов СС СН [41]

К основным технологиям первичных (транспортных) сетей в составе СС СН можно отнести [33, 35, 36]:

- технологии коммутации каналов – PDH, SDH, OTH;
- технологии коммутации пакетов – IPv4, IPv6;
- технологии коммутации пакетов по виртуальным каналам – X.25, AX.25, Frame Relay, ATM, IP/MPLS, VPN и др.;
- технологии организации, управления и интеграции сетей связи – TMN, ASON/ASTN, NGN, GII и др.;
- специализированные технологии, разработанные для обеспечения связи в условиях преднамеренного воздействия дестабилизирующих факторов на СС СН.

Вторичные сети СС СН обычно подразделяли по видам предоставляемых ими услуг, однако в настоящее время такая классификация устарела.

В соответствии с современными взглядами вторичные сети можно подразделить по типу [33]:

- локальные сети;
- сети коллективного доступа;
- цифровые линии абонентского доступа;
- оптические линии абонентского доступа;
- сети мобильной или транкинговой связи;

- сети радиодоступа.

В основу более подробной классификации вторичных сетей (сетей абонентского доступа) может быть положена используемая в ней базовая технология сети – рис. 3.

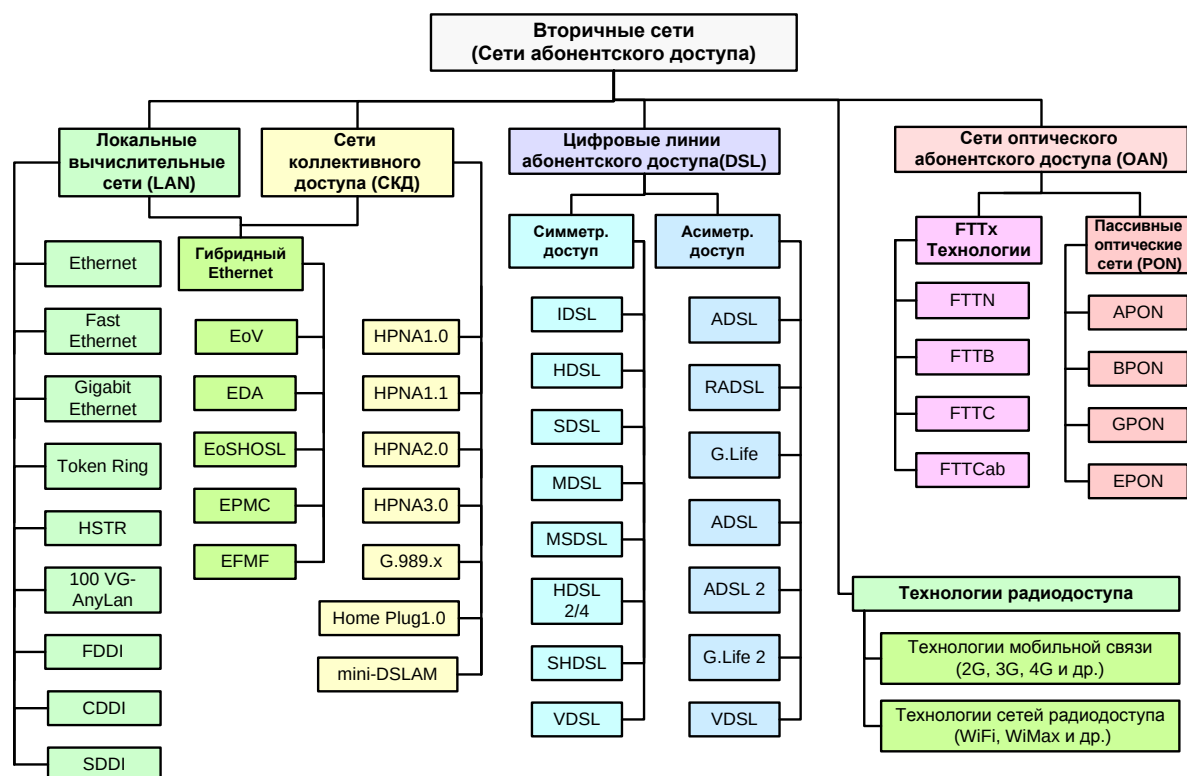


Рис. 3. Классификация вторичных сетей СС СН по используемой технологии связи [33]

По способам предоставления абонентам сервиса и услуг связи в СС СН различают [3]:

- сети с закрепленным ресурсом;
- сети с ресурсом, по требованию;
- сети с адаптивным распределением ресурса.

Под ресурсом, в самом общем случае, понимается пропускная способность сети.

Пропускная способность сети – максимально возможная суммарная скорость передачи сообщений по всем информационным направлениям связи для конкретных условий функционирования. Для СС СН пропускную способность обычно оценивают числом типовых каналов на направлениях связи, которые могут быть предоставлены абонентам [3].

Вместе с тем, обеспечение требуемой пропускной способности однозначно связано с определенными затратами других ресурсов сети – времени, полосы частот и энергии передающих устройств и т. д. В связи с этим можно дать более общее определение ресурсу сети.

Ресурс сети – совокупность канальных, временных, частотных, энергетических и других ресурсов сети связи, затрачиваемых на передачу информации всех абонентов сети [3].

2.3. Основные требования, предъявляемые к сети связи специального назначения

Сеть связи специального назначения функционирует в интересах систем государственного и военного управления, а также систем управления обеспечения безопасности и правопорядка. К данным системам управления предъявляются требования по:

- *устойчивости* – способности органов управления выполнять свои функции в сложной, резко меняющейся обстановке в условиях помех и массированных дестабилизирующих воздействиях противника;
- *непрерывности* – возможности органов управления постоянно взаимодействовать с объектами управления;
- *оперативности* – способности получать, обрабатывать и преобразовывать информацию в соответствии с темпом изменения текущей ситуации;
- *скрытности* – способности сохранять в тайне факт, время и место преобразования информации, ее содержание и принадлежность к управляющим объектам.

Для обеспечения этих требований к управлению, к связи, как к процессу переноса информации от объектов управления к пунктам управления и обратно, предъявляются требования по:

- *своевременности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечивать передачу или сообщений или ведение переговоров в заданные сроки;
- *достоверности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечивать требуемую точность воспроизведения сообщений в пунктах доставки, а также сохранять эту точность при преобразовании информации;
- *безопасности* – свойству связи, которое характеризует ее способность обеспечить сохранение в тайне содержания передаваемых сообщений и самого факта их передачи.

Соответственно связь, как процесс переноса информации, должна удовлетворять всем этим требованиям, поэтому было введено интегральное понятие «качество связи».

Качество связи – это свойство связи, которое характеризует ее способность обеспечивать своевременную, достоверную и безопасную передачу сообщений.

Для обеспечения указанных требований к связи, в свою очередь СС СН, как организационно-техническая система, должна соответствовать требованиям к определенным ее свойствам. Взаимосвязь этих свойств, требований к связи и требований к системе управления представлена на рис. 4.

В СС СН циркулируют информационные потоки системы управления, которые после их обработки и систематизации представляются уполномоченным лицам или органам для принятия решений. В связи с этим в СС СН при передаче этих потоков должны обеспечиваться требования по информационной безопасности.

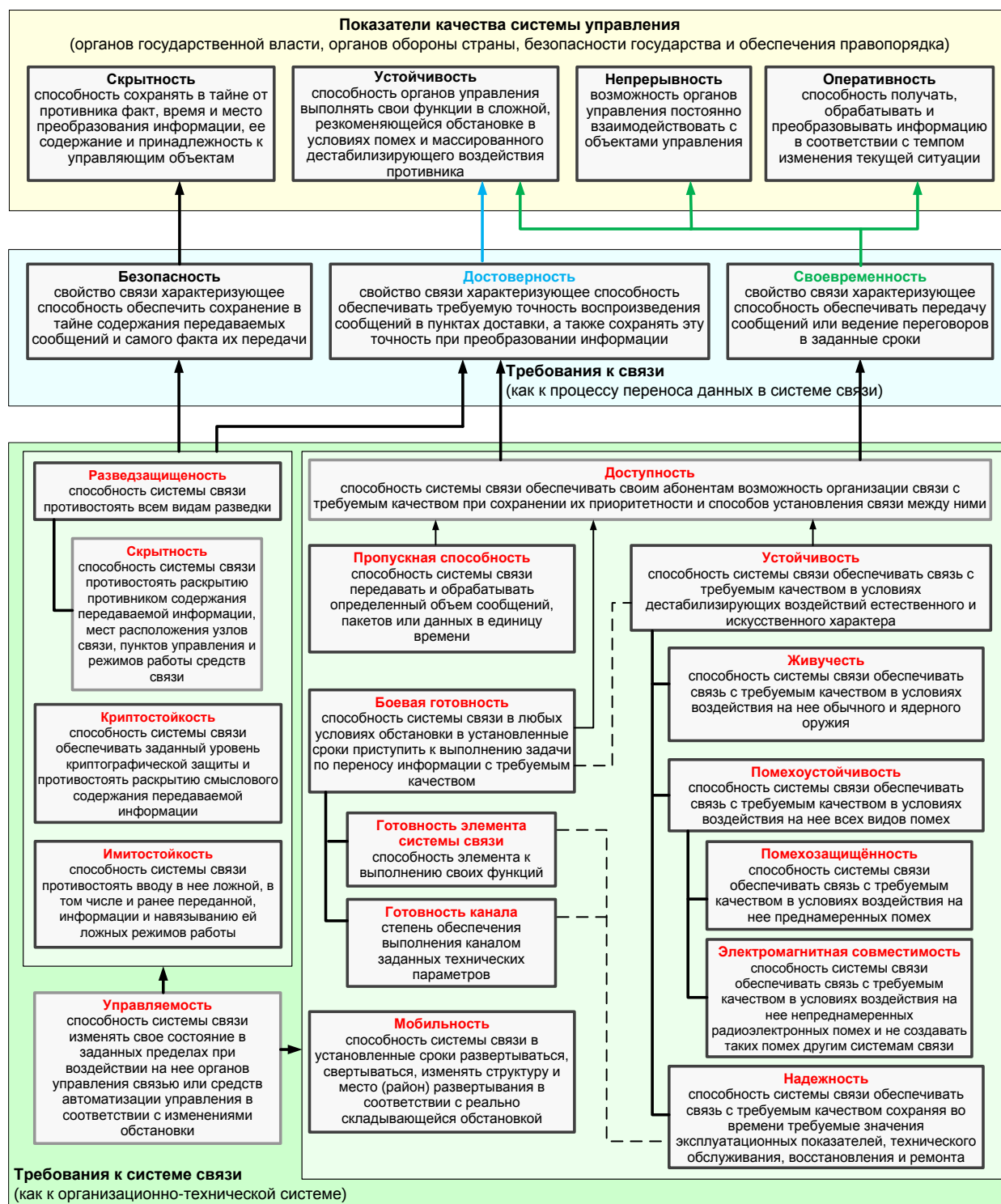


Рис. 4. Требования к связи и к СС СН [3, 33]

Информационная безопасность – это состояние, при котором обеспечивается конфиденциальность, целостность и доступность информации [37].

Конфиденциальность информации – состояние информации, при котором доступ к ней осуществляют только субъекты, имеющие на это право [39].

Целостность информации – состояние информации, при котором обеспечивается ее достоверность и полнота [37].

Доступность информации – состояние информации (ресурсов информационной системы), при котором субъекты, имеющие права доступа к информации, могут реализовывать их беспрепятственно [39]

Структурно-логическая связь между требованиями к СС СН и категориями информационной безопасности представлены на рис. 5.

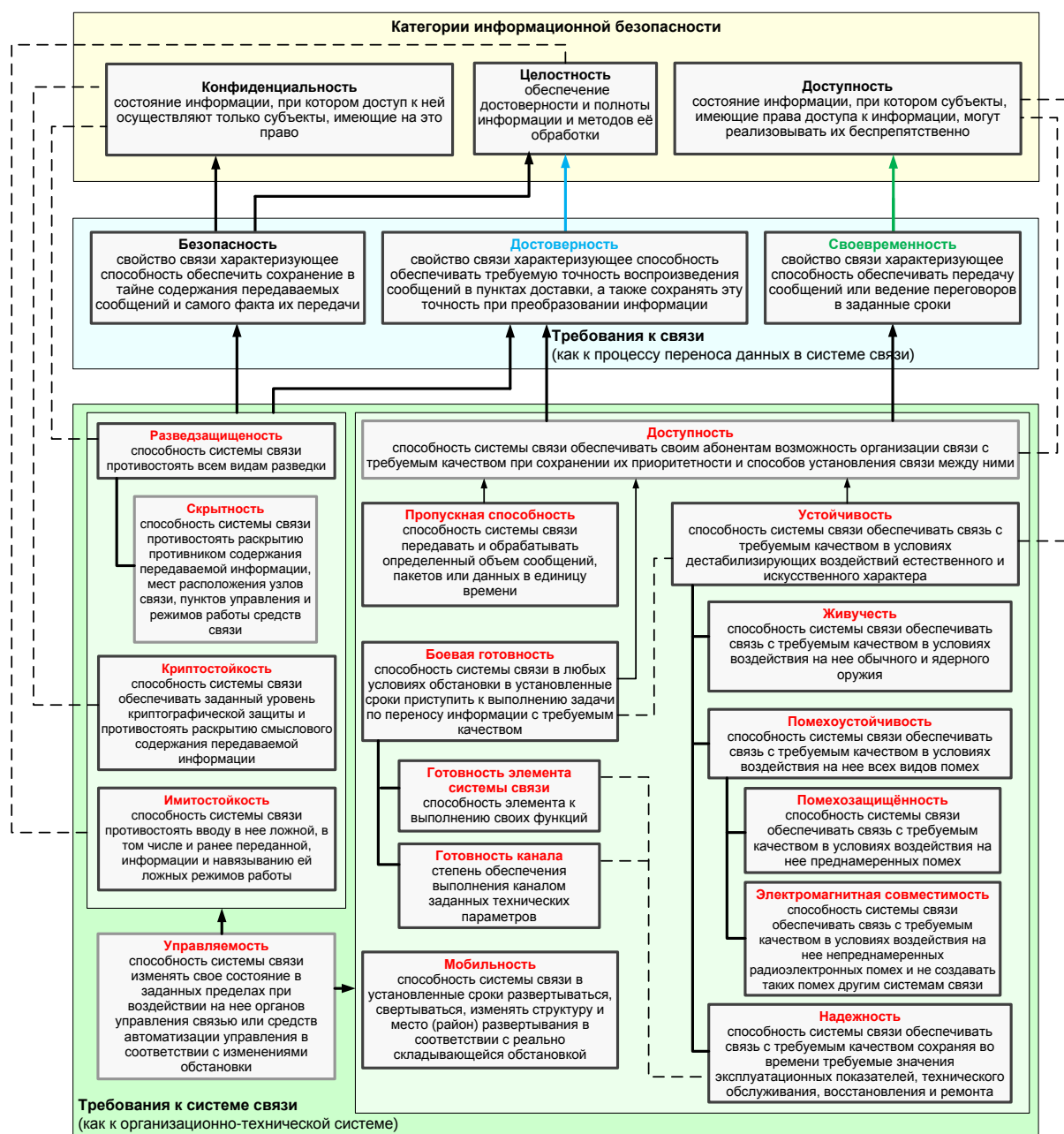


Рис. 5. Связь категорий информационной безопасности с требованиями, предъявляемыми к СС СН

Основной особенностью СС СН, которая отличает ее от СС ОП, является то, что СС СН ориентирована на функционирование, как в мирное, так и в военное время, в условиях воздействия противника, а также различного рода дестабилизирующих факторов. В связи с этим для СС СН особое значение приобретает свойство ее устойчивости.

В ГОСТ Р 53111-2008 даны следующие определения.

Устойчивость сети электросвязи – способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части ее элементов в результате воздействия дестабилизирующих факторов [40].

Дестабилизирующий фактор – воздействие на сеть электросвязи, источником которых является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего характера, приводящее к выходу из строя элементов сети [40].

Таким образом, понятие «фактор», в соответствии с ГОСТ Р 53111-2008, семантически соответствует понятию «воздействие». Уточняя, что основной функцией СС СН является обеспечение требуемого качества связи и разделяя дестабилизирующие факторы на естественные и искусственные, можно дать следующее определение.

Устойчивость сети связи – способность сети связи обеспечивать требуемое качество связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов естественного и искусственного характера.

Классификация дестабилизирующих воздействий на СС СН представлена на рис. 6. При этом естественные и искусственные непреднамеренные дестабилизирующие воздействия характерны для мирного времени. В военное время и в угрожаемый период эти воздействия дополняются преднамеренными искусственными дестабилизирующими воздействиями.

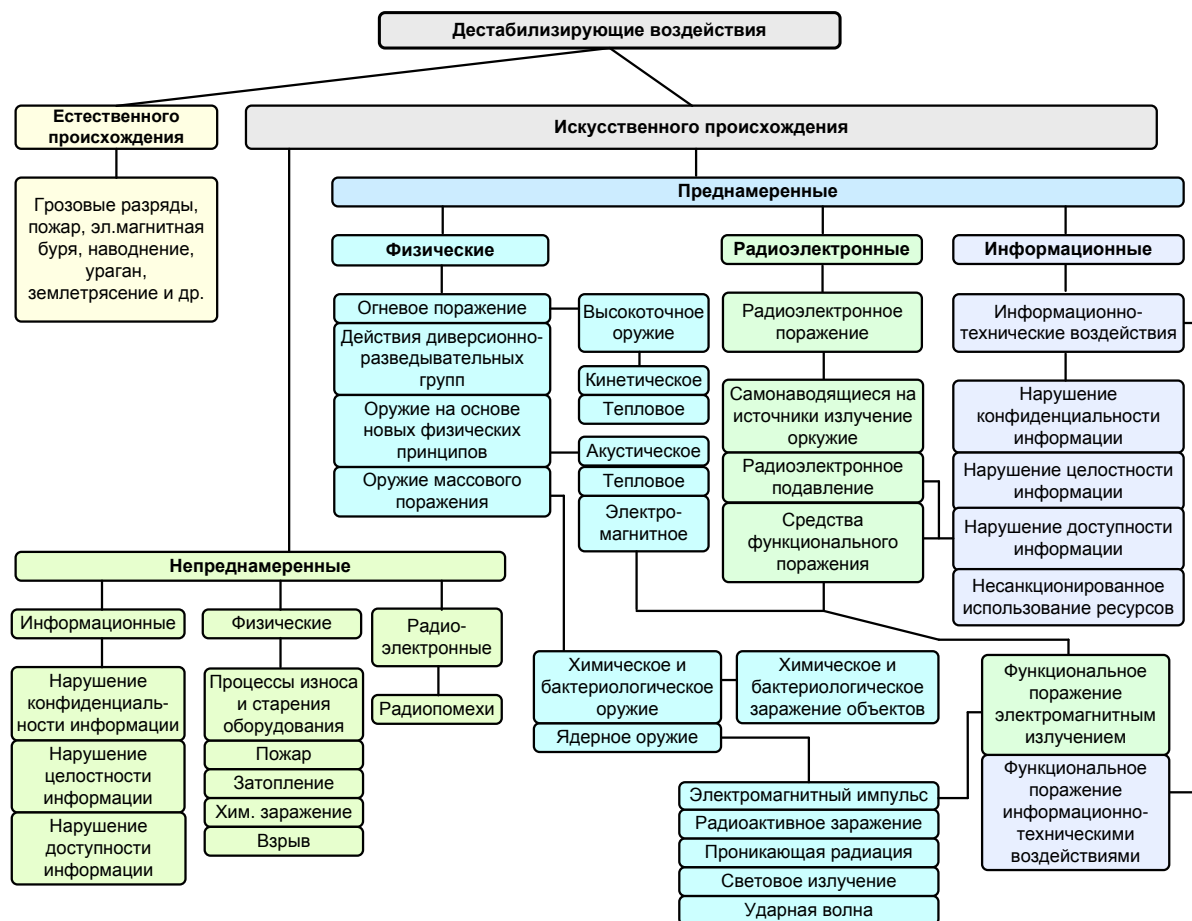


Рис. 6. Классификация дестабилизирующих факторов [41]

3. Основные тенденции развития современных сетей связи специального назначения

Анализ работ в области построения СС СН обеспечивающих информационный обмен в ВС США и НАТО, а также работ в области развития отече-

ственных СС СН [2, 8-11, 25-28, 35, 51-54, 56-60, 63] выявил следующие тенденции развития СС СН:

- переход от сопряжения отдельных СС СН, в различных органах государственного и военного управления к единой СС СН основанной на многоэшелонированном принципе построения (космический, воздушный, наземный и морской эшелоны);
- широкая интеграция в состав СС СН сегментов СС ОП и коммерческих телекоммуникационных ресурсов;
- активное замещение в СС СН технологий коммутации каналов на технологии коммутации пакетов;
- массовое использование коммерческих протоколов и технологий в составе СС СН, прежде всего, протоколов IP (Internet Protocol) и MPLS (Internet Protocol and Multiprotocol label switching);
- конвергенция отдельных сетей и систем связи в единое информационное пространство на основе концепции NGN;
- широкое использование спутниковых систем связи (ССС) в качестве основы, обеспечивающей глобальную связность СС СН и глобальную управляемость во всех звеньях управления, особенно в военное время, при этом в состав СС СН могут включаться СССР из состава СС ОП в том числе СССР гражданских операторов спутниковой связи;
- использование в сетях СС СН тактического звена технологий адаптивных мобильных радиосетей Mesh/MANET-сетей (Mobile Ad hoc Network);
- использование методов обработки Big Data, а также облачных и Grid-технологий для организации распределенного хранения и обработки больших массивов данных.

Рассмотрим основные из этих тенденций более подробно.

3.1. Многоэшелонированное построение современных сетей связи специального назначения

Современные СС СН, как правило, декомпозируются на четыре эшелона (рис. 7):

- наземный эшелон (стационарный и мобильный (полевой) сегменты);
- воздушный эшелон (воздушный и наземный сегменты);
- морской эшелон (морской и наземный сегменты);
- космический (космический и наземный сегменты).

Наземный эшелон СС СН использует сетевые ориентированные, унифицированные технические и программно-аппаратные решения со стандартной номенклатурой типовых каналов связи. Наземный эшелон является взаимоувязанной совокупностью стационарных и подвижных узлов и линий связи различных родов. Он представляет организационно-техническое объединение средств и комплексов связи, выполняющих задачи по образованию, маршрутизации и коммутации каналов связи в интересах вышестоящей системы государственного и во-

енного управления. Узлы и линии связи наземного эшелона также обеспечивают взаимодействие между техническими средствами других эшелонов.

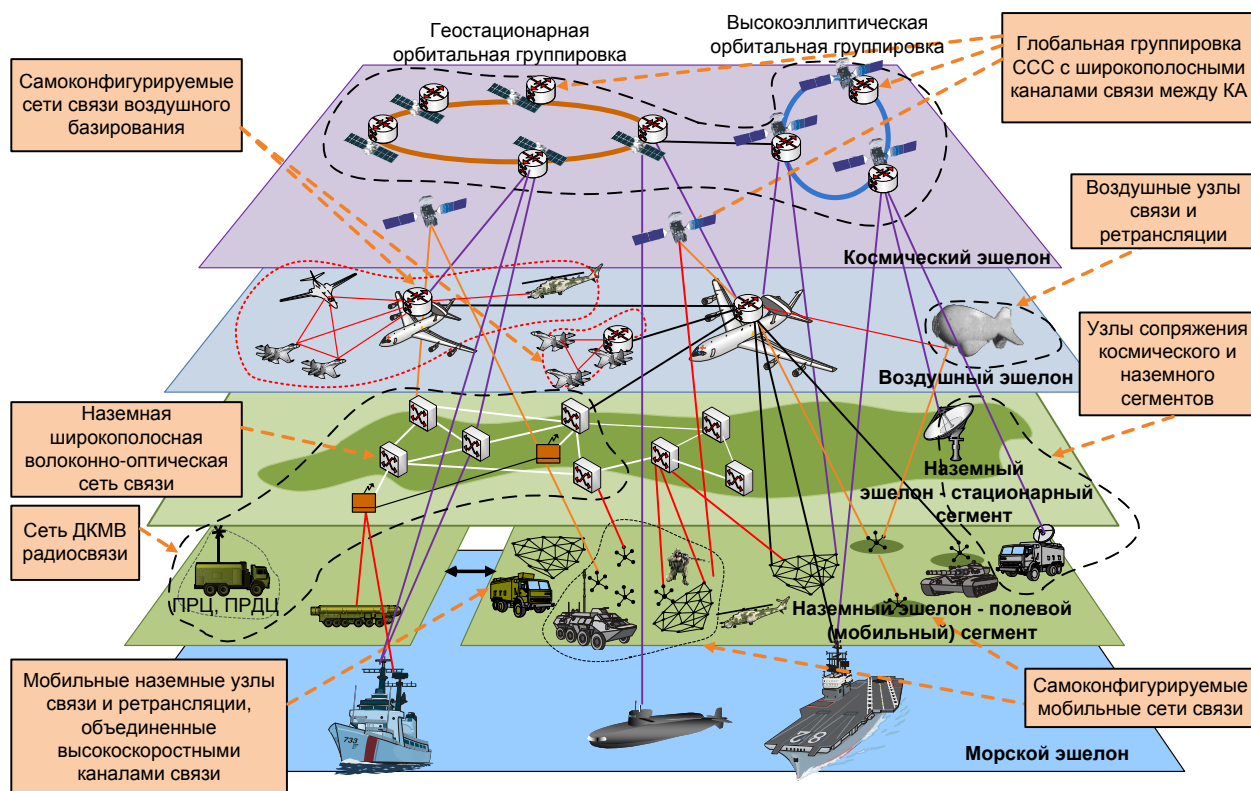


Рис. 7. Общая схема многоэшелонированного построения СС СН [60]

Наземный эшелон включает в себя:

- стационарный сегмент;
- полевой (мобильный) сегмент;
- автоматизированную систему управления связью.

Стационарный сегмент наземного эшелона представляет собой цифровую стационарную транспортную сеть в составе СС СН. Стационарный сегмент наземного эшелона базируется на основе территориально-распределенных транспортных сетей из состава СС СН, а также на основе арендованных линий связи СС ОП. В качестве основной физической среды передачи стационарного компонента наземного эшелона выступают волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

Полевой сегмент наземного эшелона СС СН представляет собой совокупность самостоятельных, но организационно и технически взаимоувязанных ТКС, объединяющихся по звеньям управления в:

- полевую (мобильную) сеть связи стратегического звена управления;
- полевые (мобильные) сети связи оперативного звена управления;
- полевые (мобильные) сети связи тактического звена управления.

Полевой сегмент СС СН базируется на общих принципах построения самоорганизующихся мультисервисных сетей с максимально возможным использованием унифицированных цифровых средств и комплексов связи. Предполагается, что структура полевого (мобильного) сегмента наземного эшелона

СС СН является инвариантной по отношению к структуре системы государственного и военного управления. В состав узлов связи полевого (мобильного) сегмента входит типовый набор радиорелейных, тропосферных, проводных и спутниковых средств связи, комплексы автоматизации связи, аппаратные электропитания и т.д.

Воздушный эшелон СС СН строится на основе средств воздушно-наземной связи и ретрансляторов связи на летно-подъемных средствах различного назначения. Воздушный эшелон СС СН включает в себя:

- наземный сегмент;
- воздушный сегмент;
- автоматизированную систему управления связью с элементами наземного и воздушного базирования.

К воздушному сегменту относится транспортная сеть, включающая в себя бортовые комплексы связи, которыми оснащаются ретрансляторы транспортной сети воздушного эшелона, а также воздушные ПУ летательными аппаратами различных видов авиации, а также средства связи для сопряжения отдельных сетей других эшелонов, базирующихся на летно-подъемных средствах (самолеты, вертолеты, дирижабли, аэростаты, беспилотные дистанционно-управляемые летательные аппараты, летающие платформы).

К наземному сегменту воздушного эшелона относятся комплексы связи, размещаемые на наземных узлах связи, стационарных и подвижных, средства сопряжения с транспортной сетью наземного эшелона.

Технической основой воздушного эшелона являются комплексы радиосвязи ДКМВ, МВ, ДМВ диапазонов и СМВ/ММВ диапазонов спутниковой связи.

Морской эшелон СС СН представляет организационно-техническое объединение стационарно-мобильных узлов связи, радиоцентров, радиостанций, автоматизированных комплексов связи подводных лодок, кораблей, летательных аппаратов, соединенных линиями различных родов связи. Для организации радиосвязи используются различные диапазоны радиоволн – СНЧ, СДВ, ДВ, СВ, КВ, УКВ, а также каналы спутниковой связи. Морской эшелон включает в себя:

- морской сегмент;
- наземный сегмент;
- автоматизированную систему управления связью.

Морской сегмент, как правило, состоит из средств связи и автоматизации, размещаемых на подводных лодках и кораблях, а при организации сетей для ретрансляции сигналов используются радио-ретрансляторы на летно-подъемных средствах и ССС.

Космический эшелон СС СН разворачивается на основе ССС, образованных линиями спутниковой связи и узлами сети – земными станциями и космическими аппаратами связи. Космический эшелон СС СН включает в себя:

- космический сегмент;
- наземный сегмент;

Космический эшелон СС СН предназначен для обеспечения глобальной связности СС СН в стратегическом и оперативно-тактическом звеньях управления, правительственной связи и специальной связи. При этом структура космического эшелона СС СН инвариантна по отношению к структуре системы государственного и военного управления.

Технологии, применяемые в ТКС космического эшелона, обеспечивают интеграцию различных видов трафика, устойчивое и глобальное взаимодействие комплексов и средств, на стационарных, полевых и подвижных узлах связи различных звеньев управления для стационарного наземного, полевого (мобильного) наземного, воздушного и морского эшелонов с целью обеспечения возможности обмена всеми видами информации между всеми абонентами во всех эшелонах СС СН.

3.2. Широкое использование в составе сети связи специального назначения канальных и сетевых ресурсов, арендуемых у коммерческих операторов связи

Анализ современных СС СН, а также перспектив их развития, представленные в работах [2, 8-11, 25-28, 35, 51-54, 56-60, 63], позволяет сформулировать следующие основные тенденции по технологическому построению СС СН:

- переход от иерархического принципа построения СС СН, когда ее структура жестко увязывается со структурой организационной подчиненности абонентов к децентрализованной сетевой структуре, которая не зависит от организации системы подчиненности абонентов, и в большей степени соответствует современным требованиям к сетечетрическим системам государственного и военного управления;
- отказ от построения СС СН на основе отдельной связной инфраструктуры и переход к построению СС СН на основе гибридного подхода, когда отдельные сегменты СС ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры СС СН;
- максимальное широкое использование для построения СС СН подходов, протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций.

Данные тенденции подтверждаются общими принципами построения СС СН как для ВС РФ, так и для ВС США.

Стационарные и мобильные узлы, на основе которых будут разворачиваться компоненты перспективных СС СН, привязываются к единой транспортной сети СС СН основу которой составят ВОЛС, а использование ССС обеспечит глобальность информационного обмена и связность отдельных сегментов ВОЛС.

При этом, при недостатке собственных ресурсов СС СН, как правило, необходимые канальные ресурсы из СС ОП арендуются у региональных и национальных операторов связи. Основным подходом к организации такой аренды,

является использование низкоуровневых ресурсов сети операторов связи, к которым можно отнести [9-11]:

- выделенные каналы связи для передачи потоков E1-E4, STM-n;
- оптические волокна в волоконно-оптическом кабеле;
- отдельные длины волн (в составе ВОЛС с технологией WDM);
- радиоресурсы коммерческих ССС;
- виртуальные и логические соединения на канальном уровне, реализуемые, например, с использованием базовых услуг канального уровня сети передачи данных VLAN, L2 VPN;
- виртуальные частные сети и туннели канального (технологии VLAN, MPLS L2 VPN, VPLS, PPTP, L2TP и др.) и сетевого уровня (технологии IP VPN, MPLS L3 VPN, IPSec и др.).

Необходимо отметить, что используемые структурно-технологические решения по сопряжению транспортных сетей из состава СС СН с сетями в составе СС ОП гражданских операторов связи обеспечивают связность на сетевом уровне, как правило, за счет использования единых протокольных решений на основе протоколов IPv4 и IPv6. В целях обеспечения безопасности при сопряжении СС СН с СС ОП должны быть использованы решения, обеспечивающие изоляцию адресных пространств отдельных сетей в составе СС СН и передаваемых потоков трафика от тех сегментов и потоков, которые обслуживаются в СС ОП гражданским оператором связи.

Ряд экспертов считает, что в настоящее время развертывание отдельной телекоммуникационной инфраструктуры СС СН является экономически нецелесообразным, и что современные и перспективные СС СН активно используют и будут использовать ресурсы гражданских операторов СС ОП национального и регионального масштаба. Однако, при таком пути развития СС СН, на нее существенное влияние будут оказывать технологии, на основе которых строится и модернизируется сети гражданских операторов связи [9-11].

Таким образом, из самого факта сопряжения СС СН и СС ОП следует два важных вывода:

- 1) технологии связи СС СН должны быть «обратно совместимыми» с технологиями, используемыми в гражданских СС ОП, для обеспечения использования ресурса СС ОП в интересах СС СН;
- 2) сквозное сопряжение СС СН с СС ОП, а также последней с гражданскими СС ОП других государств, делает СС СН потенциально уязвимой для преднамеренных дестабилизирующих воздействий со стороны других государств.

Эти выводы определяют следующие современные тенденции развития СС СН:

- 1) мировой тенденцией является использование для построения перспективных СС СН современных «гражданских технологий», широко используемых в СС ОП, а не разработка специализированных технологических решений;
- 2) использование в СС СН «гражданских технологий» одновременно с их фактической интеграцией через общие сегменты СС ОП в мировое

информационное пространство существенно расширяет спектр уязвимостей СС СН, которые могут быть использованы противником при реализации преднамеренных дестабилизирующих воздействий.

3.3. Массовое использование в современных сетях связи специального назначения технологий коммутации пакетов и коммерческих протоколов связи

В настоящий момент в мире происходит активное замещение специализированных технологий связи на открытые коммуникационные технологии, которые являются общими как для гражданских СС ОП, так и для СС СН. Например, в органах государственного и военного управления США и НАТО эксплуатируется большое количество СС СН, используемых различными ведомствами и базирующихся на использовании, как специализированных военных, так и коммерческих телекоммуникационных ресурсов.

Принципиальными изменениями, которые происходят в области построения транспортных сетей СС СН является переход к пакетной коммутации, при необходимости обеспечения устойчивого, мультисервисного и интерактивного обслуживания специальных абонентов. При этом в качестве базовых технологий в транспортных сетях доступа широко используются технологии коммутации пакетов IPv4 и IPv6, а также технология коммутации по меткам MPLS, которые начинают вытеснять такие технологии транспортных сетей как PDH, SDH и ATM [8-11, 25-28].

Анализ работ [8-11, 25-28, 38, 54, 56, 57, 63], посвященных возможным вариантам технологического построения перспективных СС СН позволил сформировать основные принципы и технологии, используемые в них для организации связи.

Транспортная сеть СС СН представляет собой совокупность множества объединенных между собой пакетных ТКС, выполняющих задачи по доставке пакетов от абонента-источника к абоненту-потребителю.

Перспективные СС СН, как правило, строятся на основе ТКС, использующих IP протоколы, кроме того, в них так же могут использоваться сети на основе технологий MPLS и MPLS-TE (для сетей на основе ресурсов ВОЛС и радиорелейной связи), технологии ATM, протоколов DVB-S/DVB-S2 (для CCC), протоколов на основе открытых стандартов STANAG (для сетей ДКМВ радиосвязи). Для обеспечения работы по каналам низкого качества, в большинстве случаев, в СС СН сохранено использование протоколов X.25 (для проводных аналоговых каналов с вероятностью ошибки 10^{-3}) и AX.25 (для аналоговых радиоканалов с вероятностью ошибки 10^{-2} и $5 \cdot 10^{-2}$) [51-53].

Таким образом, в транспортной сети СС СН используются следующие протокольные решения [2, 10, 22]:

- IP/MPLS самостоятельно или поверх PDH/SDH/OTH/ATM (для построения проводного транспортного сегмента);
- X.25 (для обеспечения работы по проводным аналоговым каналам и каналам связи низкого качества);

- АХ.25 (для обеспечения работы по аналоговым радиоканалам и каналам связи низкого качества в условиях мирного времени, а также для построения мобильной (полевой) транспортной сети СС СН в условиях военного времени);
- протоколы семейства DVB (DVB-S/DVB-S2/DVB-RSC) для организации спутниковых каналов связи.

Применение пакетных технологий на основе протоколов IP/MPLS позволяет обеспечить организацию связи в транспортной сети СС СН на сетевых принципах, которые ранее были недоступны для ТКС на основе технологий коммутации каналов PDH/SDH/OTN. Это позволяет обеспечить в СС СН следующие эффекты [10]:

- возможность взаимодействия каждого абонента с каждым (по схемам «point-to-point» и «multipoint-to-multipoint») в любой момент времени при условии эффективного использования сетевых ресурсов;
- эффект повышения устойчивости транспортной сети и улучшения качества обслуживания (QoS – Quality of Service), несмотря на возможное использование разных операторов связи, в условиях выхода из строя большинства узлов связи, за счет оперативной организации обходных маршрутов в статическом и динамическом режимах.

Обобщенная структурная схема сети СС СН приведена на рис. 8.

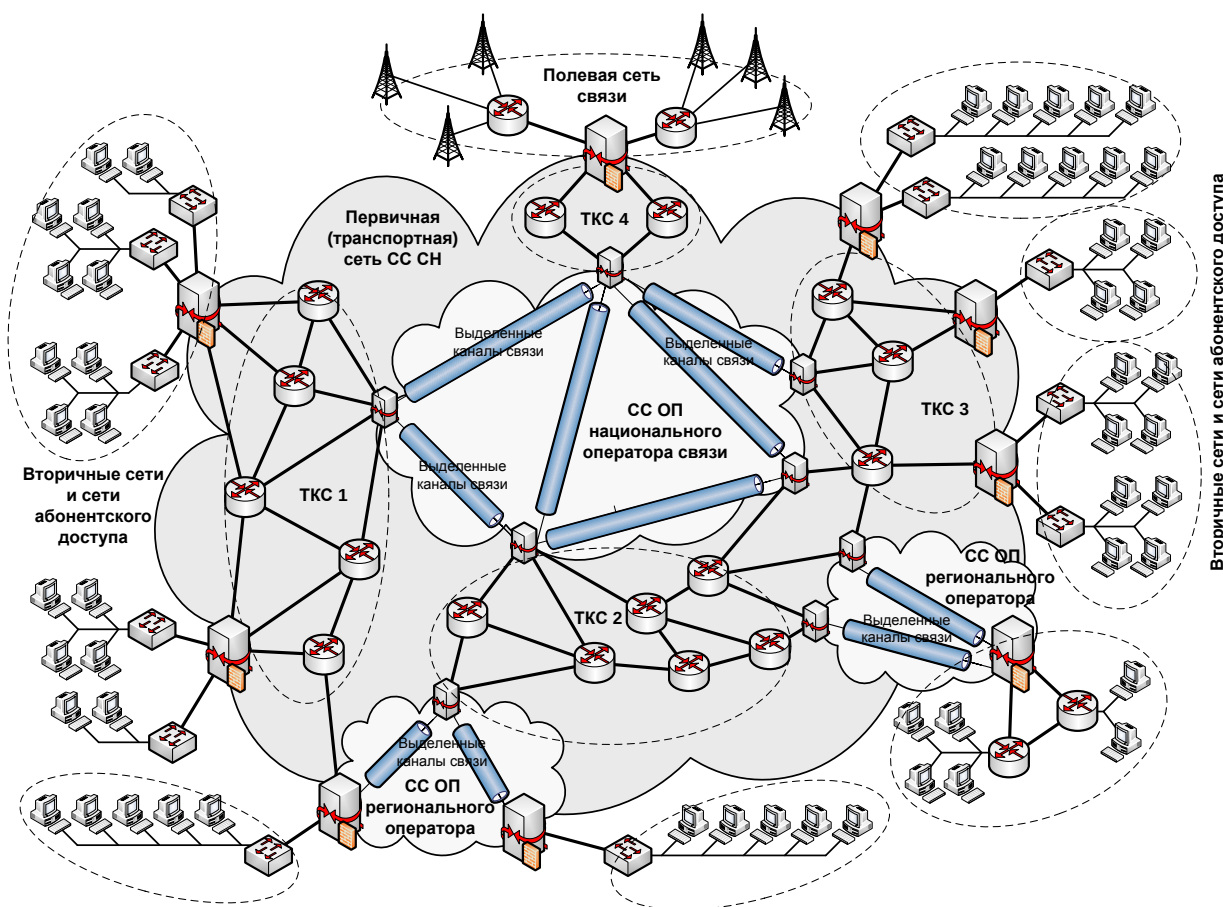


Рис. 8. Обобщенная структурная схема СС СН

Объединение отдельных ТКС организуют путем обмена маршрутной информацией, необходимой для правильного выбора маршрута доведения пакетов с учетом отказов и возможной перегрузки элементов СС СН. Для СС СН, состоящей из большого числа ТКС и сетей с высоким числом взаимных связей целесообразно использовать динамические протоколы маршрутизации. При обмене маршрутной информацией между ТКС и сетями в СС СН, как правило, используется маршрутный протокол BGP4 [51-53].

В ТКС и сетях, входящих в состав СС СН, используются известные модели и механизмы обеспечения качества обслуживания (Int Serv, Diff Serv), применяемые в пакетных сетях, с целью обеспечения требуемых показателей QoS. С целью исключения случаев перегрузки трафиком в состав каждой ТКС включаются граничные маршрутизаторы. Передаваемый трафик котируется путем соглашения между абонентами и службой администрирования как ТКС, так и всей СС СН в целом. При превышении квот трафик сбрасывается, либо доводится без гарантий по соблюдению требуемых показателей качества обслуживания.

Таким образом, транспортная сеть СС СН строится с использованием единых подходов и архитектуры, технологий и средств передачи, защиты данных и управления в части как стационарного, так и мобильного (полевого) сегмента:

- стационарный сегмент транспортной сети СС СН строиться с использованием ТКС, основанных на технологии пакетной коммутации IP/MPLS с встроенными функциями динамической маршрутизации, а также с использованием ТКС, основанных на технологиях коммутации каналов PDH/SDH/OTN с каналами типа E1-E4, STN-n. Причем эти ТКС могут являться как сегментами самой СС СН, так и сегментами СС ОП региональных и национальных операторов связи;
- мобильный (полевой) сегмент СС СН строиться с использованием ТКС, основанных на приоритетном использовании пакетных технологий IP/X.25/AX.25;
- унаследованное оборудование СС СН сопрягается с новыми средствами связи и современными ТКС через модули сопряжения, которые инкапсулируют трафик унаследованных средств связи в пакетный трафик, что позволяет обеспечить единый подход к транспортировке всех видов информации с использованием пакетной коммутации.

Вышеуказанные подходы к построению транспортной сети СС СН позволяют:

- использовать единую технологию коммутации пакетов для передачи информации как по проводным (оптическим, медным и др.) и беспроводным (радиорелейным, тропосферным, спутниковым, широкополосного радиодоступа, КВ/УКВ и иным) аналоговым и цифровым каналам связи СС СН, так и по каналам связи СС ОП региональных и национальных операторов связи, включая глобальную сеть Интернет;
- осуществлять оперативное динамическое управление ресурсами СС СН, в том числе адаптивную маршрутизацию потоков трафика с

- учетом динамики изменения структуры транспортной сети СС СН в результате дестабилизирующих воздействий;
- обеспечить согласованное взаимодействие отдельных ТКС, сетей и унаследованных средств связи, входящих в транспортную сеть СС СН, и в итоге – объединить их в единое телекоммуникационное пространство;
 - получить ряд технологических преимуществ от внедрения в состав СС СН новых ТКС, основанных на новейших коммерческих технологиях из гражданской отрасли связи.

3.4. Построение сетей связи специального назначения в соответствии с концепцией NGN

Анализ работ по глобальным перспективам развития СС СН [8-11, 25-28, 63] позволяет сделать вывод об эволюционном развитии СС СН в направлении перехода к концепции NGN. В частности, в данном направлении эволюционируют СС СН США, в которых приняты концептуальные решения по объединению в единое информационное пространство разнородных сетей и систем связи, с переходом к персонализированным услугам связи для каждого абонента вне зависимости от его географического местонахождения [38]. Обзор основных технологических решений концепции NGN представлен в более ранней работе автора [61], а возможности по использованию концепции NGN для построения СС СН в достаточно полном виде представлены в работе А.Н. Назарова и К.И. Сычева [8].

Базовым принципом построения сети связи следующего поколения является строгое разделение функций переноса и коммутации информационных потоков, управления вызовами и услугами. При этом в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Y.2011 базовая архитектура сети NGN может быть представлена четырьмя функциональными уровнями [8]:

- 1) уровнем приложений и услуг;
- 2) уровнем коммутации услуг;
- 3) уровнем транспорта, включающего функции управления сетевыми ресурсами и уровень доступа;
- 4) уровнем управления сетью.

Для построения сети NGN необходимо в дальнейшем реализовать каждый из этих уровней в виде соответствующего набора элементов сети NGN (рис. 9). При этом на различных логических уровнях сети могут использоваться различные технологии и протоколы.

Уровень приложений и услуг содержит функции управления логикой услуг и приложений и представляет собой распределенную вычислительную среду, обеспечивающую следующие потребности [61]:

- предоставление инфокоммуникационных услуг;
- управление услугами;
- создание и внедрение новых услуг;
- взаимодействие различных услуг.

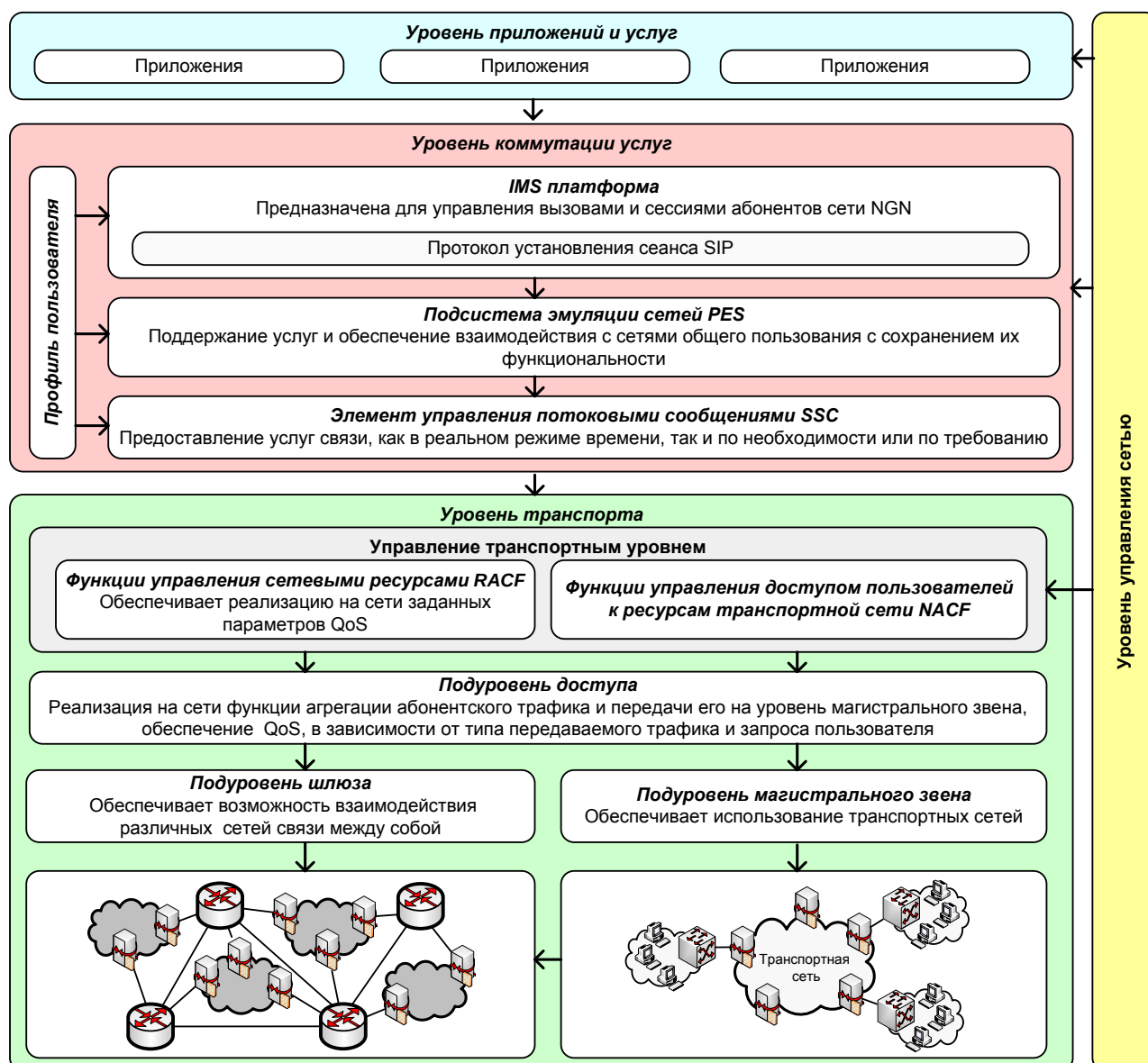


Рис. 9. Схема основных уровней сети NGN [61]

Уровень коммутации услуг позволяет реализовать специфику услуг, и применять одну и ту же логику оказания услуги вне зависимости от типа транспортной сети (IP, ATM, FR и т. п.) и способа доступа. Наличие этого уровня также позволяет вводить в сети любые новые услуги без вмешательства в функционирование других уровней. В основе этого уровня лежит взаимодействие с центральными элементами сети NGN – элементами уровня коммутации (IMS, PES и SSC), которое осуществляется по стандартным интерфейсам ANI (Access Network Interface) для доступа в сеть. Данный уровень может включать множество независимых подсистем («сетей услуг»), базирующихся на различных технологиях, имеющих своих абонентов и использующих свои, внутренние системы адресации [61].

С функциональной точки зрения, данный уровень должен решать основные задачи по установлению соединений и предоставлению услуг в сети NGN.

Основными функциями уровня коммутации услуг являются [61]:

- регистрация пользователей (аутентификация и авторизация) для предоставления им доступа к определенным услугам NGN;
- управление сессиями, вызовами (установление, разрыв и поддержание соединений);
- управление коммутацией и передачей, обработку информации сигнализации, маршрутизация вызовов и управление потоками;
- управление ресурсами сети, включая шлюзы, установленные на транспортном уровне сети NGN.

Транспортный уровень сети NGN обеспечивает функции коммутации и прозрачной передачи информации пользователя. Данные функции образуются двумя подгруппами [61]:

- функции управления сетевыми ресурсами (RACF – Resource and Admission Control Functions), обеспечивающие реализацию в сети заданных параметров QoS. В их задачи входит резервирование требуемых сетевых ресурсов, управление доступом к ресурсам транспортной сети, управление ресурсами шлюзов и т. д.;
- функции управления доступом пользователей к ресурсам транспортной сети NGN (NACF – Network Attachment and Control Functions), осуществляемые на основе информации авторизации пользователей, соглашений об уровне обслуживания SLA, приоритета предоставляемой услуги, а также доступных сетевых ресурсов на транспортной сети и сети доступа.

Транспортный уровень включает в себя ряд функциональных подуровней [61].

- подуровень доступа. На данном уровне реализуются функции агрегации абонентского трафика, которые зависят от типа передаваемого трафика и запросов пользователя, а также обеспечение QoS трафика и передача его на уровень магистрального звена;
- подуровень магистрального звена. Магистральное звено в виде отдельного ТКС должно обеспечивать передачу агрегированного пользовательского трафика в соответствии с требованиями по QoS. На данном уровне применяются те же механизмы по управлению QoS, что и на уровне доступа;
- подуровень шлюза. Данный уровень обеспечивает возможность взаимодействия различных ТКС, построенных на основе различных технологий, а также взаимодействие с другими сетями NGN.

Технологической основой построения транспортного уровня является транспортная сеть NGN, строящаяся в настоящее время на основе технологий коммутации каналов PDH/SDH/OTN и, преимущественно, коммутации пакетов IP, ATM, MPLS. В дальнейшем планируется, что связка протоколов IP/MPLS и технология построения виртуальных сетей VPN будут базовыми для транспортного уровня NGN. Данные технологии способны обеспечивать управление и мониторинг качества всех уровней магистрального звена: сетевого, канально-

го и физического. Это обеспечивает возможность предоставления абонентам сети услуг с заданным качеством.

Уровень управления сетью отвечает за организацию системы управления сетью NGN. В задачи уровня входят мониторинг и управление инфраструктурой и ресурсами сети, поддержание в сети заданных параметров качества, а также ряда параметров, характеризующих работу сети в целом [61].

Система управления должна обеспечивать [61]:

- управление процедурами устранения ошибок и сбоев;
- управление процедурами конфигурации;
- управление автоматизированной системой расчетов;
- управление сетевыми характеристиками;
- управление безопасностью.

Основу сети NGN составляет мультипротокольная ТКС (как правило, на основе ATM, IP, MPLS), которая предоставляет услуги переноса и реализует функции транспортного уровня и уровня управления вызовами. Целью построения транспортной сети NGN является переход от отдельных сетей предыдущего поколения, предназначенных для отдельных групп пользователей или услуг (телефония, данные и др.) к интегрированной сети с гарантированным качеством обслуживания.

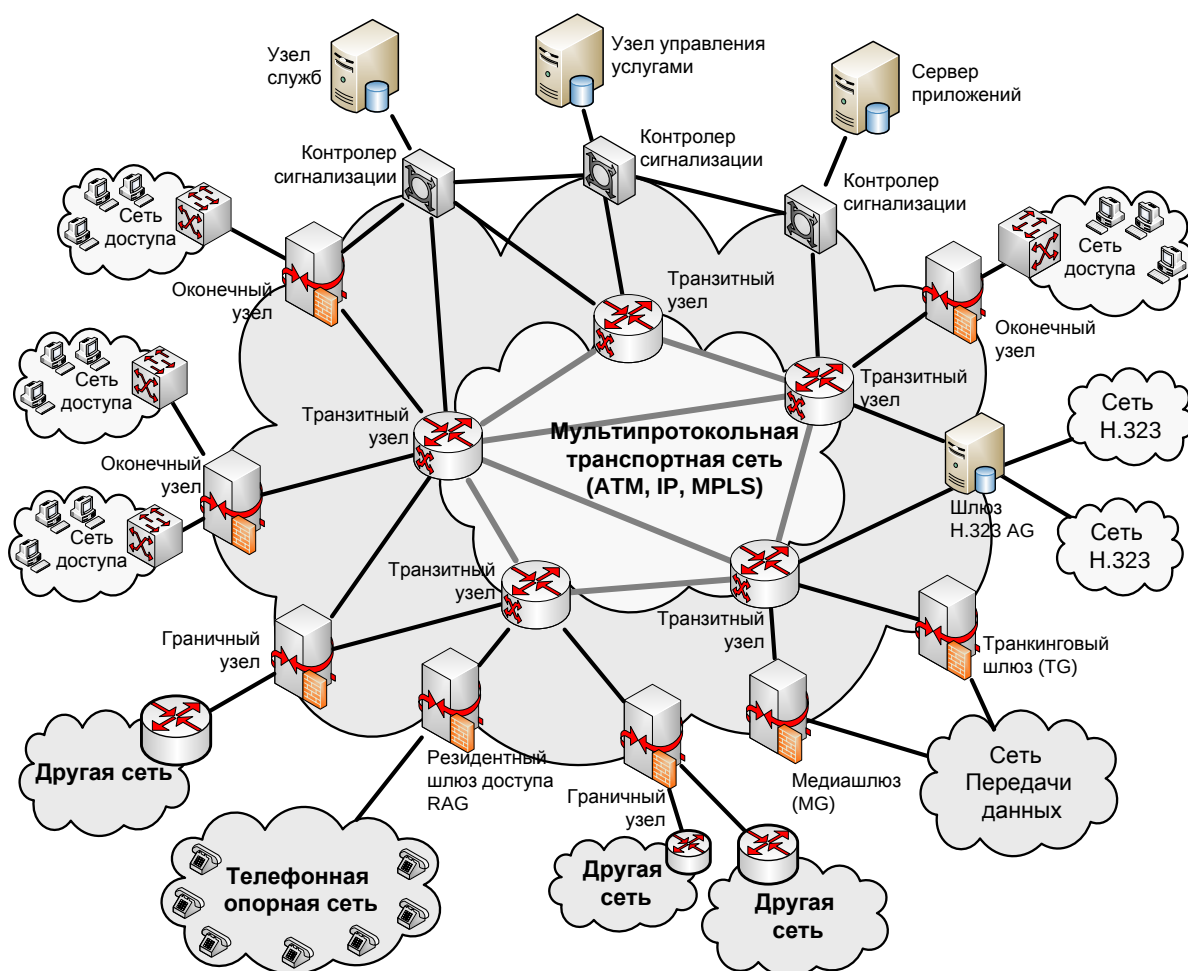


Рис. 10. Мультипротокольная (ATM, IP, MPLS) транспортная сеть NGN [61]

В состав интегрированной транспортной сети NGN могут входить [8]:

- 1) транзитные узлы, выполняющие функции переноса и коммутации;
- 2) оконечные и граничные узлы, обеспечивающие доступ абонентов;
- 3) контроллеры сигнализации или контроллеры медиашлюзов (Media Gateway Controller, MGC/Softswitch), выполняющие функции обработки информации сигнализации, управления вызовами (запросами) и соединениями, а также управления транспортной сетью NGN;
- 4) шлюзы, осуществляющие подключение сетей связи предыдущих поколений:
 - медиашлюз или транспортный шлюз MG (Media Gateway), предназначенный для преобразования речевой информации в IP-пакеты или ATM-ячейки и их маршрутизации;
 - сигнальный шлюз SG (Signalling Gateway), предназначенный для преобразования систем межстанционной сигнализации;
 - транкинговый шлюз TG (Trunking Gateway), выполняющий функции транспортного и сигнального шлюзов;
 - шлюз доступа AG (Access Gateway), выполняющий функции транспортного и сигнального шлюзов при подключении по интерфейсу V.5;
 - резидентный шлюз доступа RAG (Residential Access Gateway), предназначенный для подключения пользователей телефонных сетей и сетей ISDN;
- 5) пограничный контроллер соединений SBC (Session Border Controller), обеспечивающий сопряжение оборудования нескольких производителей и выполняющий функции шлюза сигнализации и медиа-шлюза, контроля за установлением соединений CAC (Call Admission Control), управления QoS, концентрации голосового и сигнального трафика;
- 6) сетевые устройства на основе стандарта H.323 для реализации узкополосных аудио и видео услуг в комбинированных коммутируемых и пакетных сетях:
 - шлюз H.323 AG (Access Gateway), предназначенный для преобразования медиа-потокa между коммутируемыми и пакетными сетями;
 - шлюз-привратник (Gatekeeper H.323), предназначенный для преобразования адресации (IP, телефонных номеров) между коммутируемыми и пакетными сетями, а также управления полосой пропускания;
 - блок многоточечного управления MCU (Multipoint Control Unit), предназначенный для обеспечения соединений «point-to-multipoint», «multipoint-to-multipoint», а также конференц-связи.

Концепция NGN предполагает создание регионального и магистрального сегментов сети. При этом на региональном уровне должно обеспечиваться подключение пользователей и предоставление им транспортных услуг, а также взаимодействие с аналогичными региональными транспортными сетями. На магистральном уровне должно обеспечиваться предоставление услуг переноса

конвергентного трафика для взаимодействия региональных сетей, а также для передачи трафика всех существующих сетей [8].

Модель звена транспортной сети NGN представлена на рис. 11. При этом в данной модели для реализации любых сетевых услуг в ТКС предполагается использование IP-технологии.

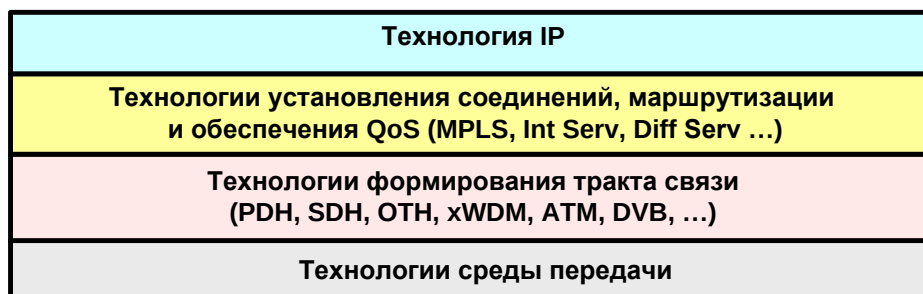


Рис. 11. Модель звена транспортной сети NGN [8]

При организации сети NGN основные функции уровня транспорта из модели NGN реализуются протоколами сетевого и транспортного уровня модели OSI. Именно эти протоколы выполняют в ТКС NGN функции маршрутизации, установления и разрыва соединений, а также обеспечения QoS трафика.

На транспортном уровне OSI в сети NGN для обеспечения QoS передаваемых потоков трафика могут использоваться как известные технологии обеспечения QoS, основанные на моделях Int Serv и Diff Serv, так и механизмы, встроенные в транспортные технологии канального уровня – ATM, MPLS, SDH, DVB и др.

На сетевом уровне OSI для маршрутизации в сети NGN на основе IP могут использоваться протоколы без установления соединения, такие как OSPF, IS-IS, RIP и др. Однако для маршрутизации потоков трафика в мультипротокольном ядре ТКС NGN на основе ATM и IP/MPLS используется протокол маршрутизации с установления соединения PNNI.

На канальном уровне ТКС NGN выполняются функции: формирования цифровых трактов связи – на основе технологий PDH, SDH, WDM, Ethernet (Gigabit Ethernet/10-Gigabit Ethernet), ATM, DVB-S, DVB-S2 и др.

Физический уровень как среда передачи сигналов – реализуется на основе волоконно-оптических, радиорелейных и спутниковых линий связи [8].

В соответствии с этим при построении сетей NGN обеспечиваются следующие сочетания транспортных технологий [8]:

- IP/ATM/SDH/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/ATM/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/SDH/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи;
- IP/ВОЛС;
- IP/MPLS/ВОЛС, радиорелейные, спутниковые линии связи.

Для построения сетей NGN нового поколения могут применяться технологии цифровых транспортных иерархий нового поколения OTN/OTH, а также технологии автоматически коммутируемых транспортных сетей ASON/ASTN,

которые будут обеспечивать более высокую эффективность использования сетевых ресурсов при передаче разнородного трафика. В перспективе построение транспортной сети CC СН на основе NGN будет эволюционировать к однородной конвергентной структуре на базе связки протоколов IP/MPLS – концепция «все по IP» (рис. 12). При этом данная транспортная сеть будет включать две плоскости: сетевой и сервисный [8].

Сетевая плоскость включает [8]:

- транспортную сеть IP/MPLS, выполняющую функции канального, сетевого и транспортных уровней модели OSI;
- пограничный интеллектуальный слой (шлюзы MG, SG, MGC), предназначенный для объединения, преобразования и передачи трафика по IP/MPLS сети;
- уровень доступа.

В свою очередь сервисный домен включает различные платформы приложений (в том числе IMS) и серверы приложений.

Данный подход обеспечит дальнейшее повышение эффективности использования сетевых ресурсов при внедрении NGN за счёт объединения различных ТКС фиксированной и мобильной связи в составе CC СН в единую транспортную сеть IP/MPLS, поддерживающую широкий спектр технологий доступа.

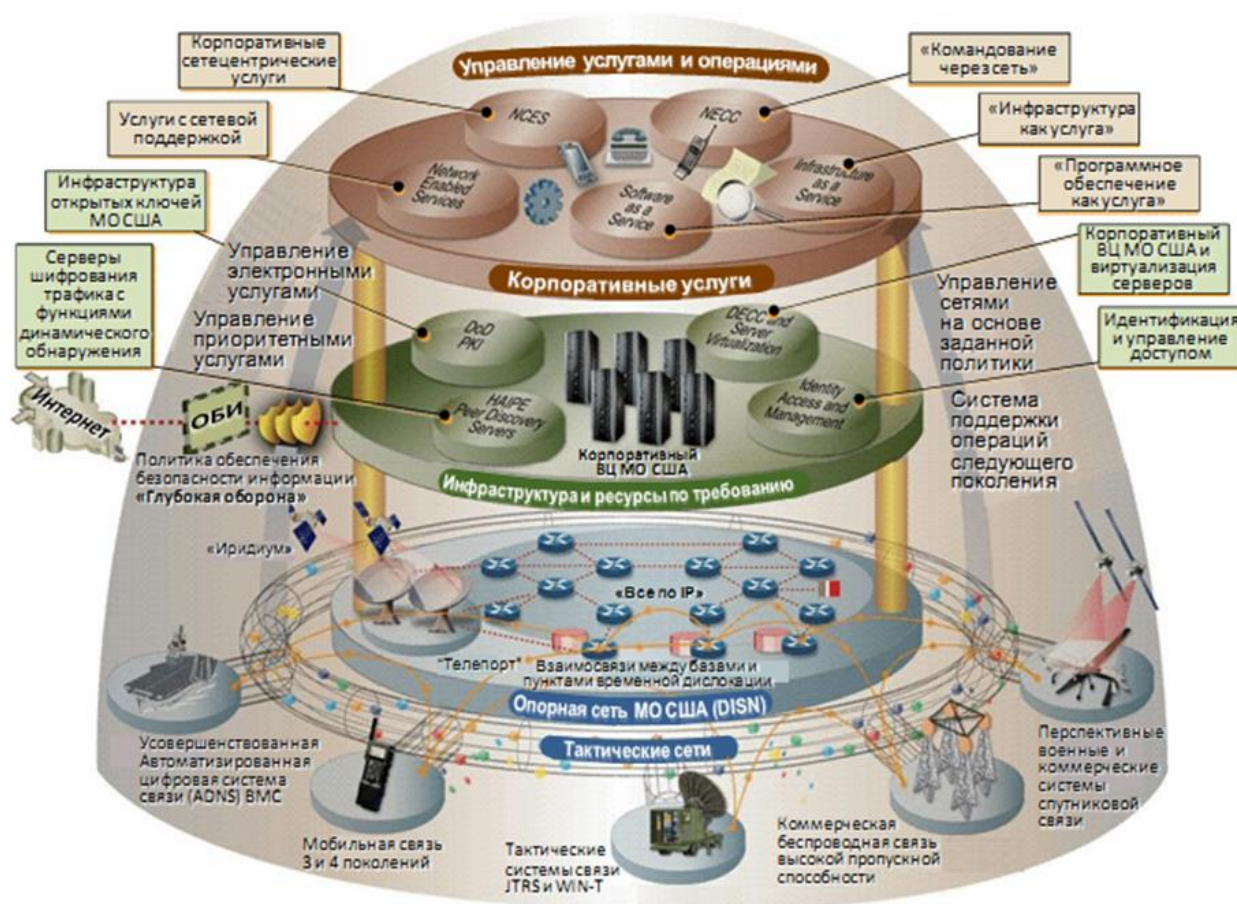


Рис. 12. Общая структура информационного пространства на основе GIG [54]

3.5. Переход от сетей связи специального назначения к инфокоммуникационным сетям специального назначения

Дальнейшее развитие концепции NGN в практике построения СС СН привело к эволюционной миграции от СС СН к инфокоммуникационным сетям специального назначения. Ключевым в таком переходе является развитие на основе концепции NGN информационных услуг, связанных не только с передачей информации, но и с ее сбором, обработкой, хранением, а также представлением ее пользователям по их запросам. Переход от СС СН на основе NGN к инфокоммуникационным сетям связан с развитием автоматизированных систем управления связью и интеграцией в них существующего задела в области управления ресурсами связи в СС ОП (прежде всего стандартов концепции TMN), виртуализации сетевых и вычислительных ресурсов, а также использование новых технологических решений по обеспечению устойчивости такой сети в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий.

Основные принципы формирования инфокоммуникационных сетей достаточно подробно рассмотрены в работах К.Е. Легкова [16-21] и А.Н. Буренина [20, 21].

Инфокоммуникационная сеть специального назначения (ИКС СН) – информационная система, обеспечивающая предоставление набора как связных, так и информационных услуг с гибкими возможностями по управлению ими и их персонализации, предназначенная для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [17].

Главное отличие ИКС СН от СС СН на основе NGN – это дополнительное предоставление пользователям и техническим средствам помимо связных еще и информационных услуг, связанных со сбором, обработкой, хранением и представлением информации пользователям. Предоставление этих услуг унифицировано и осуществляется соответствующими программно-аппаратными комплексами услуг, которые поддерживают широкий спектр ТКС в составе ИКС СН. Тем самым обеспечивается предоставления всем пользователям полного спектра услуг, связанных с как обменом информацией и ее передачей, так и с ее обработкой, хранением и накоплением [17].

Как правило, различные ИКС СН существенно отличаются друг от друга потребностями в ресурсах, объемом, структурой, возможностями, реальной пропускной способностью, а также безопасностью и устойчивостью [17].

Создаваемые в настоящее время ИКС СН следуют концепции NGN. Основой архитектурного построения ИКС СН являются транспортная сеть (как правило, двухуровневая), сети доступа, узлы информационных служб, узлы телекоммуникационных служб и узлы управления услугами [17].

В современных ИКС СН двухуровневая транспортная сеть связи, входящая в их состав, с соответствии с концепцией NGN является мультипротокольной и обеспечивает перенос разных видов информации с использованием различных протоколов передачи (PDH, SDH, ATM, FR, IP/MPLS и др.), т. е. реализует универсальную услугу связи, которая заключается в бесшовной передаче

информации пользователей между отдельными ТКС в составе ИКС без какого-либо анализа или обработки её содержания [17].

Средства ИКС СН помимо услуги связи предоставляют также информационные услуги, основанные на обработке и анализе информации пользователей. В рамках ИКС СН информационные услуги характеризуются транзакциями, которые осуществляются при запросе/активизации услуги. При этом сервис предоставления информационной услуги основан на том, что соответствующие услуги связи для информационных транзакций оказываются с заданным качеством. Пользователи могут воспользоваться информационными услугами ИКС СН напрямую или с помощью пользовательских приложений. При этом компоненты пользовательских услуг, обычно объединяются в пакеты, чтобы создать для конкретного пользователя требуемую сложную услугу или предоставить доступ к нескольким приложениям. Спектр информационных и связанных услуг, которые обычно обеспечиваются в рамках современных ИКС СН, достаточно широк. При этом он может динамически меняться вместе с изменением доступных ресурсов [17].

В целом ИКС СН составляет совокупность баз данных, средств обработки информации, взаимодействующих ТКС и множество терминалов пользователей. При этом доступ к информационным ресурсам ИКС СН реализуется посредством услуг нового типа – инфокоммуникационных услуг. Предполагается, что именно они будут преобладать в перспективных ИКС СН уже в ближайшем будущем [17].

К основным технологическим особенностям, отличающим инфокоммуникационные услуги от услуг связи, можно отнести следующие [17]:

- инфокоммуникационные услуги оказываются на прикладном уровне модели OSI, в то время как услуги связи предыдущего поколения предоставляются на транспортном и сетевом уровнях OSI;
- стандартизация инфокоммуникационных услуг ведется на основе стандарта OSE/RM (Open System Environment / Reference Model) и ISO/IEC TR 14252 которые существенно расширяют и дополняют модель OSI в части детализации прикладного уровня [18];
- большинство инфокоммуникационных услуг предполагает наличие клиентской части и серверной, при этом клиентская часть реализуется в оборудовании пользователя, а серверная – на специальном выделенном узле ИКС, называемом узлом служб;
- инфокоммуникационные услуги, как правило, предполагают передачу мультимедийной информации, которая характеризуется высокими скоростями передачи и асимметричностью входящего и исходящего информационных потоков;
- для предоставления инфокоммуникационных услуг зачастую необходимы сложные многоточечные топологические конфигурации сетевых соединений;
- для инфокоммуникационных услуг характерно разнообразие прикладных протоколов и возможностей по управлению услугами со стороны пользователя;

- для идентификации абонентов инфокоммуникационных услуг, как правило, используется дополнительная адресация в рамках данной инфокоммуникационной услуги.

Обобщенная информационная архитектура перспективной ИКС СН представлена на рис. 13.

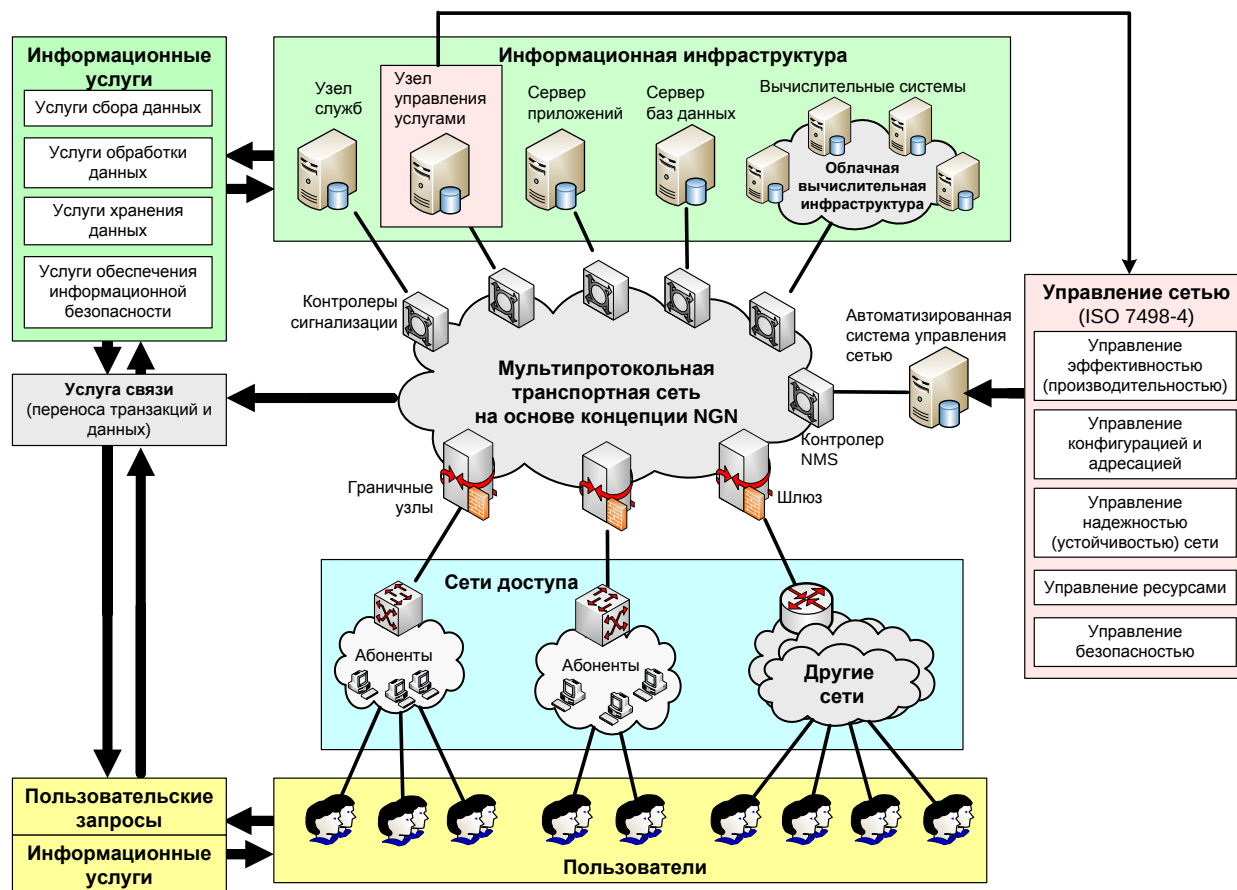


Рис. 13. Обобщенная архитектура перспективной ИКС СН

Особенностью интеграции сервиса оказания информационных услуг пользователя в ИКС СН является то, что существенно возрастет роль систем управления, как услугами, так и сетью. Для реализации функций управления создаются службы MNS (Network Management System), которые обеспечивают оптимальное функционирование сетей, распределенное планирование, управление и контроль сетевых элементов и ресурсов. Функции службы MNS описываются специальной моделью (рекомендации МСЭ-Т серии X.700, стандарт ISO 7498-4), которая определяет функции управления, виды услуг сетевой службы, предоставляемые для управления, структуру управляющей информации и протоколы, определяющие ее транспортировку по сети [19].

В соответствии с моделью ISO 7498-4 управление сетью обеспечивается локальным управлением всеми элементами, входящими в сеть. Модель охватывает следующие основные функции управления [19]:

- базовые протоколы технологии IP;
- маршрутные протоколы;
- протоколы групповой рассылки;

- протоколы повышения надежности маршрутизации;
- протоколы и технологии обеспечения качества обслуживания;
- протоколы обеспечения безопасности.

Подробные сведения о реализации процессов управления в сети в соответствии с моделью ISO 7498-4, а также о современных протоколах мониторинга и управления сетью представлены в работе [19].

4. Описательная модель сети связи специального назначения – основные протоколы и технологии

Как было показано выше, одной из основных тенденций развития СС СН является массовое использование в составе СС СН коммерческих протоколов и технологий. Опишем технологии функционирования СС СН и взаимодействие отдельных ТКС в ней более подробно.

При описании сетевого и транспортного уровней СС СН целесообразно протоколы и технологии разбить на несколько основных групп:

- базовые протоколы технологии IP;
- маршрутные протоколы;
- протоколы и механизмы поддержки качества обслуживания;
- протоколы групповой рассылки (multicast);
- протоколы повышения надежности маршрутизации;
- протоколы обеспечения безопасности.

Ниже рассмотрены особенности реализации и функционирования протоколов этих основных групп в ТКС входящих в состав СС СН в соответствии с их применением в коммерческих СС ОП, как это представлено в работах [35, 36, 42-45, 62].

4.1. Базовые протоколы технологии IP

К базовым протоколам технологии IP относятся как собственно протоколы IPv4 или IPv6, так и протоколы, обеспечивающие его работу – Internet Control Message Protocol (ICMP), Address Resolution Protocol (ARP), Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP). Эти базовые протоколы поддерживаются всеми устройствами сетевого уровня.

Протоколы IPv4 или IPv6 определяют ряд основополагающих параметров и механизмов сетевого уровня. К ним относятся [42]:

- формат IP-пакета;
- сетевую адресацию;
- фрагментацию дейтаграммы на составные части;
- защиту дейтаграммы от заикливания;
- адрес протокола транспортного уровня, которому предназначена дейтаграмма.

Протокол ICMP используется для передачи сообщений об ошибках и других исключительных ситуациях, возникших при передаче трафика, например, если запрашиваемая услуга связи недоступна, или маршрутизатор не отвечает. Протокол ICMP является самостоятельным для IPv4 и встроен в IPv6 [42].

Протокол ARP используется для получения адреса канального уровня MAC по известному адресу IP. Протокол ARP является самостоятельным для IPv4 и встроен в IPv6 [42].

Протокол DHCP используется для динамической настройки параметров узлов сети. Он наиболее широко используется для получения динамического адреса узла. Данный протокол содержит серверную часть, обслуживающую динамические запросы от узлов и клиентскую часть. При отсылке данных используется сервисом транспортного уровня UDP [42].

В сетях CC CN построенных в соответствии с концепцией NGN на основе технологии IP/MPLS к базовым протоколам также можно отнести протокол MPLS. Этот протокол обеспечивает создание виртуальных каналов в IP-сети, присвоению IP-пакетам специализированных меток и последующей передачей их по виртуальным каналам с использованием технологии быстрой коммутации по меткам. Кроме указанных функций протокол MPLS поддерживает механизмы оптимизации и управления трафиком для обеспечения высокого QoS.

4.2. Маршрутные протоколы

К протоколам маршрутизации в CC CN относят протоколы обмена служебной информацией, обеспечивающие построение сетевыми устройствами таблиц маршрутизации, которые в дальнейшем используются для поиска кратчайших путей передачи трафика между узлами сети.

Различают статическую и динамическую маршрутизацию. Статическая маршрутизация в CC CN используется маршрутизаторами в сетях доступа для тех случаев, когда имеется единственный маршрут доставки пакетов. Статическая маршрутизация используется также для работы в подсетях на основе технологий коммутации каналов (таких как PDH, SDH, OTN), где из-за отсутствия постоянных соединений функционирование протоколов динамической маршрутизации невозможно. Во всех остальных случаях, как правило, в CC CN используется динамическая маршрутизация [51-53].

Протоколы динамической маршрутизации функционально разделяются на [42]:

- протоколы «внутреннего шлюза» (Interior Gateway Protocol – IGP);
- протоколы «наружного шлюза» (Exterior Gateway Protocols – EGP).

Протоколы IGP используются внутри отдельных ТКС, которые с точки зрения сетевого уровня являются автономными системами (областями) маршрутизации в составе CC CN. Основная задача протоколов IGP – автоматическое объединение маршрутизаторов, принадлежащих одной области и связанных каналами связи, в единую сеть. Маршрутизаторы рассылают и используют полученную служебную информацию для построения матриц маршрутов с заданным критерием эффективности. Протоколы IGP характеризуются полным представлением структуры сети, принадлежащей конкретной ТКС.

К протоколам группы IGP относятся следующие протоколы [42]:

- протоколы на основе оценки состояния каналов (OSPF, IS-IS и др.);
- дистанционно-векторные протоколы (RIP, RIPng, IGRP, EIGRP и др.).

В ТКС на основе IP наибольшее распространение получили протоколы RIP, RIPng (для IPv6), OSPF. В составе ТКС, которые построены на оборудовании Cisco, могут использоваться протоколы IGRP или EIGRP. В ТКС на основе технологии IP/MPLS используются протокол установления и поддержания соединений PNNI в котором поиск кратчайших путей реализован через протокол OSPF. В дальнейшем, после установления соединений, передача IP трафика в них производится путем назначения меток и быстрой коммутации по меткам на основе протокола MPLS.

В качестве протоколов IGP также используют сервисные протоколы, обеспечивающие перенос сообщений об изменении топологии сетей от сторонних областей маршрутизации между граничными устройствами своей области маршрутизации. К данным протоколам относятся: IBGP, MP BGP [42].

Протоколы EGP используются при обмене маршрутной информацией между отдельными ТКС внутри СС СН, а также между ТКС отдельного функционального назначения или между ТКС различных уровней государственного или военного управления. Они обеспечивают перенос в СС СН сообщений об изменении топологии сетей отдельных ТКС, а также обмен информацией о достижимости ТКС из других автономных областей маршрутизации. Их задача – автоматическое информирование о достижимых сетях через межсетевой интерфейс. Протоколы EGP еще называют протоколами маршрутизации на основе политик, позволяя определить условия использования сервисов доступа и переноса трафика через транзитные ТКС внутри СС СН. К широко распространенным протоколам EGP относятся протоколы группы BGP (Border Gateway Protocol): IBGP, BGP4, EBGP. Причем наибольшее распространение в СС СН получил протокол BGP4. Протоколы межсетевого взаимодействия ТКС внутри СС СН из группы EGP-протоколов и протокол DNS являются основными протоколами, обеспечивающими объединение отдельных ТКС в единую СС СН (это верно, как для СС СН и СС ОП, так и для глобальной сети Интернет) [42].

4.3. Протоколы групповой рассылки

К протоколам групповой рассылки (multicast) относят протоколы, обеспечивающие эффективную доставку информации до абонентов СС СН, объединенных в группу. Здесь под эффективностью понимают минимизацию трафика, или числа пакетов, которые должны дублировать маршрутизаторы при передаче их через сеть. К данным протоколам в СС СН относятся [42, 51-53]:

- протокол IGMP (Internet Group Management Protocol) – протокол управления групповой передачей данных в сетях, основанных на протоколе IP и сходный по принципам функционирования с протоколом ICMP. Этот протокол используется маршрутизаторами для организации сетевых устройств в группы;
- семейство протоколов PIM (Protocol Independent Multicast) – использует данные функционирующих в IP сети протоколов маршрутизации для построения путей, проведения групповой рассылки пакетов и мно-

гоадресной маршрутизации. Довольно часто протоколы семейства PIM используются совместно с протоколом DVMRP;

- Протокол дистанционно-векторной многоадресной маршрутизации DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) – предназначен для маршрутизации пакетов внутри автономных областей маршрутизации в IP сетях при групповой рассылке сообщений;
- протокол MARS (Multicast Address Resolution Server) – сервер разрешения широковещательных адресов, предназначенный для организации соединений «точка-группа».

Наиболее важным для служебных целей маршрутизации в СС СН являются протоколы семейства PIM (PIM-DM, PIM-SM, PIM-SSM). Они позволяют строить множество кратчайших путей от источника к получателю с определением места каждого маршрутизатора в составе пути и дублированием рассылки пакетов другим маршрутизаторам или группе абонентов, являющихся получателями.

4.4. Протоколы повышения надежности маршрутизации

К данной группе относят протоколы, которые обеспечивают повышение устойчивости и функционирования базовых протоколов СС СН. В своем большинстве, эти протоколы направлены на обеспечение надежности маршрутизации в условиях резко меняющейся интенсивности трафика – так называемым «пульсациям» трафика.

К протоколам повышения надежности маршрутизации и доставки пакетов можно отнести [51-53]:

- протоколы группы STP (Spanning Tree Protocol): RSTP, PVSTP, MSTP – позволяют обнаружить петли в транспортных сетях Ethernet, заблокировать их, а в случае отказа каналов сети использовать эти петли для формирования резервных направлений связи;
- протокол IP-Trunk для объединения отдельных IP-соединений со сходными требованиями к QoS на сетевом уровне в магистрали соединений (так называемые «транки»);
- протокол резервирования сетевых ресурсов RSVP (Resource ReSerVation Protocol) – позволяет зарезервировать сетевые ресурсы маршрутизаторов для обеспечения QoS в соответствии с моделью IntServ;
- протоколы технологий CES (Circuit Emulation Service): TDMoIP и TDMoP – для обеспечения эмуляции типовых каналов цифровой иерархии PDH и SDH при передаче трафика через пакетные сети;
- протоколы виртуализации маршрутизаторов HSRP (Hot Standby Router Protocol) и VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol) – предназначены для повышения надежности основного маршрутизатора сети (маршрутизатора по умолчанию) путем объединения группы маршрутизаторов в один виртуальный маршрутизатор и назначения им общего IP-адреса;

- протокол резервирования маршрутизаторов в территориально распределенных сетях E-Trunk – обеспечивает резервирование и обмен служебной информацией между граничными маршрутизаторами ТКС, а при выходе из строя одного из них – перенаправление трафика на другой граничный маршрутизатор.

4.5. Протоколы и технологии обеспечения качества обслуживания

Для обеспечения обслуживания трафика, предъявляющего различные требованиям к сетевым характеристикам обмена, на сетевом и транспортном уровнях в СС СН используются стандартные архитектуры обеспечения качества обслуживания QoS.

К основным архитектурам обеспечения QoS в СС СН относятся [62]:

- обслуживание с максимальными усилиями, но без гарантий (Best Effort) – использует механизм выделения дополнительной пропускной способности без использования тонких способов управления трафиком;
- *интегрированное обслуживание* (IntServ – Integrated Service) – использует протокол RSVP для резервирования сетевых ресурсов в каналах и узлах сети на этапе установления соединения, после чего обеспечивает QoS во всем соединении путем контроля соблюдения QoS во всех промежуточных элементах сети;
- *дифференцированное обслуживание* (DiffServ – Differentiated Service) – вводит классификацию трафика по классам обслуживания CoS (Class of Service) на границе сети, определяет требуемое QoS для каждого класса обслуживания, с последующим распределением сетевых ресурсов сети с целью гарантировать QoS допущенного в сеть трафика. Данная архитектура поддерживает управление формированием трафика (классификация пакетов, маркировка, управление интенсивностью и др.) и управления политикой (распределение сетевых ресурсов, политика отбрасывания пакетов и т. д.).

Основной архитектурой обеспечения качества обслуживания в СС СН, как правило, является DiffServ. Для обеспечения высокой эффективности архитектуры DiffServ ее должны поддерживать все сетевые устройства СС СН.

Архитектура DiffServ поддерживает три базовых класса обслуживания трафика [62]:

- трафик «реального времени» (Real Time – RT);
- приоритетный трафик (Priority – P);
- непероритетный трафик (Non priority – NP).

Для трафика класса RT поддерживается 4 приоритета абонентов, для классов P, NP – 3 приоритета абонентов.

Зачастую производители оборудования для СС СН разрабатывают отдельные соответствия маркировок классов обслуживания для трафика специальных абонентов, взяв за основу классы обслуживания, принятые в технологиях DiffServ для MPLS.

Сетевые устройства, поддерживающие DiffServ используют [62]:

- различные выходные очереди для трафика различных классов обслуживания, а также основанную на этих классах приоритетную дисциплину обслуживания этих очередей CQ (Class based Queuing);
- механизмы раннего обнаружения перегрузок RED (Random Early Detection) для контроля за длиной очередей в узлах сети и обнаружения их перегрузок.

Механизм RED важен для обеспечения требуемых показателей QoS в каждой автономной области маршрутизации.

Граничные маршрутизаторы в каждой автономной области маршрутизации (т. е. в каждой ТКС в составе СС СН) должны поддерживать классификацию трафика (traffic classification), а также сопоставление интенсивности поступающего трафика и достаточности доступных сетевых ресурсов для его обслуживания. Для контроля перегрузок и выполнения ограничений по интенсивности и структуре трафика в своей области маршрутизации (в отдельной ТКС) граничные маршрутизаторы могут использовать следующие стандартные технологии [62]:

- технологии формирования трафика (Shaping);
- технологии контроля параметров трафика (Traffic Policing).

При контроле параметров трафика используются технологии:

- «дырявого ведра» (Leaky Bucket);
- «маркерного ведра» (Token Bucket).

При невозможности обслуживания трафика в конкретной области маршрутизации (в отдельной ТКС в составе СС СН) поступающий трафик либо сбрасывается, либо буферизируется с пометкой «Best Effort». Данная пометка означает, что трафик будет обслужен без гарантий обеспечения требований к QoS, но с максимальными усилиями со стороны сетевых устройств по его соблюдению. Для технологии MPLS трафик IP инкапсулируется, а класс MPLS маркируется заново [62].

В СС СН модель DiffServ, может быть реализована совместно с моделями «Best Effort» и IntServ, дополняя друг друга. Например, в отсутствие трафика определенного класса, в отведенной ему полосе обслуживания может передаваться трафик «Best Effort». В сетях с ограниченными ресурсами, дополнительно могут реализоваться функции RSVP протокола, позволяющие выборочно резервировать сетевые ресурсы под соединение для специальных абонентов с высоким приоритетом. Функционал RSVP запросов относится к модели IntServ [62].

4.6. Протоколы безопасности

Для СС СН определены следующие функции безопасности [46]:

- аутентификация (обеспечивает аутентификацию абонентов и пользователей по общению, а также аутентификацию источника данных в СС СН);

- управление доступом (позволяет ограничить режимы взаимодействия сетей и обеспечить сокрытие информации о структуре и особенностях построения как отдельных ТКС, так и СС СН в целом, путем фильтрации пакетов и сообщений на сетевом, транспортном и прикладном уровнях OSI по соответствующим группам служебных атрибутов, извлекаемых из этих сообщений);
- конфиденциальность и целостность трафика в режиме, как с установлением соединения, так и без него (достигается криптографической защитой данных на физическом, канальном, сетевом, транспортном и прикладном уровне);
- целостность соединений с обеспечением и без обеспечения возможности их восстановления (позволяет обнаруживать изменения данных, передаваемых в рамках уже установленных соединений);
- безотказность, или защита от отказа источника или получателя сообщений (основана на использовании криптографических протоколов, которые обеспечивают надежные гарантии отправки и доставки сообщений для их источника/получателя).

К протоколам СС СН, которые обеспечивают эти функции безопасности, относятся [46, 51-53, 64]:

- протоколы фильтрации IP-адресов (IP-filtering);
- протоколы доступа на основе списков (ACL-lists) выполняемые на маршрутизаторах и межсетевых экранах;
- функции авторизации при обмене динамической маршрутной информацией между маршрутизаторами IS-IS authorization, EBGp authorization;
- протоколы виртуальных каналов и сетей;
- другие протоколы.

Кроме того, в состав СС СН, как правило, включаются специализированные закрытые протоколы шифрования, управления ключевой информацией, электронной цифровой подписи, авторизации, а также другие протоколы и технологии, направленные на обеспечение информационной безопасности в СС СН. Более развернутое описание защищаемых ресурсов и требований к протоколам безопасности с учетом специфики СС СН представлено в работе [64].

4.7. Межсистемные протоколы и интерфейсы

Обобщая вышеуказанное, на основе анализа работ [8-11, 25-28, 51-53, 62] возможно сформулировать перечень основных протоколов и интерфейсов которые будут заимствованы из сферы связи гражданского назначения и планируется к использованию в составе элементов СС СН.

К таким коммерческим протоколам, получившим широкое распространение в СС СН, относятся следующие.

1) Базовые протоколы СС СН обеспечивающие передачу данных:

- IP v4;
- IP v6;

- MPLS;
 - ICMP;
 - ARP;
 - DHCP.
- 2) Протоколы маршрутизации:
- а) для внутрисетевой маршрутизации (IGP):
 - OSPF;
 - IS-IS;
 - PNNI;
 - IGRP (EIGRP) – при использовании оборудования Cisco;
 - RIP и другие.
 - а) для межсетевой маршрутизации (EGP):
 - BGP 4;
 - EBGP;
- 3) Протоколы групповой рассылки:
- IGMP;
 - PIM (PIM-DM, PIM-SM, PIM-SSM);
 - DVMRP.
- 4) Протоколы повышения надежности маршрутизации:
- STP, RSTP, PVSTP, MSTP;
 - IP-trunk, E-trunk;
 - RSVP;
 - TDMoIP, TDMoP;
 - HSRP, VRRP.
- 5) Протоколы и технологии обеспечения качества обслуживания:
- архитектуры обеспечения качества обслуживания:
 - DiffServ;
 - Best Effort;
 - маркировка трафика – на основе маркировок DiffServ;
 - технологии DiffServ на входных граничных маршрутизаторах:
 - классификация трафика по классам обслуживания;
 - технологии контроля параметров трафика (Traffic Policing) при помощи механизмов «дырявого ведра» (Leaky Bucket) и «маркерного ведра» (Token Bucket);
 - сброс или перемаркировка избыточного трафика;
 - технологии DiffServ на выходных граничных маршрутизаторах:
 - технологии формирования трафика (shaping) на основе механизма «дырявого ведра» (Leaky Bucket);
 - управление очередями CQ в маршрутизаторах основанное на классах обслуживания;
 - раннее обнаружение перегрузок RED;
 - сброс или перемаркировка избыточного трафика.
- 6) Протоколы обеспечения безопасности:
- IP-фильтрация;
 - листы доступа ACL;

- авторизация маршрутного протокола EBGP;
- другие специализированные протоколы.

К интерфейсам ТКС в составе СС СН, которые также широко заимствуются из сферы гражданской связи, относятся следующие.

1) На физическом уровне модели OSI.

а) Консольные порты:

- RS-232;
- USB 2.0.

б) Интерфейсы пакетной сети:

- Ethernet 100BASE-SX (FX) – многомодовые (одномодовые) ВОЛС;
- Ethernet 100BASE-TX, IEEE 802.3u;
- E1 G.703/G704 (E2, E3, E4);
- STM-1, STM-4, STM-16;
- интерфейсы систем связи предыдущих поколений.

в) Протоколы управления:

- SNMP v.3;
- XML;
- SSH;
- Telnet;
- CLI;
- FTP, TFTP.

2) На канальном уровне модели OSI:

- IEEE 802.3 (Ethernet);
- PPP, MP-PPP;
- кадры Jumbo;
- авторизация и аутентификация (PAP/CHAP, 802.1X, RADIUS);
- L2 VPN;
- резервирование (LAG);
- Ethernet OAM;
- QoS DiffServ;
- STP, RSTP, PVSTP, MSTP.

3) На сетевом уровне модели OSI.

- IPv4, IPv6;
- MPLS;
- BGP4;
- Балансировка трафика IP;
- многоадресные протоколы (PIM, DVMRP);
- авторизация и аутентификация (RADIUS).

4) На транспортном уровне модели OSI:

а) Обеспечение качества обслуживания средствами IntServ:

- RSVP;

б) Обеспечение качества обслуживания средствами DiffServ:

- формирование трафика (Shaping) на входящих и исходящих интерфейсах;

- регулирование трафика на исходящих интерфейсах (буферирование LLQ, WFQ, CB WFQ, WRED и т.д.);
- управление доступом (контроль доступа на базе адресов IP, портов TCP/UDP, полей TOS/DSCP и т. д.);
- как «прозрачный» перенос полей ToS и DSCP, так и их переопределение;
- ICMP;
- резервирование VRRP.

Таким образом, наблюдается устойчивая тенденция по все более широкому использованию в сетевом оборудовании CC СН технологий и протоколов из гражданской отрасли связи. Это, с одной стороны, позволяет значительно сократить время и финансовые расходы на разработку и внедрение в CC СН новейших технологий, однако с другой, делает такие CC СН уязвимыми к преднамеренным дестабилизирующим воздействиям характерным для военного времени.

Выводы

CC СН – это сеть связи, функционирующая в интересах государственной и военной систем управления. В условиях перехода этих систем управления к сетевым принципам построения для CC СН становятся характерны следующие основные тенденции по ее технологическому построению:

- переход от иерархического принципа построения CC СН к децентрализованной сетевой структуре, которая в большей степени соответствует современным требованиям к системам государственного и военного управления, а также условиям ведения боевых действий характеризующимся высокой динамикой развития и мобильностью ее участников;
- отказ от построения CC СН на основе отдельной связной инфраструктуры и переход к построению CC СН на основе гибридного подхода, когда отдельные сегменты CC ОП национальных и региональных операторов связи, а также сегменты глобальных сетей используются в качестве элементов транспортной инфраструктуры CC СН;
- отказ от использования в CC СН закрытых и специализированных протоколов связи и максимальное широкое использование для построения элементов CC СН коммерческих протоколов и технологий, применяемых в гражданской сфере связи и телекоммуникаций.

Использование в качестве сегментов CC СН арендуемых каналов и сетей CC ОП, а также массовое использование в CC СН коммерческих протоколов связи делает CC СН уязвимой к атакам средств РЭП и ИТВ. Эти атаки (особенно атаки ИТВ) могут проводиться на CC СН через сетевые сегменты общие с CC ОП, так как CC ОП, как правило, подключены к глобальной информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

Литература

1. Барашков П. Н., Родимов А. П., Ткаченко К. А., Чуднов А. М. Модель системы связи с управляемыми структурами в конфликтных условиях. – Л.: ВАС, 1986. – 52 с.
2. Лялюк И. Н. С4I: системы связи, АСУ и разведки вооруженных сил США. – М.: ВАТУ, 2000.
3. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
4. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационных систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. – 476 с.
5. Будко П. А., Чихачев А. В., Баринов М. А., Винограденко А. М. Принципы организации и планирования сильносвязной телекоммуникационной среды сил специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 8-12.
6. Линец Г. И. Системные аспекты теории синтеза и практика построения телекоммуникационных сетей. – Ставрополь: Альфа-Принт, 2010. – 460 с.
7. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. – 34 с.
8. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.
9. Давыдов А. Е., Хейстонен Д. П. Построение модели системы управления телекоммуникационной сетью специального назначения // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 2. С. 124-130.
10. Давыдов А. Е. Концептуальные подходы к построению адаптивных мультисервисных сетей специального назначения // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 10.12.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya/ (дата обращения 08.06.2017).
11. Сухотеплый А. П., Давыдов А. Е., Савицкий О. К., Лукьянчик В. Н. К вопросу создания стационарной компоненты наземного эшелона ОАЦСС ВС РФ на территории РФ и сопредельных государств в условиях сетецентрических войн // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 10.12.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/k_voprosu_sozdaniya_stacionarnoj_komponenty_nazemnogo_eshelona_oacss_vs_rf_na_territorii_rf_i_sopredelnyh_gosudarstv_v_usloviyah/ (дата обращения 08.06.2017).
12. Лебедев С. Ф., Сызранцев Г. В., Добровольский В. С., Лукин К. И., Даниленко А. Н. Базовые положения методики формирования (построения) рационального варианта автоматической полевой сети связи общего пользования специального назначения // Вопросы оборонной техники.

Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 1-2. С. 79-84.

13. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Даниленко А. Н. Модель функционирования автоматической сети связи общего пользования полевой системы связи специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 1-2. С. 85-93.

14. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Шмелев А. А., Неверов А. П. Модель функционирования автоматической первичной сети связи высокодинамичной системы связи специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 11-12. С. 65-69.

15. Сызранцев Г. В., Лукин К. И., Иншин Г. В., Лебедев С. Ф. Автоматическая первичная сеть связи на телекоммуникационном оборудовании технологий NGPDH и NGSDH // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 3-4. С. 63-69.

16. Легков К. Е. Многоуровневые модели инфокоммуникационных сетей специального назначения // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 12. С. 32-36.

17. Легков К. Е. Организация и модели функционирования современных инфокоммуникационных сетей специального назначения // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 8. С. 14-20.

18. Легков К. Е., Мясникова А. И. Управление инфокоммуникационными услугами в мультисервисных сетях специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2012. № 3. С. 20-22.

19. Легков К. Е., Емельянов А. В. Концепция управления сетями в модели взаимодействия открытых систем // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 3. С. 83-92.

20. Буренин А. Н., Легков К. Е. Особенности архитектур, функционирования, мониторинга и управления полевыми компонентами современных инфокоммуникационных сетей специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2013. № 3. С. 12-17.

21. Буренин А. Н., Легков К. Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения управления. – М.: Медиа паблишер, 2015. – 348 с.

22. Исаков Е. Е. Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 400 с.

23. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.

24. Антонович П. И., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Ушанев К. В. Перспективные способы деструктивного воздействия на системы военного управления в едином информационном пространстве // Вестник Академии военных наук. 2014. № 3 (48). С. 93-101.

25. Шнепс-Шнеппе М.А. «Красный телефон» на DISN сети как родимое пятно в среде AS-SIP // International Journal of Open Information Technologies. 2015. Т. 3. № 6. С. 7-12.
26. Шнепс-Шнеппе М. А., Намиот Д. Е. Об эволюции телекоммуникационных сервисов на примере GIG // International Journal of Open Information Technologies. 2015. Т. 3. № 1. С. 1-13.
27. Шнепс-Шнеппе М. А. От IN к IMS. О сетях связи военного назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 1. С. 1-11.
28. Шнепс-Шнеппе М. А., Намиот Д. Е., Цикунов Ю. В. Телекоммуникации для военных нужд: сеть GIG-3 по требованиям кибервойны // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 10. С. 3-13.
29. Соколов Н. А. Системные аспекты построения и развития сетей электросвязи специального назначения // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Т. 2. № 9. С. 4-8.
30. Нетес В. А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN // Вестник связи. 2007. № 9. С. 1-8.
31. Давыдов А. Е. Концептуальные подходы к построению автоматизированной системы управления связью адаптивных мультисервисных сетей специального назначения // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 12.11.2012. – URL: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/conceptual_approaches_to_constructing_an_automated_control_system_for_adaptive_multi-service_special-purpose_networks/ (дата обращения 08.06.2017).
32. О связи. Федеральный закон РФ от 07.07.2003 № 126-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации от 14 июля 2003 г. № 28 ст. 2895.
33. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.
34. Макаренко С. И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 352 с.
35. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. Учебник. Часть 1. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения / Под ред. С.М. Одоевского. – СПб.: ВАС, 2010. – 432 с.
36. Коробицин А. А., Кудрявцев А. М., Смирнов А. А. Информационные и сетевые технологии в автоматизированных системах специального назначения: учебное пособие. – СПб.: ВАС, 2015. – 132 с.
37. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005. Информационная технология. Практические правила управления информационной безопасностью. Национальный стандарт РФ. – М., 2007.
38. Шнепс-Шнеппе М. А. Телекоммуникации Пентагона: цифровая трансформация и киберзащита. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 272 с.

39. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.053-2005. Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации. – М., 2006.

40. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М., 2009.

41. Попков В. К., Блукке В. П., Дворкин А. Б. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 63-78.

42. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 945 с.

43. Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы: учебник – М.: Горячая линия - Телеком, 2013. – 397 с.

44. Крухмалев В. В., Гордиенко В. Н., Моченов А. Д., Иванов В. И., Бурдин В. А., Крыжановский А. В., Марыкова Л. А. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей / Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия - Телеком, 2004. – 510 с.

45. Соколов Н. А. Телекоммуникационные сети. Монография в 4-х частях. – М.: Альварес Пабблишинг, 2003, 2004.

46. Агеев С. А., Саенко И. Б. Управление безопасностью защищенных мультисервисных сетей специального назначения // Труды СПИИРАН. 2010. № 2 (13). С. 182-198.

47. Будко П. А., Чихачев А. В., Баринев М. А., Винограденко А. М. Основные направления организации и планирования телекоммуникационной среды сил специального назначения // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2013. Т. 5. № 4. С. 18-23.

48. Об информации, информационных технологиях и о защите информации. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ // Собрание законодательства РФ, 31.07.2006, № 31 (1 ч.), ст. 3448.

49. Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А. Потенциальные угрозы для сетей специального назначения // Вестник связи. 2015. № 1. С. 28-31.

50. Гольдштейн Б. С., Пинчук А. В., Соколов Н. А. Минимизация рисков устойчивости функционирования современных ССН // Вестник связи. 2015. № 6. С. 49-51.

51. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России - 2012 / По ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова, И.П. Иванова, С.В. Дворянкина, А.В. Куц, А.В. Квитко, П.А. Важева, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 156 с. – URL: www.informost.ru (дата обращения 03.02.2015).

52. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 216 с. – URL: www.informost.ru (дата обращения 03.02.2015).

53. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.

54. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями войск (сил) [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 16-20.

55. Гольдштейн Б. С., Пинчук А. В., Соколов Н. А. Минимизация рисков устойчивости функционирования современных ССН // Вестник связи. 2015. № 7. С. 17-18.

56. Паршин С., Кожанов Ю. Современные тенденции в совершенствовании системы управления вооруженными силами ведущих зарубежных стран в информационную эпоху // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 7. С. 3-9.

57. Янов О., Ширяев В. Участие Министерства обороны США в федеральной программе создания «Среды совместного использования информации» // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 12. С. 15-21.

58. Гаврилов А. Автоматизированная система сбора, обработки и распределения разведывательной информации СВ США DCGS-A // Зарубежное военное обозрение. 2010. № 7. С. 32-40.

59. Военная сеть США будет построена на маршрутизаторах Juniper Networks // Poplar Systems [Электронный ресурс]. 13.01.2004. – URL: <http://www.poplar.ru/view.php3?cls=news&vguid=1256&guid=1256&parent=1255> (дата обращения 13.06.2017).

60. Кобозев Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения [Доклад] // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. С. 7-9.

61. Макаренко С. И., Чаленко Н. Н., Крылов А. Г. Сети следующего поколения NGN // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 81-102. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/05-Makarenko.pdf> (дата обращения: 07.06.2017).

62. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.

63. Макаренко С. И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18-69. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf> (дата обращения: 10.10.2017).

64. Буренин А. Н., Легков К. Е. Вопросы безопасности инфокоммуникационных систем и сетей специального назначения: основные угрозы, способы и средства обеспечения комплексной безопасности сетей // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 3. С. 46-61.

References

1. Barashkov P. N., Rodimov A. P., Tkachenko K. A., Chudnov A. M. *Model' sistemy svyazi s upravlyaemyimi strukturami v konfliktnykh usloviyakh* [Model of communication system with controlled structures in conflict settings]. Leningrad, Military Communications Academy, 1986. 52 p. (in Russian).
2. Lialyuk I. N. *C4I: sistemy svyazi, ASU i razvedki vooruzhennykh sil SShA* [C4I: communications systems, automation and intelligence of the armed forces of the United States.]. Moscow, Military aviation technical University, 2000. (in Russian).
3. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Effektivnost' sistem voennoi svyazi i metody ee otsenki* [The effectiveness of military communications systems and assessment methods]. Saint-Petersburg, Military Communications Academy, 2006. 183 p. (in Russian).
4. Budko P. A., Rismann O. V. *Mnogourovnevnyy sintez informacionno-telekommunikatsionnykh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizatsii* [Multi-Level Synthesis of Information Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization. Treatise]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011. 476 p. (in Russian).
5. Budko P. A., Chikhachev A. V., Barinov M. A., Vinogradenko A. M. Principles of the organization and planning of strongly connected telecommunication environment of forces of a special purpose. *T-Comm*, 2013, vol. 7, no. 6, pp. 8-12 (in Russian).
6. Linets G. I. *Sistemnye aspekty teorii sinteza i praktika postroyeniya telekommunikatsionnykh setey* [System aspects of the theory of fusion and practice the design of telecommunication networks]. Stavropol, Alfa-Print Publ., 2010. 460 p. (in Russian).
7. Linec G. I. *Metody strukturno-parametricheskogo sinteza, identifikatsii i upravleniya transportnymi telekommunikatsionnymi setyami dlya dostizheniya maksimal'noy proizvoditel'nosti*. Diss. dokt. tehn. nauk [The Methods of Structural Parametric Synthesis, Identification and Control of Transport Telecommunication Networks for Achievement of the Maximum Productivity. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Stavropol, Northern-Caucasus State University, 2013. 34 p. (In Russian).
8. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazateley kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setey svyazi sleduyushchego pokoleniya* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krasnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (In Russian).

9. Davydov A. E., Heystonen D. P. Building the model for controls of a special-purpose telecommunication network. *Questions of radio-electronics*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 124-130.

10. Davydov A. E. Conceptual approaches to constructing adaptive multi-service special-purpose networks. *Research Institute 'Masshtab'*. 10.12.2012. Available at:

http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).

11. Suhoteply A. P., Davydov A. E., Savicky O. K., Luk'yanchik V. N. Fixed component of ground echelon of the integrated automatic digital communications network of the armed forces of the Russia and neighbouring states under the conditions of network-centric wars. *Research Institute 'Masshtab'*. 10.12.2012. Available at:

http://mashtab.org/company/massmedia/articles/k_voprosu_sozdaniya_stacionarnoj_komponenty_nazemnogo_eshelona_oacss_vs_rf_na_territorii_rf_i_sopredelnyh_gosu_darstv_v_usloviyah/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).

12. Lebedev S. F., Syzrantsev G. V., Dobrovol'skii V. S., Lukin K. I., Danilenko A. N. Bazovye polozheniia metodiki formirovaniia (postroeniia) ratsional'nogo varianta avtomaticheskoi polevoi seti sviazi obshchego pol'zovaniia spetsial'nogo naznacheniiia [The basic provisions of a technique of forming (constructing) a reasonable option for automatic field communications network for General use special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 1-2, pp. 79-84 (in Russian).

13. Syzrantsev G. V., Lukin K. I., Inshin G. V., Danilenko A. N. Model funktsionirovaniia avtomaticheskoi seti sviazi obshchego pol'zovaniia polevoi sistemy sviazi spetsial'nogo naznacheniiia [The model of functioning of the automated communication network of General use field communication systems of special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 1-2, pp. 85-93 (in Russian).

14. Syzrantsev G. V., Lukin K. I., Inshin G. V., Shmelev A. A., Neverov A. P. Model funktsionirovaniia avtomaticheskoi pervichnoi seti sviazi vysokodinamichnoi sistemy sviazi spetsial'nogo naznacheniiia [The model of functioning of the automated primary communications network with highly dynamic communication systems of special purpose]. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2012, no. 11-12, pp. 65-69 (in Russian).

15. Sizranchev G., Lukin K., Inshin G., Lebedev S. Automatic primary communication net on telecommunication equipment NGPDH NGSDH technology. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2013, no. 3-4, pp. 63-69 (in Russian).

16. Legkov K. E. A layered model of the special puppose infocommunication networks. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no.12, pp. 32-36 (in Russian).

17. Legkov K. E. Organization and models of functioning modern infocommunication networks of a special purpose. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no. 8, pp. 14-20 (in Russian).

18. Legkov K. E., Myasnikova A. I. Control of the infocom-munication services on special purpose multiservice networks. *High tech in Earth space research*, 2012, no. 3, pp. 20-22 (in Russian).

19. Legkov K. E., Emelianov A. V. Kontseptsii upravleniia setiami v modeli vzaimodeistviia otkrytykh sistem [The concept of governance networks in the model of open systems interconnection]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2015, no. 3, pp. 83-92 (in Russian).

20. Burenin A. N., Legkov K. E. Features of architecture, functioning, monitoring and control of field components of the modern infocommunication networks of the special purpose. *High tech in Earth space research*, 2013, no. 3, pp. 12-17 (in Russian).

21. Burenin A. N., Legkov K. E. *Sovremennye infokommunikatsionnye sistemy i seti spetsial'nogo naznachenii. Osnovy postroeniia upravleniia* [Modern infocommunication systems and networks for special purposes. Fundamentals of management]. Moscow, Media Publisher, 2015. 348 p. (in Russian).

22. Isakov E. E. *Ustoichivost' voennoi sviazi v usloviakh informatsionnogo protivoborstva* [The stability of military communications in the conditions of information warfare]. Saint-Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 2009. 400 p. (in Russian).

23. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei sviazi spetsial'nogo naznachenii. Monografiia* [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p. (in Russian).

24. Antonovich P. I., Makarenko S. I., Mihaylov R. L., Ushanev K. V. New means of destructive effects on network centric military command, control and communication systems in the information space. *Vestnik Akademii voennykh nauk*. 2014, vol. 48, no. 3, pp. 93-101 (in Russian).

25. Shneps-Shneppe M. A. «Krasnyi telefon» na DISN seti kak rodimoe piatno v srede AS-SIP [The "red phone" on DISN network as a birthmark in the environment AS-SIP]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, vol. 3, no. 6, pp. 7-12 (in Russian).

26. Shneps-Shneppe M. A., Namiot D. E. Ob evoliutsii telekommunikatsionnykh servisov na primere GIG [The evolution of telecommunication services on an example GIG]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1-13 (in Russian).

27. Shneps-Shneppe M. A. Ot IN k IMS. O setiakh sviazi voennogo naznacheniiia [About communication networks for military purposes]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1-11 (in Russian).

28. Shneps-Shneppe M. A., Namiot D. E., Tsikunov Iu. V. Telekommunikatsii dlia voennykh nuzhd: set' GIG-3 po trebovaniiam kibervoiny [Telecommunications for military purposes: the network is GIG-3 according to the requirements of cyberwar]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 10, pp. 3-13 (in Russian).

29. Sokolov N. A. Sistemnye aspekty postroeniia i razvitiia setei elektrosviazi spetsial'nogo naznacheniiia [The system aspects of the construction and development

of telecommunication networks of special purpose]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 9, pp. 4-8 (in Russian).

30. Netes V. A. Nadezhnost' setei svyazi v period perekhoda k NGN [Reliability of communication networks in the period of transition to NGN]. *Vestnik svyazi*, 2007, no. 9, pp. 1-8 (in Russian).

31. Davydov A. E. Conceptual approaches to constructing an automated control system for adaptive multi-service special-purpose networks. *Research Institute 'Masshtab'*. 12.11.2012. Available at: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/conceptual_approaches_to_constructing_an_automated_control_system_for_adaptive_multi-service_special-purpose_networks/ (accessed 8 June 2017) (in Russian).

32. O svyazi [About the connection]. Federal law of Russia. 2003. (in Russian).

33. Makarenko S. I., Fedoseev V. E. *Multichannel communication systems. Secondary networks and subscriber access networks*. Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2014, 179 p. (in Russian).

34. Makarenko S. I. *Computer systems, networks and telecommunication*. Stavropol, Sholokhov Moscow State University for the Humanities (Stavropol Branch) Publ., 2008, 352 p. (in Russian).

35. Odoevskiy S. M. *Novye informatsionnye i setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia. Chast 1. Novye setevye tekhnologii v sistemakh upravleniia voennogo naznacheniiia* [New information and network technologies in control systems for military use. Part 1. New networking technologies in control systems for military use]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2010. 432 p. (in Russian).

36. Korobitsin A. A., Kudriavtsev A. M., Smirnov A. A. *Informatsionnye i setevye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia* [Information and network technology in automated systems special purpose]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2015. 132 p. (in Russian).

37. ISO/IEC 17799-2000. Information technology. Code of practice for security management. 2000.

38. Shneps-Shneppe M. A. *Telekommunikatsii Pentagona: tsifrovaia transformatsiia i kiberzashchita* [Telecommunications Pentagon: digital transformation and cyber defence]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2017. 272 p. (in Russian).

39. Recommendations for standardization R 50.1.053-2005. Information technologies. Basic terms and definitions in scope of technical protection of information. Moscow, 2006.

40. GOST R 53111-2008. Stability of functioning of the public communications network. Requirements and check methods. Moscow, 2009. (in Russian).

41. Popkov V. K., Blukke V. P., Dvorkin A. B. Modeli analiza ustoichivosti i zhivuchesti informatsionnykh setei [Model analysis the sustainability and survivability of information networks]. *Problems of informatics*, 2009, no. 4, pp. 63-78 (in Russian).

42. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer network. Principles, technologies, protocols]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2010. 945 p. (in Russian).

43. Gordienko V. N., Tveretskii M. S. *Mnogokanalnye telekommunikatsionnye sistemy* [Multichannel telecommunication systems]. Moscow, Goriachaia Linia – Telekom Publ., 2013. 397 p. (in Russian).

44. Krukhmalev V. V., Gordienko V. N., Mochenov A. D., Ivanov V. I., Burdin V. A., Kryzhanovskii A. V., Marykova L. A. *Osnovy postroeniia telekommunikatsionnykh sistem i setei* [Fundamentals of telecommunication systems and networks]. Moscow, Goriachaia Linia - Telekom, 2004. 510 p. (in Russian).

45. Sokolov N. A. *Telekommunikatsionnye seti. Monografiia v 4-kh chastiakh* [Telecommunication networks. Monograph in 4 volumes]. Moscow, Alvares Publishing, 2003, 2004. (in Russian).

46. Ageev S. A., Saenko I. B. Security management of protected multi-service networks for special purposes. *SPIIRAS Proceedings*, 2010, vol. 13, no. 2, pp. 182-198 (in Russian).

47. Budko P. A., Chikhachev A. V., Barinov M. A., Vinogradenko A. M. Main direction of the organization and planning of strongly connected telecommunication environment of forces of a special purpose. *H&ES Research*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 18-23 (in Russian).

48. Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiiakh i o zashchite informatsii [About information, information technologies and protection of information]. Federal law of Russia. 2006. (in Russian).

49. Goldshtein B. S., Sokolov N. A. Potentsial'nye ugrozy dlia setei spetsial'nogo naznacheniiia [Potential threats to networks of a special purpose]. *Vestnik sviazi*, 2015, no. 1, pp. 28-31 (in Russian).

50. Goldshtein B. S., Pinchuk A. V., Sokolov N. A. Minimizatsiia riskov ustoichivosti funktsionirovaniia sovremennykh SSN [Minimization of risks of stability of functioning of a modern special purpose network]. *Vestnik sviazi*, 2015, no. 6, pp. 49-51 (in Russian).

51. Tiurkin M. L., Shadaev M. I., Adzhemov A. S., Ivanov I. P., Dvoriankin S. V., Kuts A. V., Kvitko A. V., Vazhev P. A., Bystrov Iu. A. *Informatsionnye tekhnologii, sviaz' i zashchita informatsii v MVD Rossii* [Information Technology, Communication and Information Protection in the Ministry of Internal Affairs of Russia]. Moscow, "Company "Information Bridge", 2013, 156 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (in Russian).

52. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii - 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation - 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2015) (in Russian).

53. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

54. Sheptura V. N. Arkhitektura perspektivnoi sistemy svyazi gruppировки voisk (sil) dlia obespecheniia upravleniia adaptivnymi deistviiami voisk (sil) [Architecture of Advanced Communication Systems Forces to Ensure Adaptive Management Actions of the Troops]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Modern Trends in the Theory and Practice of Control Systems for Special Purposes"], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 16-20 (in Russian).

55. Goldshtein B. S., Pinchuk A. V., Sokolov N. A. Minimizatsiia riskov ustoichivosti funktsionirovaniia sovremennykh SSN [Minimization of risks of stability of functioning of a modern special purpose network]. *Vestnik svyazi*, 2015, no. 7, pp. 17-18 (in Russian).

56. Parshin S., Kozhanov Iu. Sovremennye tendentsii v sovershenstvovanii sistemy upravleniia vooruzhennymi silami vedushchikh zarubezhnykh stran v informatsionnoi epokhu [Modern trends in improving the system of management of the armed forces of the leading countries in the information age]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 7, pp. 3-9 (in Russian).

57. Janov O., Shiriaev V. Uchastie Ministerstva oborony SShA v federal'noi programme sozdaniia "Sredy sovmestnogo ispol'zovaniia informatsii" [The participation of the Ministry of defense in the Federal program of creating an "Environment of information sharing"]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2011, no. 12, pp. 15-21 (in Russian).

58. Gavrillov A. Avtomatizirovannaia sistema sbora, obrabotki i raspredeleniia razvedyvatel'noi informatsii SV SShA DCGS-A [Automated system of collection, processing and distribution of intelligence information, US army DCGS-A]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2010, no. 7, pp. 32-40 (in Russian).

59. Voennaia set SShA budet postroena na marshrutizatorakh Juniper Networks [Military network, the US will be built on Juniper Networks routers]. *Poplar Systems*. 13.01.2004. Available at: <http://www.poplar.ru/view.php3?cls=news&vguid=1256&guid=1256&parent=1255> (accessed 13 June 2017) (in Russian).

60. Kobozev Iu. N. Perspektivy razvitiia sistem svyazi i telekommunikatsii v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia [Prospects for the Development of Communication and Telecommunication Systems in Management Information Systems, Special Purpose]. *Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia»* [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems"], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 7-9 (in Russian).

61. Makarenko S. I., Chalenko N. N., Krylov A. G. Next Generation Networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 1, pp. 81-102. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/05-Makarenko.pdf> (accessed 7 June 2017) (in Russian).

62. Kucheryavii E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniia v seti Internet* [Traffic Management and the Quality of Service on the Internet]. Saint-Petersburg, Science and Technology Publ., 2004. 336 p. (in Russian).

63. Makarenko S. I. Prospects and Problems of Development of Communication Networks of Special Purpose. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 18-69. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/02-Makarenko.pdf> (accessed 10 October 2017) (in Russian).

64. Burenin A. N., Legkov K. E. Security issues infocommunication systems and networks for special purposes: the main threats, the ways and means of ensuring comprehensive network security. *H&ES Research*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 46-61 (in Russian).

Статья поступила 10 октября 2017 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

Descriptive Model of Special Communication Network

S. I. Makarenko

Relevance. The leading countries develop communication networks of a special purpose (CNSP) operating for the government, the Ministry of defence, Agency of security etc. Main trends in the development of CNSP are the use of resources of civil networks, as well as the use of commercial communication protocols. New network technologies of civil networks (NGN concept, packet transmission technology etc.) are introduced in CNSP. Therefore, the analysis of the current state of CNSP and creation of its descriptive model are relevant. **The aim of this paper** is the development of the descriptive model of CNSP. The descriptive model of CNSP is based only open sources. **Results and their novelty.** New elements of the model of CNSP take into account the main trends of communication evolution, basic protocols, information technologies and network structure. The analysis showed that modern CNSP moving to a decentralized network structure that is more in line with modern requirements to netcentric systems of state and military administration. Also, modern CNSP move to a hybrid structure where the individual segments of civil networks are used as parts of the transport infrastructure of CNSP. Commercial protocols and information technologies widely used in CNSP instead specialized communication protocols too. **Practical significance.** The descriptive model of CNSP is presented in the paper is useful technical professionals for the justification of new technological solutions in the field of CNSP.

Key words: communication system, network communication, communication network of special purpose, network protocols, military communications system, sustainability communications, electronic warfare, information technology, NGN, communication control system.

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: telecommunication network; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint Petersburg, Zhdanovskaya ulica, 13.

УДК 004.72

Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения

Смирнов С. В.

Постановка задачи. Применение авиации на удаленных театрах военных действий (ТВД) сопряжено с определенными трудностями в связи с тем, что такие ТВД не оборудованы наземной инфраструктурой связи и управления. В таких случаях для управления авиацией используется авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Вместе с тем, пропускной способности единой сети воздушной радиосвязи ТВД зачастую недостаточно при управлении большим количеством объектов с АК РЛДН. Это актуализирует вопросы повышения пропускной способности такой единой сети. **Целью работы** является разработка модели сети воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН, в которой передача данных ведется по алгоритму случайного множественного доступа. В основу данной модели положена известная модель ненастойчивого множественного доступа. На основе данной модели предполагается провести исследование эффективной пропускной способности сети и времени передачи пакетов в ней. **Используемые методы.** При разработке модели использовались методы теории вероятности и теории связи. **Новизна.** Элементами новизны представленной модели являются учет нагрузки транзитного трафика при использовании децентрализованного принципа ретрансляции трафика в единой сети ТВД. **Результат.** Исследование модели показало, что транзитный трафик существенно влияет на показатели единой сети ТВД, так при возрастании количества транзитного трафика соединений эффективная пропускная способность сети повышается на 10-20%, однако это происходит за счет роста задержки пакетов в сети в 2-2,5 раза. Такой рост задержки делает актуальным разработку новых подходов по дальнейшему повышению пропускной способности сети. **Практическая значимость:** представленную модель в дальнейшем предполагается использовать для обоснования возможностей по повышению пропускной способности единой сети воздушной радиосвязи ТВД, за счет внедрения децентрализованного принципа маршрутизации трафика и использования Mesh-технологий.

Ключевые слова: сеть воздушной радиосвязи, ретрансляция, маршрутизация, авиация, авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения.

Введение

В настоящее время существует определенная вероятность боевого применения авиации Воздушно-космических сил (ВСК) Российской Федерации (РФ) на удаленных театрах военных действий (ТВД). Вместе с тем такое боевое применение авиации сопряжено с определенной сложностью, а именно – отсутствие наземной инфраструктуры обеспечивающей управление авиацией. В этом случае основным способом управления авиацией является использование воздушных пунктов управления (ПУ) на основе авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Вышесказанное подтверждает

Библиографическая ссылка на статью:

Смирнов С. В. Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 165-181. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/06-Smirnov.pdf>.

Reference for citation:

Smirnov S. V. Air radio network model for AWACS-controlled aircraft. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 165-181. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/06-Smirnov.pdf> (in Russian).

опыт использования АК РЛДН А-50 в Сирии при проведении там операции ВКС России.

Как показал анализ, представленный в работе [1], наиболее перспективным направлением совершенствования системы управления АК РЛДН является переход ее к сетевым принципам. При этом единая сеть воздушной радиосвязи (ЕСВРС) которая будет являться информационной инфраструктурой такого управления должна обладать развитой сетевой топологией и обеспечивать высокую скорость информационного обмена между всеми абонентами сети – пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА), беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и АК РЛДН.

Анализ фундаментальных работ в области организации управления авиацией [2-6], а также отдельных работ по организации СВРС [7-15] показывают, что ЕСВРС будет состоять из отдельных СВРС увязанных между собой в единую сеть, центром которой будет являться воздушный пункт управления – АК РЛДН. При этом возможен два подхода к построению такой сети:

- 1) централизованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые в свою очередь, за счет объединения ведущих групп в отдельную СВРС сопрягаются с АК РЛДН и через него ведут обмен информацией (рис. 1);
- 2) децентрализованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые ведут информационный обмен как через СВРС объединяющей ведущих групп и АК РЛДН, так и через смежные СВРС находящиеся в зоне электромагнитной доступности (рис. 2).

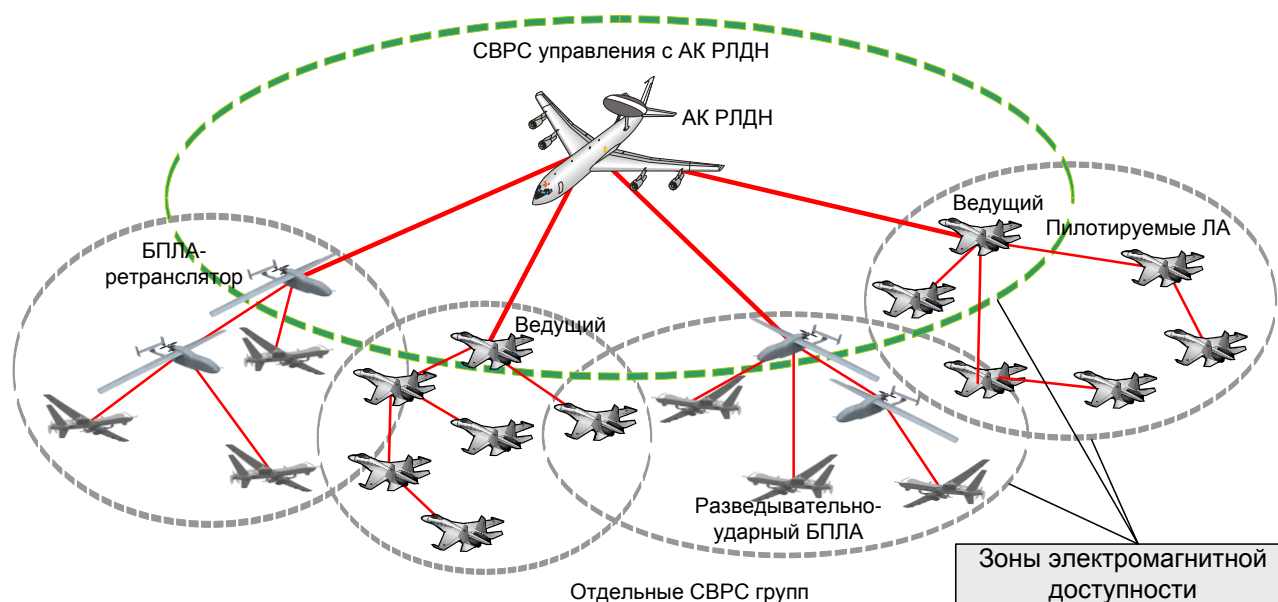


Рис. 1. Централизованный подход к построению ЕСВРС на ТВД

Децентрализованное построение ЕСВРС имеет неоспоримые преимущества перед централизованной структурой. Такое построение позволяет, во-первых, организовать сетевый принцип управления авиацией с АК РЛДН, во-вторых, такое построение позволяет обеспечить непрерывное и

устойчивое управление авиацией за счет увеличения топологической связности сети [20-23].

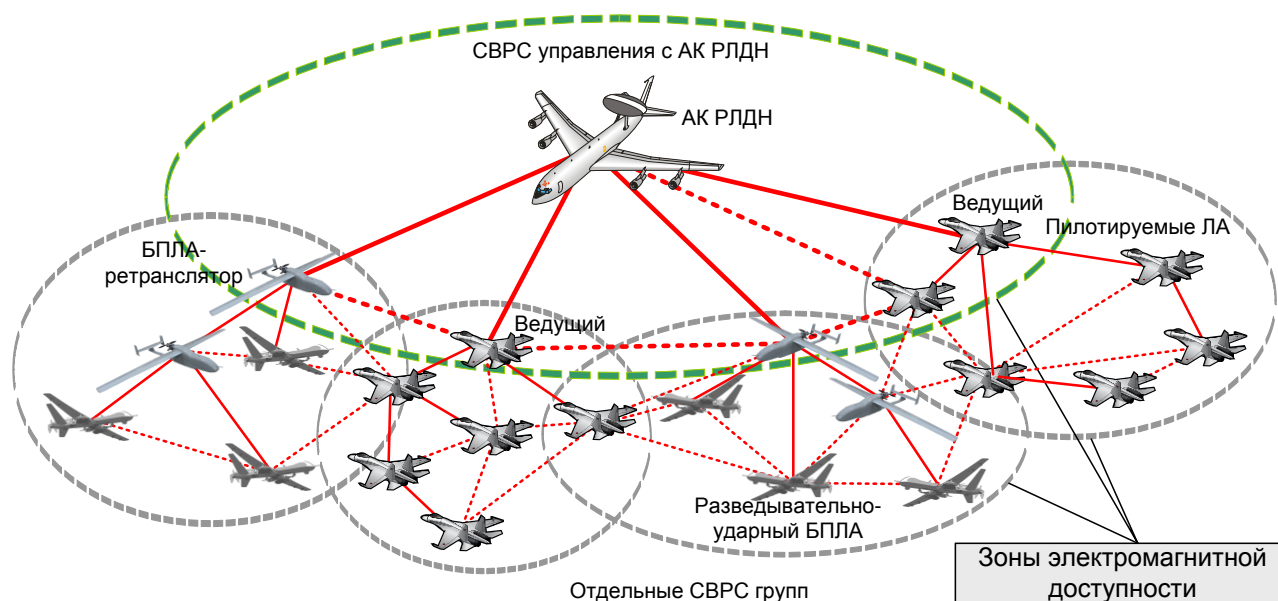


Рис. 2. Децентрализованный подход к построению ЕСВРС на ТВД

Вместе с тем создание ЕСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции сообщений в настоящее время сопряжено с рядом технических сложностей. Так беспроводная ретрансляция трафика между отдельными СВРС, потребует создания новых технологических решений по маршрутизации трафика в этих сетях, и как следствие увеличит нагрузку на промежуточные СВРС за счет передачи транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания трафика абонентов (ЛА, БПЛА и АК РЛДН) в ЕСВРС потребуется выработать единые протоколы ретрансляции трафика в СВРС и в ЕСВРС с учетом дополнительной нагрузки создаваемой транзитным трафиком. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ диапазоне. Такие СВРС помимо высокой пропускной способности, как показано в работах [24-26], подвержены воздействию наземных и авиационных средств радиоэлектронного подавления (РЭП), что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков с заданным качеством. Это при том, что согласно работ [7, 27] подавляющий объем передаваемых данных по СВРС составляют мультимедийные данные (видео и фото данные оптической и радиоэлектронной разведки) от разведывательно-ударных БПЛА к которым предъявляются требования своевременности в масштабе времени близком к реальному. Кроме того, именно для разведывательно-ударных БПЛА разрывы связи при воздействии средств РЭП являются наиболее критичными и, как показано в работе [28], в большинстве случаев ведет к потере управления ими.

Обобщая вышесказанное можно сделать вывод, что СВРС является основным элементом ЕСВРС управления авиацией с АК РЛДН, и разработка ее модели, учитывающей как особенности сетецентрического управления с АК РЛДН, так и уровень транзитного трафика при организации ЕСВРС по децентрализованному принципу, является актуальной научной задачей. Таким

образом, цель данной работы – разработка модели СВРС как основного элемента ЕСВРС управления авиацией с АК РЛДН, с учетом нагрузки транзитного трафика. В основу данной модели положено развитие ранее известных моделей СВРС, представленных в работах [7, 12, 29].

Постановка задачи

Анализ работ в области организации СВРС [4-7, 12-19, 30-34] показал, что в основу перспективных СВРС будут положены технологии организации высокоскоростных каналов связи до 34 МБит/с в СМВ-диапазоне, с использованием алгоритма случайного множественного доступа абонентов к каналу (АСМД).

Алгоритм работы абонента (ЛА, БПЛА, АК РЛДН) с СВРС представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) если канал свободен, то абонент передает пакет;
- 2) если канал занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время, в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, терминал вновь проверяет канал и повторяет описанный алгоритм.

Общая схема функционирования АМСД в СВРС приведен на рис. 3 [7].

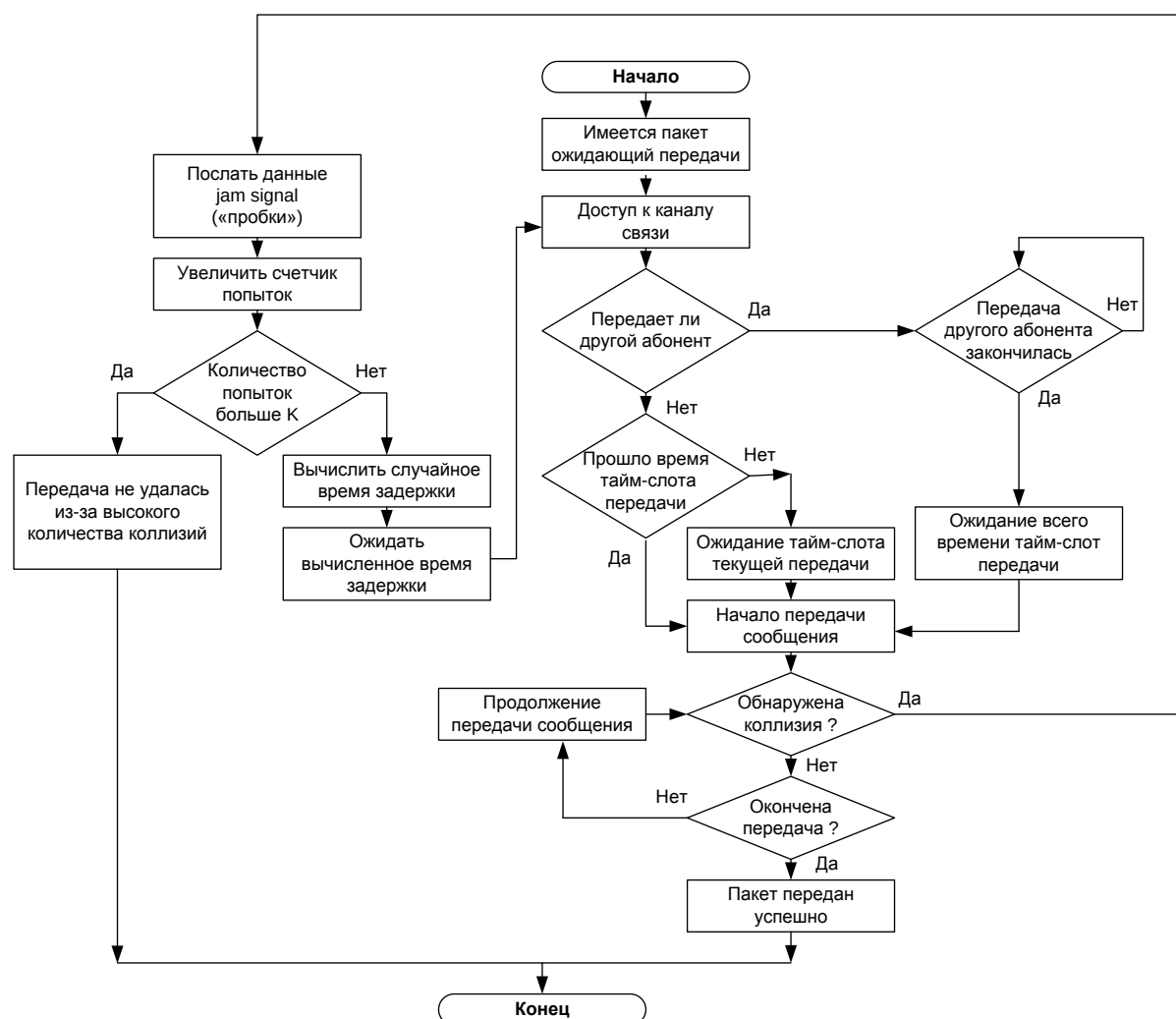


Рис. 3. Общая схема функционирования АМСД в СВРС

Модель сети воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН использующая алгоритм случайного множественного доступа

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество абонентов совместно использующих канал множественного доступа;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна передачи);

S_m – вероятность, что передача m -го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;

$S = \sum_{m=1}^M S_m$ – вероятность успешных передач на окно, приходящееся на всех абонентов;

G_m – вероятность, что m -ый абонент передает пакет в каком либо окне;

$G = \sum_{m=1}^M G_m$ – общее число передач пакетов за время окна P_{win} ;

T – среднее время, в числе окон, за которое пакет будет успешно принят;

S/G – вероятность успешной передачи абонента в СВРС;

G/S – среднее число необходимых попыток абонента по передаче пакета, пока не произойдет его успешная передача;

a – максимальное время распространения электромагнитных волн в одну сторону СВРС, нормированное ко времени окна;

K – задержка повторной передачи пакета в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

β – нормированное время до получения квитанции об успешной доставке пакета. Предполагается, что заблокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается в буфере абонента на время до получения квитанции;

D_{mes} – длина пакета в битах;

C – максимально возможная пропускная способность канала множественного доступа в бит/с;

C_e – эффективная пропускная способность канала множественного доступа в бит/с с учетом функционирования его по алгоритму АМСД;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах;

t – «время жизни» пакета на момент поступления его в передающий терминал;

$T_{зад}$ – время задержки пакета в канале в секундах;

λ – интенсивность информационного потока в бит/с поступающий к абоненту СВРС;

Λ_1 – общая интенсивность трафика в одной СВРС;

k_{vn} – коэффициент определяющий долю трафика СВРС отправляемого в другие смежные СВРС;

k_{kv} – коэффициент определяющий долю трафика в СВРС приходящегося на квитанции об успешной доставки информационных пакетов. Фактически значение k_{kv} показывает, что на каждые $1/k_{kv}$ пакетов информационного трафика, приходится один пакет квитанции об успешной доставке.

Ограничения модели:

- на канал множественного доступа не воздействуют средства РЭП;
- все абоненты СВРС находятся в пределах прямой радиовидимости;
- квитанции об успешной доставке пакетов прибывают надежно и без потерь;
- в СВРС присутствует большое число равномерно «слабых» абонентов, ни один из которых не вносит весомый вклад в нагрузку сети.

Как показано в работе [29], среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как:

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}, \quad (1)$$

Средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон [29]:

$$T = \left(\frac{G}{S} - 1 \right) (2a + 1 + \beta + K) + 1 + a. \quad (2)$$

Выразим параметры СВРС через абсолютные величины. Параметр a в (1) и (2) зависит от радиуса электромагнитной доступности СВРС (максимальное расстояние между самыми удаленными абонентами сети) [29]:

$$a = \frac{d_{max}/c}{P_{win}} = \frac{d_{max}C}{cD_{mes}}, \quad (3)$$

где: $c=300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн; d_{max} – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами СВРС в км.

Получим зависимости для C_e и T_a от λ_m , C . Длительность окна зависит от длины пакета и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \quad (4)$$

Интенсивность поступления пакетов от абонента эквивалентна количеству порождаемых этим абонентом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна. То есть:

$$G_m = \frac{\lambda P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C/D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{M\lambda}{C} = \frac{\Lambda_1}{C}. \quad (5)$$

Учтем в составе трафика СВРС дополнительный транзитный трафик, доля которого определяется коэффициентом k_{vn} . В этом случае объем трафика в СВРС будет равен:

$$\Lambda_1(1+k_{vn}).$$

В случае, когда в СВРС используется передача квитанций (квитирование) об успешном получении пакетов, и доля трафика квитанций составляет k_{kv} ($k_{kv}=0\dots 1$) от информационного трафика, то суммарный трафик в СВРС будет:

$$\Lambda_1(1+k_{vn})(1+k_{kv}). \quad (6)$$

тогда

$$G = \frac{\Lambda_1(1+k_{vn})(1+k_{kv})}{C}. \quad (7)$$

Эффективная пропускная способность канала определяется, как количество успешных передач пакетов длиной D_{mes} бит, за время P_{win} и равна:

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC \quad (8)$$

Подставляя (1), (3), (5) в (8), с учетом (6) получим выражение для определения среднего количества успешных передач пакетов на окно. Учитывая что S – нормированная величина и выражая эффективную скорость канала через C_e получим:

$$\begin{aligned} C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}}{\frac{\Lambda_1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) (1+k_{vn})(1+k_{kv}) + e^{-\frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}} = \\ = \frac{\Lambda_1 C (1+k_{vn})(1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{max} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) (1+k_{vn})(1+k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{max} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{cD_{mes}}}} \cdot \end{aligned} \quad (9)$$

Определим время задержки передачи пакета в секундах из выражения (2). Параметр β , отвечающий за доставку квитанции не зависит от параметров канала в модели, рассмотренной в [29], что определяется введенными в модель ограничениями. Если из модели, представленной в работе [29] убрать ограничение, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу. В этом случае из (2) с учетом выражения (6) получим β , как задержку пакета квитанции, который, в свою очередь уже не требует пакета-квитанции:

$$\beta = \left(\frac{S}{G} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a \quad (10)$$

Тогда выражение для времени задержки пакета, выраженной в секундах будет определяться из выражений (2) и (10):

$$\begin{aligned} T_{зад} = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{2G}{S} - 1 \right) \left(\frac{2G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) \right] = \\ = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{2\Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{SC} - 1 \right) \left(\frac{2\Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{SC} (2a + K + 1) + 1 + a \right) + 1 + a \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где: G определяется из выражения (7), a – выражением (3), а S определяется равенством:

$$S = \frac{\Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) (1+k_{vn})(1+k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}} \cdot \quad (12)$$

В случае если квитирование в СВРС не применяется, то выражение (11), будет иметь вид:

$$T_{зад} = \left(\frac{\Lambda_1 (1+k_{vn})}{S} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a,$$

с учетом того, что в выражении (12) для S значение $k_{kv}=0$.

Для систем управления в реальном масштабе времени накладывается ограничение на «время жизни» пакета в СВРС – T_m . Так как для выражения (10) параметр K является варьируемым, в этом случае необходимо наложить условие, при котором соблюдается требования к «времени жизни» пакета. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимой «времени жизни» T_m передача пакета теряет смысл:

$$K \leq \frac{T_m - t}{P_{win}}.$$

Учитывая выражение (4) сформируем критерий соответствия своевременности доставки пакетов трафика в СВРС ее оперативной ценности:

$$K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \quad (13)$$

Окончательно, запишем выражения для эффективной пропускной способности и задержки передачи трафика в СВРС со АСМД.

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\Lambda_1(1+k_{vn})(1+k_{kv})e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1(1+k_{vn})(1+k_{kv})}}{\Lambda_1\left(1+2\frac{d_{\max}C}{cD_{mes}}\right)(1+k_{vn})(1+k_{kv})+Ce^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}}\Lambda_1(1+k_{vn})(1+k_{kv})}} \\ C_e = CS \\ T_a = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{2G}{S} - 1 \right) \left(\frac{2G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) \right] \\ a = \frac{d_{\max}C}{cD_{mes}} \\ K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}} \end{array} \right. \quad (14)$$

Система (14) описывает поведение СВРС управления авиацией с АК РЛДН с учетом коэффициента трафика k_{vn} поступающего в/из другие смежные СВРС.

Примем допущение о том, что трафик квитанций об успешной доставке много меньше трафика данных циркулирующего в сети $k_{kv} \rightarrow 0$. В этом случае систему расчетных соотношений для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН можно представить в виде схемы на рис. 4.

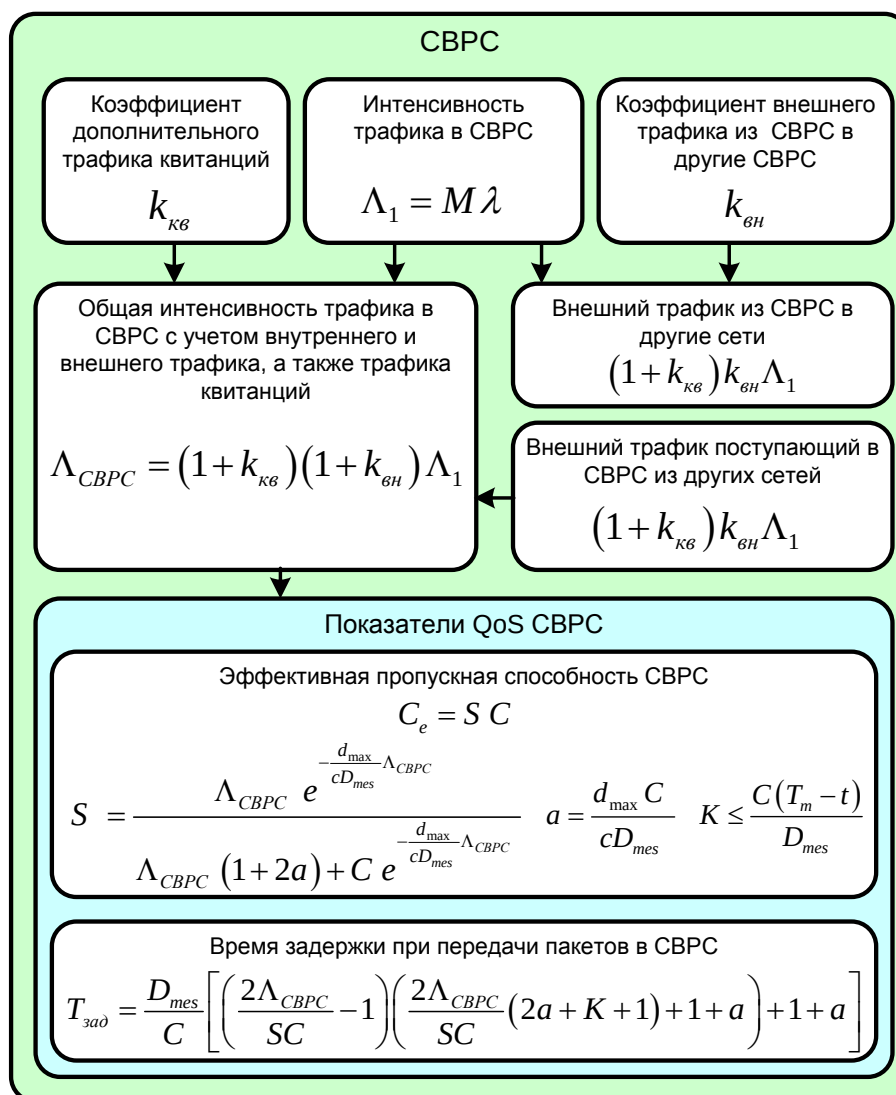


Рис. 4. Система расчетных соотношения для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН

Проведенное моделирование показало, что транзитный трафик существенно влияет на СВРС управления авиацией с АК РЛДН: при росте эффективной пропускной способности на 10-20%, своевременность передачи пакетов в СВРС снижается в 2-2,5 раза. Такое снижение своевременности передачи пакетов делает актуальным разработку научно обоснованных технических решений по ретрансляции трафика в ЕСВРС на ТВД, а также внедрения децентрализованных принципов информационного обмена в ЕСВРС.

Выводы

В работе показано, что актуальным направлением развития способов управления авиацией на необорудованных в отношении связи ТВД является управление пилотируемых и беспилотных авиационных средств с АК РЛДН. При этом основная нагрузка по передачам команд и информационному обеспечению авиации ложиться на ЕСВРС ТВД, которая может быть организована по иерархическому или децентрализованному принципу. При этом основным элементом ЕСВРС являются отдельные СВРС. В работе предложена базовая

модель СВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе АСМД. В дальнейшем данная модель СВРС планируется к использованию при обосновании технологических решений ЕСВРС на ТВД с централизованным и децентрализованным принципами передачи информации.

Литература

1. Смирнов С. В. Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 69-100. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf> (дата обращения 28.10.2017).
2. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунцов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. — 816 с.
3. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.
4. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.
5. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
6. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.
7. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97. – URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).
8. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.
9. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной

способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

10. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 7-16.

11. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том 7. № 1. С. 17-25.

12. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

13. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов / под общ. ред. С. И. Макаренко. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

14. Войткевич К. Л. Методы управления трафиком в наземно-воздушных сетях связи. Дис. ... д.т.н. по спец. 05.13.01. Н.Новгород: НПП «Полет», 1998. – 375 с.

15. Кейстович А. В., Милов В. Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 278 с.

16. Назаров С. Н. Подход к решению задачи определения топологии сети радиосвязи декаметрового диапазона при ее интеграции в систему авиационной электросвязи // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 36-39.

17. Назаров С. Н. Принципы реализации пространственного ресурса декаметровой радиосвязи в системе авиационной электросвязи при решении задач управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 40-44.

18. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Анализ применения зон вынесенных ретрансляторов для беспроводной авиационной электросвязи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 213-214.

19. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Совместное использование вынесенных зон ретрансляторов для обмена сообщениями с воздушными судами на различных авиатрассах // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 215-217.

20. Верба В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетевых боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.

21. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетевых технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник Академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.

22. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Том 14. № 3. С. 264-274.
23. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. № 2 (69). 2014. С. 71-78.
24. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления, 2010, № 6 (65). С. 807-815.
25. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. Монография. — СПб.: Научно-технические технологии, 2017. — 546 с.
26. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.
27. Макаренко С. И., Бородин Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. № 1 (73). С. 65-79.
28. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).
29. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
30. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.
31. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.
32. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.
33. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

34. Мотин О. В. Модель функционирования авиационного УКВ канала обмена данными // XXIV военно-научная конференция молодых ученых. Щелково: 30 ЦНИИ МО РФ, 2001.

References

1. Smirnov S. V. The Analysis of Ways and Means to Control the Aircrafts from AWACS. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 69-100. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf> (accessed 28 October 2017) (in Russian).

2. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

3. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

4. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

5. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

6. Merkulov V. I., Gandurin V. A., Drogalin V. V. and etc. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aircraft systems control]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008.

7. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

8. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using Mesh technology in interworking systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

9. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

10. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united air-space network with decentralized traffic routing based on Mesh technology. *Infocommunikacionnye tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 7-16 (in Russian).

11. Aganesov A. V., Makarenko S. I. The traffic balancing method between aero and space segments in aerospace network based on Mesh-technology. *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17-25 (in Russian).

12. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosviasi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

13. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy sviazi* [Communication systems]. Voronezh, Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 2011. 285 p. (in Russian).

14. Voitkevich K. L. *Metody upravleniia trafikom v nazemno-vozdushnykh setiakh sviazi* [Methods of traffic management in ground-air communication networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatiie "Polet", 1998, 375 p. (in Russian).

15. Keistovich A. V., Milov V. R. *Vidy radiodostupa v sistemakh podvizhnoi sviazi* [The types of radio access in system of mobile communication]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2015. 278 p.

16. Nazarov S. N. Approach to the solution of the problem of determining the topology of the network of the radio communication of decametric range with its integration into the system of the aviation electrical communication. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 36-39 (in Russian).

17. Nazarov S. N. Principles of the realization of the three-dimensional resource of decametric radio communication in the system of aviation electrical communication with the solution of the problems of the air traffic control. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 40-44 (in Russian).

18. Nazarov S. N., Shagarova A. A. The analysis of application of areas of the taken out repeaters for wireless aviation telecommunication. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 213-214 (in Russian).

19. Nazarov S. N., Shagarova A. A. Sovmestnoe ispol'zovanie vynesennykh zon retransliatorov dlia obmena soobshcheniiami s vozdushnymi sudami na razlichnykh aviatrassakh [Sharing made areas of repeaters for communicating with the aircraft on various routes]. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 215-217 (in Russian).

20. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiakh [Organization of information exchange in

network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

21. Makarenko S. I. Berezhnov A. N. Perspektivy ispol'zovaniia setetsentrisheskikh tekhnologii upravleniia boevymi deistviiami i problemy ikh vnedreniia v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii [Prospects of using network-centric technologies for the management of the fighting and problems of their implementation in the armed forces of the Russian Federation]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 64-68 (in Russian).

22. Makarenko S. I., Kvasov M. N. Modified Bellman-Ford Algorithm with Finding the Shortest and Fallback Paths and its Application for Network Stability Improvement. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 264-274 (in Russian).

23. Tsvetsov K.U., Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, vol. 69, no. 2, 2014, pp. 71-78 (in Russian).

24. Makarenko S. I. Issledovanie vliianiia prednamerennykh pomekh na vozmozhnosti po retransliatsii soobshcheniia i pokazateli kachestva obsluzhivaniia kanal'nogo urovnia modeli OSI dlia sistemy sviazi so sluchainym mnozhestvennym dostupom abonentov [The Study of the Influence of Intentional Interference at the Relay Capabilities of the Message and the Quality of Service Link Layer of the OSI Reference Model for Communication Systems with Random Multiple Access Subscribers] *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 65, no. 6, pp. 807-815 (in Russian).

25. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentrisheskikh voinakh nachala XXI veka. Monografiia* [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

26. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity. Monografiia* [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

27. Makarenko S. I., Borodinov R. V. Analiz tekhnologii obespecheniia kachestva obsluzhivaniia v mul'tiservisnykh ATM setiakh [The analysis of technologies of quality assurance of service in multiservice ATM networks]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 65-79 (in Russian).

28. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

29. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York: Wiley Interscience. 576 p.

30. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Otsenka effektivnosti setei vozduшной radiosvazi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa [Evaluation of the Effectiveness of the Networks to Air Radio Communications Using Different Algorithms for Multiple Access]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

31. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Modeli setei radiosvazi, ispol'zuiushchie razlichnye algoritmy mnozhestvennogo dostupa [Model Radio Communications Networks that use Different Algorithms for Multiple Access Telecommunications]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

32. Dmitriev A. N., Motin O. V. Model' aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi [Model aviation ultrashort-waves communication channel]. *Tezisy dokladov nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

33. Dmitriev A. N., Maksimov A. V. Optimizatsiia aviatsionnykh setei obmena dannymi [Optimization of aviation networks data communication]. *Sbornik trudov X nauchno tekhnicheskoi konferentsii "Problemy radiosvazi" (Proceedings of the Conference Title «Problems of radio communication»)*, Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Polet», 1999 (in Russian).

34. Motin O. V. Model' funktsionirovaniia aviatsionngo UKV kanala obmena dannymi [The Model of Functioning Aviation Ultrashort-waves Communication channel]. *XXIV voenno-nauchnaia konferentsiia molodykh uchenykh. (Proceedings of the Conference Title XXIV military-scientific conference of young scientists)*, Shchyolkovo, 30 tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii, 2001 (in Russian).

Статья поступила 1 ноября 2017 г.

Информация об авторе

Смирнов Сергей Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: маршрутизация трафика, воздушные сети радиосвязи, Mesh-технологии. E-mail: web-shark@mail.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

Air radio network model for AWACS-controlled aircraft

S. V. Smirnov

Statement of the problem. Aviation of Aerospace forces Russia is used in remote theatres of combat operations which are not equipped with stationary control and communication system. For this reason the airborne warning and control system (AWACS) is used as an air command post to control the aircrafts. **Purpose of paper:** development and research of model radio network of control aviation from AWACS with the data transmission based on algorithm of random access. In the radio network model study an effect of transit traffic on effective network bandwidth. **Methods used.** Probability theory and the theory of Markov processes are used in the article for develop the radio network model. **Novelty.** The radio network model takes into account traffic of transition connections from other networks. **The results of the study.** Transit traffic significantly affects the performance of the network. The increase in the number of transit connections makes the growth of the effective bandwidth of 10-20%, and the time delay of messages in the radio network increases in 2-2.5 times. This increase in the transmission delay of messages not allows you to send traffic to sensitive delay. **Practical relevance:** the author proposes to use paper results for relay of traffic through the radio networks of control aviation from AWACS on based Mesh-technology.

Keywords: communications network, relay traffic, routing, radio networks, AWACS.

Information about Author

Sergei Vladimirovich Smirnov – Doctoral Student. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin”. Field of research: traffic routing, air communication networks, Mesh-networks. E-mail: web-shark@mail.ru

Address: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

УДК 519.711

Логические методы расчета надежности систем. Часть I. Математический аппарат

Левин В. И.

Актуальность. В последние годы все большее внимание ученых и проектировщиков систем связи приобретают вопросы совершенствования методов оценки надежности и безопасности технических систем, в связи с выдвигаемыми задачами повышения значений этих характеристик. **Цель статьи** заключается в разработке логической модели надежности технических систем и соответствующих логических методов оценки надежности таких систем, которые в отличие от известных используют не традиционные – вероятностные показатели надежности, а детерминированные логические показатели. **Метод.** Для достижения поставленной цели в статье предложено использовать в качестве исходных данных наблюдаемые моменты последовательных отказов и восстановлений элементов технической системы, а в качестве характеристик надежности самой системы – моменты последовательных отказов и восстановлений этой системы. В этом случае задача оценки надежности системы сводится к построению ее математической модели в виде логических функций, выражающих моменты ее последовательных отказов и восстановлений через аналогичные моменты всех ее элементов. В этой части статьи детально разрабатывается логический математический аппарат, предназначенный для вычисления логической функции надежности технических систем. **Новизна** работы заключается в построении адекватной логической модели надежности системы, позволяющей свести оценку надежности технической системы к вычислению ее логических функций надежности. **Результат.** В этой части статьи детально разработаны логическая модель надежности и методы ее исследования, позволяющие вводить новые показатели надежности технических систем, не требующие для своей оценки использования вероятностных методов и исходных статистических данных об отказах элементов. Во второй статье на основе разработанной логической модели надежности и методах ее исследования будет решена задача построения автоматной модели надежности систем, которая позволит вести практические расчеты надежности реальных технических систем.

Ключевые слова: система, надежность, модель надежности, двузначная логика, непрерывная логика, законы логики.

Введение

При проектировании технических систем их обычно рассчитывают на надежность. Имеется обширная литература, указывающая, как рассчитать нужную вероятностную характеристику (показатель) надежности системы по аналогичным характеристикам ее элементов [1, 2]. В качестве характеристик надежности обычно выбирают среднее время T_{cp} безотказной работы или вероятность $P(t)$ безотказной работы за время t [3, 4]. Однако, такие вероятностные характеристики – не первичные величины, а результат их усреднения. Поэтому вероятностный расчет надежности системы по природе не элементарен и для сколько-

Библиографическая ссылка на статью:

Левин В. И. Логические методы расчета надежности систем. Часть I. Математический аппарат // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 182-195. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/07-Levin.pdf>

Reference for citation:

Levin V. I. Evaluation of Reliability of Systems by Logical Methods. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 182-195. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/07-Levin.pdf> (in Russian).

нибудь сложных систем сопряжен с большими трудностями. Далее, вероятностные характеристики надежности элементов не всегда могут быть точно определены из-за большой трудоемкости необходимых статистических испытаний. Наконец, разработка новых систем может требовать рассмотрения все новых вероятностных характеристик надежности. В этих условиях разумно задаться целью построения такой теории и методов расчета надежности систем, где оперируют первичными (не выводимыми из других) величинами, относящимися к надежности системы и ее элементов, и устанавливают связь между ними. Действительно, при таком подходе расчет надежности систем становится элементарным, что должно расширить класс рассчитываемых систем. Далее, отпадает необходимость в специальном изучении конкретных характеристик надежности систем, так как их всегда можно выразить через указанные первичные величины. Наконец, естественно ожидать, что опытное определение первичных характеристик надежности элементов проще, чем вероятностных. Именно такая цель ставится в настоящей работе.

В предлагаемой в данной работе теории первичными нами считаются последовательные моменты t_i отказов и восстановлений блоков (элементов) и аналогичные моменты T_k для системы в целом, а задача состоит в отыскании зависимостей $T_k = f_k(t_i)$ между ними. Эта теория обладает всеми указанными выше достоинствами. В то же время:

- 1) набор функций $\{f_k\}$ является наиболее полной качественной информацией о влиянии надежности блоков на надежность системы, так как по нему можно количественно предсказать надежность всей системы при любых значениях надежности ее блоков (в частности, вычислить те или иные характеристики надежности системы);
- 2) можно даже в отсутствие числовых данных о надежности блоков сравнивать надежность систем: равнонадежным системам соответствуют эквивалентные наборы $\{f_k\}$, более надежной системе соответствует увеличение значений функций f_k , выражающих моменты отказов, и уменьшение значений функций f_k , выражающих моменты восстановлений;
- 3) можно изучать не только обычные модели, в которых надежность системы в любой момент времени полностью определяется надежностными состояниями блоков в тот же момент, но и модели с запоминанием предыдущих состояний;
- 4) зная набор функций $\{f_k\}$ системы, можно, наблюдая состояния ее блоков, прогнозировать индивидуальное надежностное поведение системы и на основе этого организовать ее рациональное техническое обслуживание.

В качестве модели надежности системы в работе был выбран динамический автомат, на входы которого подаются надежностные процессы в блоках (импульс процесса определяет интервал работоспособности блока, пауза – интервал неработоспособности), а с выхода снимается аналогичный процесс для

системы. При этом оказалось, что функции влияния f_k всегда выражаются суперпозицией операций непрерывной логики, а это позволяет говорить о логической теории надежности. Эта теория, помимо ее важного самостоятельного значения (см. выше), полезна и для традиционной вероятностной теории надежности, ибо, устанавливая логическую связь между первичными надежностными характеристиками системы и ее блоков, она облегчает расчет (моделирование на ЭВМ) вероятностных характеристик надежности сложных систем, сводя его к известной задаче – отысканию (моделированию) распределения детерминированных функций $f_k(t_i)$ от случайных аргументов t_i .

Работа публикуется в двух частях. В первой части решается задача разработки логико-математического аппарата предлагаемой детерминистской теории надежности, во второй – задача построения автоматной модели надежности систем, позволяющей вести расчеты надежности реальных систем. Автоматная модель и излагаемые логические методы теории надежности облегчают ее изучение студентами, а также ее усвоение инженерами.

Логико-математический аппарат предлагаемой в статье детерминистской теории надежности для удобства декомпозирован на следующие пункты:

- 1) Двухзначная дискретная логика;
- 2) Непрерывная логика;
- 3) Уравнения и неравенства непрерывной логики;
- 4) Вероятностные расчеты в непрерывной логике.

1. Двухзначная дискретная логика

Описываемая ниже двухзначная логика [5] используется во второй части работы для математического моделирования статистики надежности технических систем.

Рассмотрим множество из двух элементов $\{0,1\}$. Введем над ним следующие логические операции:

конъюнкцию

$$y \equiv x_1 \wedge x_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x_1 = x_2 = 1; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1.1)$$

дизъюнкцию

$$y \equiv x_1 \vee x_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 = x_2 = 0; \\ 1 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1.2)$$

отрицание

$$y \equiv \bar{x} = 1 - x = \begin{cases} 1, & \text{если } x = 0; \\ 0, & \text{если } x = 1. \end{cases} \quad (1.3)$$

Назовем *булевой функцией* произвольную функцию, которая, как и ее аргументы, принимает значения из множества $\{0,1\}$. Ясно, что двухместные функции – конъюнкция (1.1) и дизъюнкция (1.2) и одноместная функция – отрицание (1.3) являются некоторыми простейшими булевыми функциями. Более сложными являются n -местные булевы функции:

конъюнкции

$$y \equiv x_1 \wedge \dots \wedge x_n = \bigwedge_{i=1}^n x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } x_1 = \dots = x_n = 1; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1.4)$$

дизъюнкции

$$y \equiv x_1 \vee \dots \vee x_n = \bigvee_{i=1}^n x_i = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 = \dots = x_n = 0; \\ 1 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1.5)$$

В выражениях (1.1), (1.4) знак $\wedge$ обычно опускается, если нет опасности спутать конъюнкцию с другими операциями. Функции (1.1) и (1.2) являются частными случаями функций (1.4) и (1.5) при $n = 2$. Еще более сложными булевыми функциями являются элементарная n -местная конъюнкция

$$y \equiv \tilde{x}_1 \wedge \tilde{x}_2 \wedge \dots \tilde{x}_n \quad (\text{иначе } \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \dots \tilde{x}_n) \quad (1.6)$$

и элементарная n -местная дизъюнкция

$$y \equiv \tilde{x}_1 \vee \tilde{x}_2 \vee \dots \tilde{x}_n. \quad (1.7)$$

Здесь $\tilde{x}_i$ есть x_i либо $\bar{x}_i$. Например: $y = x_1 x_2 \bar{x}_3$, $y = x_1 \vee \bar{x}_2$.

Наиболее сложными булевыми функциями являются дизъюнкция различных элементарных конъюнкций – *дизъюнктивная нормальная форма* (ДНФ) и конъюнкция различных элементарных дизъюнкций – *конъюнктивная нормальная форма* (КНФ). Булевы функции (1.1)–(1.7) – частные случаи как ДНФ, так и КНФ. Оказывается, что и произвольная булева функция может быть представлена и в ДНФ, и в КНФ.

Первичное задание булевой функции $y = f(x_1, \dots, x_n)$ обычно состоит в перечислении тех наборов аргументов $(x_1, \dots, x_n)$, на которых $y = 1$ (*единичные наборы*), либо тех наборов, на которых $y = 0$ (*нулевые наборы*). От задания перечислением единичных наборов можно перейти к заданию перечислением нулевых наборов и обратно – ведь нулевые наборы – это все наборы, не являющиеся единичными, а единичные – это все наборы, не являющиеся нулевыми.

Для представления функции f в ДНФ удобно исходить из ее задания перечислением единичных наборов. При этом f записывается в виде дизъюнкции элементарных конъюнкций, каждая из них обращается в 1 на каком-то одном единичном наборе.

Пример 1.1. Функция $y = f(x_1, x_2)$ равна 1 на наборах 01 и 10. Записать ее в ДНФ. Видим, что на наборе 01 обращается в единицу элементарная конъюнкция $\bar{x}_1 x_2$, а на наборе 10 – конъюнкция $x_1 \bar{x}_2$. Поэтому получаем $y = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2$.

Для представления функции f в КНФ удобно исходить из ее задания перечислением нулевых наборов. При этом f записывается в виде конъюнкции элементарных дизъюнкций, каждая из которых обращается в нуль на каком-то одном нулевом наборе.

Пример 1.2. Функция $y = f(x_1, x_2, x_3)$ равна 0 на наборах 000 и 111. Так как на наборе 000 обращается в нуль элементарная дизъюнкция $x_1 \vee x_2 \vee x_3$, а на наборе 111 – дизъюнкция $\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3$, имеем $y = (x_1 \vee x_2 \vee x_3)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$.

От представления булевой функции в ДНФ легко перейти к ее представлению в КНФ и обратно. В первом случае совершается переход: ДНФ функции $\rightarrow$

представление функции перечислением единичных наборов $\rightarrow$ представление функции перечислением нулевых наборов $\rightarrow$ КНФ функции; во втором случае – обратный переход.

Пример 1.3. Задана ДНФ функции из примера 1.1: $y = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2$. Найти эквивалентное представление функции в виде КНФ. Из ДНФ функции видно, что единичные наборы 01 и 10. Значит, нулевые наборы – 00 и 11, откуда КНФ функции $y = (x_1 \vee x_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)$.

Логические операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания подчиняются следующим законам:

тавтологии

$$x \vee x = x, \quad x x = x; \quad (1.8)$$

переместительному

$$x \vee y = y \vee x, \quad xy = yx; \quad (1.9)$$

сочетательному

$$(x \vee y) \vee z = x \vee (y \vee z) = x \vee y \vee z, \quad (xy)z = x(yz) = xyz; \quad (1.10)$$

распределительному

$$x(y \vee z) = xy \vee xz, \quad x \vee yz = (x \vee y)(x \vee z); \quad (1.11)$$

отрицания (де Моргана)

$$\overline{x \vee y} = \bar{x} \bar{y}, \quad \overline{xy} = \bar{x} \vee \bar{y} \quad (1.12)$$

поглощения

$$x \vee xy = x, \quad x(x \vee y) = x \quad (1.13)$$

двойного отрицания

$$\overline{\overline{x}} = x; \quad (1.14)$$

исключенного третьего и противоречия (склеивания)

$$x \vee \bar{x} = 1, \quad x \bar{x} = 0; \quad (1.15)$$

ортогонализации

$$x \vee \bar{x}y = x \vee y. \quad (1.16)$$

При помощи законов (1.8)–(1.16) осуществляется эквивалентное преобразование логических выражений, задающих булевы функции, с целью упрощения этих выражений. Множество всех булевых функций, совместно с операциями конъюнкции, дизъюнкции и отрицания, подчиняющимися законам (1.8)–(1.16), называется *булевой алгеброй*.

Пример 1.4. Привести к минимальному виду выражение $y = x_1 x_3 x_4 \vee x_2 x_3 x_4 \vee x_2 x_3 x_5 \vee x_1 \bar{x}_3 x_4 \vee x_2 \bar{x}_3 x_5$.

Объединим первую конъюнкцию с четвертой, а третью – с пятой. Вынеся за скобки в каждой из пар конъюнкций общую букву и учтя закон (1.15), получаем $y = x_1 x_4 \vee x_2 x_5 \vee x_2 x_3 x_4$. Дальнейшее упрощение полученного выражения в классе ДНФ невозможно; однако оно станет возможным, если допустить другие формы выражения y . Например, объединив в последнем выражении первую конъюнкцию с третьей и вынеся в них за скобки x_4 , получим $y = (x_1 \vee x_2 x_3) x_4 \vee x_2 x_5$. Аналогичный результат получается при объединении второй конъюнкции с третьей.

Используя эквивалентные преобразования, можно любое логическое выражение преобразовать в ДНФ или КНФ.

2. Непрерывная логика

Описываемая ниже непрерывная логика [6] используется во второй части работы для математического моделирования динамики надежности технических систем.

Рассмотрим бесконечное непрерывное множество точек $C = [A, B]$ – отрезок прямой $\overline{AB}$. Введем над C логические операции:

конъюнкцию

$$y \equiv x_1 \wedge x_2 = \min(x_1, x_2), \quad (1.17)$$

дизъюнкцию

$$y \equiv x_1 \vee x_2 = \max(x_1, x_2) \quad (1.18)$$

отрицание

$$y \equiv \bar{x} = A + B - x. \quad (1.19)$$

Операции (1.17)–(1.19) обобщают операции (1.1)–(1.3) и переходят в них в частном случае, когда множество $C = \{0,1\}$.

Назовем произвольную функцию, которая, как и ее аргументы, принимает значения из множества C и представима в виде суперпозиции логических операций (1.17)–(1.19), функцией *непрерывной логики* (НЛ). Двухместные функции – конъюнкция (1.17) и дизъюнкция (1.18) и одноместная функция – отрицание (1.19) – простейшие функции НЛ. Более сложные функции:

n-местная конъюнкция

$$y \equiv x_1 \wedge \dots \wedge x_n = \bigwedge_{i=1}^n x_i = \min(x_1, \dots, x_n) \quad (1.20)$$

n-местная дизъюнкция

$$y \equiv x_1 \vee \dots \vee x_n = \bigvee_{i=1}^n x_i = \max(x_1, \dots, x_n) \quad (1.21)$$

Еще более сложны:

элементарная *n*-местная конъюнкция

$$y \equiv x_1 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_2 \dots x_n \bar{x}_n \quad (1.22)$$

элементарная *n*-местная дизъюнкция

$$y \equiv x_1 \vee \bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_2 \vee \dots \vee x_n \vee \bar{x}_n. \quad (1.23)$$

В выражениях (1.22), (1.23) некоторые буквы с отрицаниями могут отсутствовать. Например, $y = x_1 x_2 \bar{x}_2$ или $y \equiv x_1 \vee \bar{x}_1 \vee x_2$. Как видим, в отличие от двухзначной логики в НЛ элементарные конъюнкции и дизъюнкции могут вместе с буквой x_i содержать и ее отрицание $\bar{x}_i$.

Наиболее сложные функции НЛ – ДНФ, т.е. дизъюнкция различных элементарных конъюнкций, и КНФ, т.е. конъюнкция различных элементарных дизъюнкций. Эти функции включают в себя как частные случаи введенные выше функции (1.17)–(1.23).

Всякая функция НЛ $y = f(x_1, \dots, x_n)$ на любом наборе аргументов $(x_1, \dots, x_n)$ принимает значение одного из аргументов x_i или его отрицания $\bar{x}_i$. Это следует из того, что элементарные логические операции (1.17)–(1.19), суперпозицией которых представлено выражение $y = f(x_1, \dots, x_n)$, всегда имеют своим результатом одну из переменных, участвующих в операции, или ее отрицание.

Первичное задание функции НЛ $y = f(x_1, \dots, x_n)$ может состоять в перечислении всех вариантов упорядочения аргументов $x_1, \dots, x_n$ с указанием для каждого варианта того аргумента x_i или его отрицания $\bar{x}_i$, чье значение принимает функция. От первичного задания функции НЛ легко перейти к ее аналитическому представлению с помощью суперпозиции логических операций (1.17)–(1.19). Методику перехода поясним на примере.

Пример 1.5. Функция НЛ от трех переменных задана табл. 1.1. Найти аналитическое представление функции.

Таблица 1 – Функция НЛ от трех переменных

Упорядочение аргументов	Значение функции	Упорядочение аргументов	Значение функции
$x_1 \leq x_2 \leq x_3$	x_3	$x_2 \leq x_3 \leq x_1$	x_3
$x_1 \leq x_3 \leq x_2$	x_3	$x_3 \leq x_1 \leq x_2$	x_1
$x_2 \leq x_1 \leq x_3$	x_3	$x_3 \leq x_2 \leq x_1$	x_2

Согласно табл. 1.1

$$y = \begin{cases} x_1 & \text{при } x_1 \leq x_2 \text{ и } x_3 \leq x_1; \\ x_2 & \text{при } x_2 \leq x_1 \text{ и } x_3 \leq x_2; \\ x_3 & \text{при } x_3 \geq x_1 x_2. \end{cases}$$

Используем конъюнкцию НЛ и объединим первые две строки в одну

$$y = \begin{cases} x_1 x_2 & \text{при } x_3 \leq x_1 x_2; \\ x_3 & \text{при } x_3 \geq x_1 x_2. \end{cases}$$

Объединяя теперь обе строки в одну с помощью операции дизъюнкции НЛ, находим искомое представление: $y = x_1 x_2 \vee x_3$.

Операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания НЛ подчиняются большинству законов, которым подчиняются, аналогичные операции двузначной логики, а именно: законам тавтологии (1.8), переместительному (1.9), сочетательному (1.10), распределительному (1.11), отрицания (1.12), поглощения (1.13), двойного отрицания (1.14).

Однако законы исключенного третьего, противоречия и ортогонализации НЛ оказываются более сложными, чем их аналоги в двузначной логике:

$$x \vee \bar{x} = M + |x - M|; \quad x \bar{x} = M - |x - M|; \quad (1.24)$$

$$x \vee \bar{x} y = (x \vee y)(M + |x - M|), \quad (1.25)$$

где $M = (A + B) / 2$.

При помощи перечисленных законов выражения функций НЛ могут подвергаться эквивалентным преобразованиям в целях их упрощения. Множество

всех функций НЛ, рассматриваемых совместно с операциями конъюнкции, дизъюнкции и отрицания НЛ, подчиняющимися законам (1.8)–(1.14), (1.24), (1.25), называется *алгеброй НЛ*.

Произвольная функция НЛ может быть представлена в любой из двух стандартных форм – ДНФ и КНФ. Для такого представления удобно исходить из задания функции в аналитической форме. Переход от такой формы к ДНФ состоит в последовательном выполнении двух чередующихся операций: 1) спуск отрицаний с более сложных выражений на их менее сложные части в соответствии с законами отрицания (1.12), (1.14); 2) раскрытие скобок в соответствии с первым распределительным законом (1.11).

Пример 1.6. Привести к ДНФ функцию НЛ $y = (x_1 x_2 \vee \bar{x}_2 x_3) \overline{\bar{x}_1 x_4}$. Так, согласно (1.12), (1.14), $\overline{\bar{x}_1 x_4} = x_1 \vee \bar{x}_4$. Подставив это в выражение y и раскрыв скобки по (1.11), после упрощения мы получим

$$y = (x_1 x_2 \vee \bar{x}_2 x_3)(x_1 \vee \bar{x}_4) = \underline{x_1 x_2} \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \underline{\vee x_1 x_2 \bar{x}_4} \vee \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 = x_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4.$$

Переход от произвольной аналитической формы записи функций НЛ к КНФ состоит в последовательном выполнении двух чередующихся операций:

- 1) спуск отрицаний с более сложных выражений на их менее сложные части согласно законам отрицания (1.12) (1.14);
- 2) введение скобок согласно второму распределительному закону (1.11).

Пример 1.7. Привести к КНФ функцию НЛ из примера 1.6. Имеем согласно второму закону (1.11)

$$x_1 x_2 \vee \bar{x}_2 x_3 = (x_1 x_2 \vee \bar{x}_2)(x_1 x_2 \vee x_3) = (x_1 \vee \bar{x}_2)(x_2 \vee \bar{x}_2)(x_1 \vee x_3) \cdot (x_2 \vee x_3).$$

Учитывая найденное в примере 1.6 выражение $\overline{\bar{x}_1 x_4}$, получаем

$$y = (x_1 \vee \bar{x}_2)(x_2 \vee \bar{x}_2)(x_1 \vee x_3)(x_2 \vee x_3)(x_1 \vee \bar{x}_4).$$

3. Уравнения и неравенства непрерывной логики

Описываемые ниже уравнения и неравенства НЛ [6] используются во второй части работы для синтеза надежностных процессов в технических системах.

Уравнением НЛ называется уравнение вида

$$f(a_1, \dots, a_k, x_1, \dots, x_n) = \varphi(a_1, \dots, a_k, x_1, \dots, x_n), \quad (1.26)$$

где f и φ – заданные функции НЛ; $a_1, \dots, a_k$ – известные, а $x_1, \dots, x_n$ – неизвестные (искомые) аргументы. Любой набор $(x_1, \dots, x_n)$, для которого равенство (1.26) обращается в тождество, называется *частным решением* уравнения (1.26). Совокупность всех частных решений называется *общим решением*.

Аналогично уравнению вводится *неравенство НЛ*

$$f(a_1, \dots, a_k, x_1, \dots, x_n) < \varphi(a_1, \dots, a_k, x_1, \dots, x_n) \quad (1.27)$$

Можно также рассматривать системы уравнений и неравенств НЛ. Основным методом решения уравнений и неравенств НЛ является последовательное *расчленение* левых и правых частей, основанное на определении операций НЛ и позволяющее заменять исходное уравнение (неравенство) эквивалентным объ-

единением систем из более простых уравнений и неравенств. Решение системы уравнений и неравенств получается как пересечение решений входящих в нее уравнений (неравенств). Поясним сказанное.

Пусть обе части уравнения (1.26) представлены в ДНФ. Тогда в обеих частях последней операцией может быть только конъюнкция и дизъюнкция. Пусть, например, в левой части последняя операция – дизъюнкция. Тогда уравнение можно записать в виде

$$f_1(a, x) \vee f_2(a, x) = \varphi(a, x), \quad (1.28)$$

где $a = (a_1, \dots, a_k)$ – вектор параметров; $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор неизвестных. Согласно определению дизъюнкции НЛ уравнение (1.28) эквивалентно объединению двух систем уравнений и неравенств:

$$\left(\begin{array}{l} f_1(a, x) \geq f_2(a, x) \\ f_1(a, x) = \varphi(a, x) \end{array} \right) \cup \left(\begin{array}{l} f_1(a, x) < f_2(a, x) \\ f_2(a, x) = \varphi(a, x) \end{array} \right). \quad (1.29)$$

Расчленение левой части исходного уравнения (1.28) привело к тому, что каждое уравнение или неравенство в (1.29) стало проще, чем уравнение (1.28) (содержит меньше операций). Этот процесс упрощения теперь может быть продолжен путем расчленения правой части (1.28) и т.д.

Пример 1.8. Решить уравнение $ax = b$. Это уравнение путем расчленения левой части превращаем в объединение систем $(x \geq a = b) \cup (x = b < a)$. Отсюда решение: $x = b$ при $a > b$ и $x \geq b$ при $a = b$ (решение существует только при $a \geq b$).

Пример 1.9. Решить неравенство $ax > b$. Расчленение левой части дает объединение систем $(x \geq a > b) \cup (b < x < a)$. Отсюда решение: $x > b$ (существует при $a > b$).

Пример 1.10. Решить неравенство $ax < b$. Расчленением левой части получаем $(x \geq a < b) \cup (x < a, b)$. Решение: $x \in [a, b]$ при $a < b$ и $x < b$ при $a \geq b$ (существует всегда).

Пример 1.11. Решить уравнение $c \vee x = b$. Расчленение левой части дает объединение систем $(b = x > c) \cup (b = c \geq x)$. Решение: $x = b$ при $b > c$ и $x \leq b$ при $b = c$ (существует при $b \geq c$).

4. Вероятностные расчеты в непрерывной логике

На практике может возникнуть необходимость изучения функций НЛ, аргументы которых – случайные величины. Направление, занимающееся этим изучением, называется *вероятностной НЛ*. Задача вероятностной НЛ – отыскание распределений и моментов функций НЛ, аргументы которых распределены по известным законам.

1) Пусть, например, функция НЛ имеет вид конъюнкции

$$y = \bigwedge_{i=1}^n x_i, \quad (1.30)$$

а ее аргументы x_i – независимые случайные величины с функциями распределения $F_{x_i}(x) = P(x_i < x)$, где P – символ вероятности, и плотностями вероятности

сти $g_{x_i}(x) = \frac{d}{dx} F_{x_i}(x)$. Тогда случайна также величина y с некоторой функцией распределения $F_y(x)$. Найдем $F_y(x)$. По определению конъюнкции НЛ (1.20) $y = \min_i x_i$. Поэтому $y \geq x$ только при $x_1 \geq x, \dots, x_n \geq x$. Отсюда

$$F_y(x) = P(y < x) = 1 - P(y \geq x) = 1 - \prod_{i=1}^n P(x_i \geq x) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(x_i < x)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{x_i}(x)].$$

Таким образом,

$$F_y(x) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{x_i}(x)]. \quad (1.31)$$

Дифференцируя по x , найдем плотность вероятности y :

$$g_y(x) = \sum_{j=1}^n g_{x_j}(x) \prod_{i \neq j} [1 - F_{x_i}(x)]. \quad (1.32)$$

Для одинаково распределенных аргументов $x_i, i = 1, \dots, n$,

$$F_y(x) = 1 - [1 - F(x)]^n, \quad (1.33)$$

$$g_y(x) = ng(x)[1 - F(x)]^{n-1}, \quad (1.34)$$

где $F(x)$ и $g(x)$ – функция распределения и плотность вероятности аргумента.

2) Рассмотрим функцию НЛ – дизъюнкцию

$$y = \bigvee_{i=1}^n x_i \quad (1.35)$$

с прежними (см. п. 1) случайными аргументами x_i . Так как по определению дизъюнкции (1.21) $y = \max_i(x_i)$, то $y < x$ только при $x_1 < x, \dots, x_n < x$. Отсюда функция распределения величины y .

$$F_y(x) = \prod_{i=1}^n F_{x_i}(x), \quad (1.36)$$

а ее плотность вероятности

$$g_y(x) = \sum_{j=1}^n g_{x_j}(x) \prod_{i \neq j} F_{x_i}(x). \quad (1.37)$$

Для одинаково распределенных аргументов $x_i, i = 1, \dots, n$

$$F_y(x) = [F(x)]^n, \quad (1.38)$$

$$g_y(x) = ng(x)[F(x)]^{n-1}. \quad (1.39)$$

3) Рассмотрим функцию НЛ в виде ДНФ без общих аргументов в различных конъюнкциях. Все аргументы – независимые случайные величины. Распределение такой функции можно найти, используя формулы распределения конъюнкции (п. 1) и дизъюнкции (п. 2).

Пример 1.12. Функция НЛ имеет вид: $D = x_1 x_2 \vee x_3 x_4$. Аргументы x_i независимы и распределены по одному и тому же закону с функцией распределения $F(x)$ и плотностью вероятности $g(x)$. Найдем распределение величины D .

Согласно (1.33), (1.34) конъюнкции x_1x_2 и x_3x_4 имеют одинаковые функцию распределения $\hat{F}(x) = 1 - [1 - F(x)]^2 = F(x)[2 - F(x)]$ и плотность вероятности $\hat{g}(x) = 2g(x)[1 - F(x)]$. Величина D согласно (1.38), (1.39) имеет функцию распределения

$$F_D(x) = \hat{F}^2(x) = F^2(x)[2 - F(x)]^2$$

и плотность вероятности

$$g_D(x) = 2\hat{g}(x)\hat{F}(x) = 4g(x)F(x)[1 - F(x)][2 - F(x)].$$

4) Для отыскания распределения функции НЛ общего вида используется метод расчленения (см. п. 1.3).

Пример 1.13. Функция НЛ имеет вид: $y = x_1x_2 \vee x_1x_3 \vee x_2x_3$ (функция-медиана, принимает значение средней из переменных x_1, x_2, x_3). Аргументы x_i зависимы и распределены с совместной плотностью вероятности

$$g(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} g(x_1, x_2, x_3) & \text{при } x_1 \leq x_2 \leq x_3; \\ g(x_1, x_2, x_3) & \text{при } x_3 \leq x_2 \leq x_1; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Найдем функцию распределения $F_y(x)$ величины y . Сначала расчленим событие ($y < x$):

$$(y < x) = (x_1 \leq x_2 \leq x_3, x_2 < x) \cup (x_1 \leq x_3 \leq x_2, x_3 < x) \cup (x_3 \leq x_1 \leq x_2, x_1 < x) \cup \\ \cup (x_2 \leq x_1 \leq x_3, x_1 < x) \cup (x_2 \leq x_3 \leq x_1, x_3 < x) \cup (x_3 \leq x_2 \leq x_1, x_2 < x).$$

Отсюда с учетом заданной совместной плотности вероятности аргументов функции $f(\cdot)$ получаем

$$F_y(x) = P(y < x) = \iiint_{\substack{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \\ x_2 < x}} g_1(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 + \iiint_{\substack{x_3 \leq x_2 \leq x_1 \\ x_2 < x}} g_2(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3,$$

и для получения явного выражения $F_y(x)$ остается задать явные выражения функций $g_1(\cdot)$ и $g_2(\cdot)$ и проинтегрировать.

Другой универсальный прием основан на методе Монте-Карло, т.е. 1) генерировании N независимых наборов случайных аргументов $x_1, \dots, x_n$ заданной функции НЛ $y = f(x_1, \dots, x_n)$ в соответствии с заданным распределением этих аргументов; 2) подсчете для каждого набора $(x_1, \dots, x_n)$ соответствующего значения функции y ; 3) подсчете частоты попадания значений функции y в различные подобласти области ее определения, что дает оценку распределения значений y . Этот прием, в отличие, от предыдущего, применим к весьма сложным функциям НЛ. Однако его погрешность мала лишь при больших N .

5) Как следует из пп. 1, 2, для отдельных классов функций НЛ $y = f(x_1, \dots, x_n)$, вероятностное распределение значений y можно найти, минуя аналитическое представление функции – базируясь лишь на ее содержательном смысле. Рассмотрим теперь более сложный пример таких функций – порядковую r -функцию

$$X_n^r = \left| \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} \right|^{(r)} \quad (1.40)$$

со случайными независимыми элементами x_i , распределенными по одному и тому же закону с распределением $F(x)$ и плотностью вероятности $g(x)$. Найдем плотность вероятности $g_n^r(x)$ величины X_n^r .

Расположим элементы ЛО (1.40) в порядке неубывания: $x^{(1)} \leq x^{(2)} \leq \dots \leq x^{(n)}$. По определению $X_n^r = x^{(r)}$. Значит, среди n элементов x_i имеется $r-1$ не больших X_n^r и $n-r$ не меньших X_n^r . Найдем вероятность $g_n^r(x)dx$ того, что значение X_n^r находится в интервале $(x, x+dx)$. Ясно, что

$$g_n^r(x)dx = P_1 P_2 P_3, \quad (1.41)$$

где $P_1 = ng(x)dx$ – вероятность того, что какой-либо из n элементов x_i находится в интервале $(x, x+dx)$; $P_2 = C_{n-1}^{r-1} F^{r-1}(x)$ – вероятность того, что из оставшихся $n-1$ элементов x_i ровно $r-1$ каких-то элементов находятся в интервале $(-\infty, x)$; $P_3 = [1 - F(x)]^{n-r}$ – вероятность того, что оставшиеся $n-r$ элементов x_i находятся в интервале $(x+dx, \infty)$.

Подставив выражения P_i в (1.41), получим

$$g_n^r(x) = n C_{n-1}^{r-1} F^{r-1}(x) g(x) [1 - F(x)]^{n-r}. \quad (1.42)$$

Из (1.42) при $r=1$ и $r=n$ как частные случаи следуют ранее полученные выражения (1.34) и (1.39) плотности вероятности двух функций НЛ: конъюнкции и дизъюнкции.

Заключение

Работа публикуется в двух частях. В настоящей статье – первой части работы описан математический аппарат создаваемой автором логической теории надежности. Изложены дискретная и непрерывная логики, включая логические уравнения и неравенства. Описаны также вероятностные расчеты с логическими функциями, имеющими случайные аргументы.

Во второй части работы на основе разработанного математического аппарата логической теории надежности будет решена задача построения автоматной модели надежности систем, которая позволит вести практические расчеты надежности реальных технических систем.

Данная работа продолжает цикл исследований автора, посвященный разработке математического аппарата логической теории надежности. В частности данная работа отличается от ранее опубликованных работ автора [7, 8] усовершенствованием расчетных формул, что должно облегчить инженерное приложение разработанного математического аппарата и упростить вычислительную сложность расчета надежности реальных технических систем.

Литература

1. Ллойд Д. К., Липов М. Надежность: организация, исследования, методы, математический аппарат. – М.: Советское радио, 1964. – 350 с.
2. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 410 с.

3. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. – М.: Мир, 1979. – 454 с.
4. Левин Б. Р. Теория надежности радиотехнических систем. – М.: Советское радио, 1978. – 264 с.
5. Пospelов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. – М.: Энергия, 1974. – 350 с.
6. Левин В. И. Бесконечнозначная логика в задачах кибернетики. – М.: Советское радио, 1982. – 176 с.
7. Левин В. И. Логические методы в теории надежности. I. Математический аппарат // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 4. С. 873-884.
8. Левин В.И. Логическое моделирование надежности систем управления. I // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 568-577.

References

1. Lloyd D. K., Lipov M. *Nadezhnost: organizaciya, issledovaniya, metody, matematicheskiy apparat* [Reliability: organization, research, methods, mathematical means] Moscow, Sovetskoe radio, 1964. – 350 p. (in Russian).
2. Barlow R. E., Proshan F. *Mathematical Theory of Reliability*. N.-Y., John Wiley and Sons, 1965.
3. Rainshke K. *Modeli nadezhnosti i chuvstvitelnosti system* [Models of Reliability and Sensitivity of Systems]. Moscow, Mir, 1979. 454 p. (in Russian).
4. Levin B. R. *Teoriya nadezhnosti radiotekhnicheskikh system* [Theory of Reliability of Radiotechnical Systems]. Moscow, Sovetskoe radio, 1978. 264 p. (in Russian).
5. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem* [Logical Methods of Analysis and synthesis of Schemes]. Moscow, Energiya, 1974. 350 p. (in Russian).
6. Levin V. I. *Beskonechnoznachnaya logika v zadachah kibernetiki* [Continuous Logic in Problems of Cybernetics]. Moscow, Sovetskoe radio, 1982. 176 p. (in Russian).
7. Levin V. I. Logical Methods in Reliability Theory. I. Mathematical Apparatus. *Transaction of the TSTU*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 873-884 (in Russian).
8. Levin V. I. Logical Modeling of Reliability of Control Systems. *Izvestiia Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 568-577 (in Russian).

Статья поступила 6 ноября 2017 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории;

принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru
Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

Evaluation of Reliability of Systems by Logical Methods

V. I. Levin

Relevance. In recent years, the increasing attention of scientists and designers of communication systems has been acquiring the issues of improving methods for assessing the reliability and safety of technical systems, in connection with the tasks put forward to increase the values of these characteristics. **Purpose** of the article is to develop a new, logical model of the reliability of technical systems and the corresponding logical methods for assessing the reliability of such systems, using not traditional probabilistic but deterministic logical reliability indicators. **Method.** To achieve this goal, it was suggested to use as the initial data the observed moments of successive failures and recovery of the elements of the technical system, and as the reliability characteristics of the system itself, the moments of successive failures and recovery of this system. In this case, the problem of estimating the reliability of a system is reduced to constructing its mathematical model in the form of logical functions expressing the moments of its successive failures and restores through analogous moments of all its elements. In this connection, a logical mathematical apparatus designed to calculate the logical function of the reliability of technical systems is developed in detail. **Novelty** of the work is the construction of an adequate logical model of the system's reliability, which makes it possible to reduce the reliability estimate of a technical system to the calculation of its logical reliability functions. **Result.** In the article the logical model of reliability and methods of its investigation are developed in detail, allowing to introduce new indicators of reliability of technical systems that do not require for their evaluation the use of probability methods and initial statistical data on element failures.

Keywords: system, reliability, a model of reliability, two-valued logic, continuous logic, laws of logic.

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» является научным рецензируемым периодическим электронным изданием. Цель журнала – максимально полное, оперативное и открытое информирование научной общественности об основных результатах научно-исследовательских работ в области теории управления, теории связи, теории безопасности, а также о новых тенденциях развития технологий соответствующих прикладных областей.

Периодичность выхода журнала – четыре номера в год.

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» публикует только статьи, которые соответствуют основным тематическим разделам журнала:

1. Анализ новых технологий и перспектив развития систем управления, связи и безопасности.
2. Системы управления.
3. Интеллектуальные информационные системы.
4. Робототехнические системы.
5. Вычислительные системы.
6. Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации.
7. Информационная безопасность.
8. Передача, прием и обработка сигналов. Радиоэлектронный мониторинг.
9. Системы связи и телекоммуникации.
10. Системы обеспечения безопасности.
11. Электронные и радиотехнические системы.
12. Моделирование сложных организационно-технических систем.
13. Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области управления, связи и безопасности.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Журнал доступен по адресу <http://sccs.intelgr.com>.

Архив выпусков журнала доступен по адресу <http://sccs.intelgr.com/arch.html>.

Правила для авторов

Материалы, представляемые в редакцию

1. Файл со статьей, оформленной по требованиям журнала.
2. Сканированную копию экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию.
3. Авторы могут подготовить краткое сообщение рецензенту, дополнительно поясняющее отдельные элементы работы, их суть и новизну, рамки исследования, связь своей работы с имеющимися публикациями в предметной области. Данное сообщение необязательно, но, при его наличии, оно будет передано рецензенту вместе со статьей.

Порядок рецензирования и принятия статьи к публикации

1. Авторский коллектив представляет в редакцию статью и сопроводительные материалы на адрес sccs@intelgr.com.
2. Редакция осуществляет проверку материалов на предмет соответствия требованиям к оформлению и представлению результатов. При необходимости технической правки статьи авторы уведомляются об этом.
3. Если замечаний по оформлению статьи нет, она проверяется в сервисах, выявляющих плагиат, и с результатами проверки передается на рецензирование. Редакция уведомляет авторов о передаче статьи на рецензирование.
4. Порядок проверки на плагиат и выбор сервиса для проверки определяется редакцией самостоятельно. Для проверки на плагиат редакцией используются Интернет-сервисы Антиплагиат, ТЕХТ, Content-watch, а также программы Etxt и Advengo Plagiatus.
5. В случае положительного решения рецензентов о возможности публикации статьи авторы уведомляются об этом. В случае несовпадения мнений рецензентов о возможности публикации статьи, она передается на повторное рецензирование или рассматривается редакционной коллегией журнала, о чем уведомляется авторский коллектив. В случае решения рецензентов или редакционной коллегии журнала о невозможности публикации статьи авторы получают мотивированный отказ.
6. По решению рецензентов или редакционной коллегии статья может быть принята к публикации, но с доработками. В этом случае авторы должны в короткий срок переработать статью в соответствии с замечаниями рецензентов, либо дать мотивированный ответ по замечаниям. Если доработка статьи потребует значительного времени, авторы должны уведомить об этом редакцию.
7. После принятия статьи к публикации, авторы оплачивают редакционные расходы, связанные с публикацией статьи.
8. После оплаты редакционных расходов статья размещается в очередном номере журнала на сайте издательства. Авторы уведомляются о публикации их статьи по электронной почте.
9. После формирования очередного номера журнала данные об опубликованных в нем статьях в течение трех месяцев передаются в наукометрические базы учета научных публикаций.

Пример оформления статьи доступен по адресу

<http://sccs.intelgr.com/download/article.doc>

1. Статья представляется в формате Word 97/2000/XP с расширением **doc**.
2. Рекомендуемый объем статьи – **до 50 страниц**. Объем может быть увеличен, если этого требует логика изложения материала.
3. Размер страницы – А4. Все поля (верхнее, нижнее, правое и левое) по 2 см.
4. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размер шрифта 14 pt, одинарный междустрочный интервал, абзацный отступ 1,25 см, отступы между абзацами отсутствуют. В основном тексте допускаются выделения курсивом. Латинские буквы для обозначения переменных набираются курсивом; греческие, русские буквы, функции – прямым шрифтом. Цифровые индексы в обозначениях набираются прямым шрифтом.
5. Статья должна начинаться с индекса УДК, выровненного по левому краю. После индекса УДК следует пропуск строки.
6. Название статьи должно точно и однозначно характеризовать содержание статьи. Название статьи – полужирным шрифтом, выравнивание по центру без абзацного отступа. **Название писать строчными (маленькими) буквами**, используя заглавные буквы только там, где это необходимо (в начале первого слова, в названиях, именах собственных, сокращениях и т.п.). Не рекомендуется использовать в названии сокращения, кроме общепринятых в соответствующей предметной области. Точка после заглавия НЕ ставится. После названия статьи следует пропуск строки.
7. Фамилии и инициалы авторов указываются через запятую в последовательности, соответствующей личному вкладу в написание статьи. Фамилии авторов выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Между фамилией и первым инициалом, а также между инициалами ставится неразрывный пробел (Ctrl+Shift+пробел). После фамилий авторов следует пропуск строки.
8. Аннотация выполняется на русском и английском языке в соответствии с [рекомендациями по написанию авторского резюме](#). Оформление аннотации: размер шрифта **11pt**, курсив, абзацный отступ 1,25 см. Заголовки отдельных элементов в структуре аннотации выделяются жирным шрифтом. После аннотации следует пропуск строки.
9. Ключевые слова оформляются так же, как и аннотация, и должны содержать основные понятия и термины, употребляемые в статье. Ключевые слова должны формулироваться таким образом, чтобы при семантическом поиске по ним можно было найти данную статью потенциально заинтересованным ученым. После абзаца с ключевыми словами следует пропуск строки.
10. Для структуризации статьи рекомендуется основной текст разделить по частям, имеющим условные подзаголовки «Введение», «Постановка задачи» («Формализация задачи»), «Модель...» («Методика...», «Метод...»), «Результаты моделирования» («Обоснование...»), «Выводы». Подзаголовки выполняются полужирным шрифтом и выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Перед подзаголовками следует пропуск одной строки.
11. Таблицы выравниваются по центру без абзацного отступа. Текст внутри таблиц может выполняться шрифтом от 10pt до 14pt, в зависимости от степени информационной загрузки ячеек таблиц. Таблицы нумеруются по порядку упоминания, а их названия оформляются в виде «Таблица 1 – Название таблицы» и выравниваются по центру без абзацного отступа. Если таблица выполняется на

- нескольких страницах, необходимо выставлять признак заголовка для первой строки с наименованиями столбцов, либо дублировать первую строку с наименованиями на следующей странице.
12. Рисунки выполняются в виде внедренных объектов векторной графики, выполненных в формате MS Visio (**vsd**) или в форматах метафайлов Windows (**wmf** или **emf**). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах **jpg** или **png**. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне. В этом случае рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами.
 13. Формулы выполняются в редакторе формул MathType или Microsoft Equation 3.0. Формулы могут быть набраны в основном тексте со вставкой специальных математических символов через меню «Вставка-Символы». **Запрещается набирать формулы во встроенном редакторе формул Microsoft Office 2007 и выше.** Основной шрифт формул набираемых в MathType и Microsoft Equation 3.0, 14 pt. Формулы выравниваются по левому краю с абзацным отступом 2,5 см. При необходимости переноса формул используется общепринятая математическая запись переноса. Формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи, должны быть пронумерованы. Номер формулы проставляется с правого края страницы. При оформлении формул, не следует вставлять дополнительные пропуски строки до и после формул.
 14. Для облегчения редактирования статьи просим выделять **желтым маркером** номера формул, номера рисунков, ссылки на литературу, ссылки на формулы и рисунки в основном тексте статьи.
 15. В конце статьи, по желанию авторов, могут быть приведены высказывания благодарности за помощь в исследованиях, сведения о грантах, НИРах и ОКРах, в рамках которых выполнялась работа, а также сведения об источниках финансирования исследований. Также в конце статьи авторами могут быть представлены приложения, где содержатся листинги программ, на основе которых выполнялось моделирование, различные объемные таблицы и графики, а также другие элементы, которые с одной стороны являются неотъемлемой частью исследования, а с другой - загромождают текст статьи.
 16. Список используемых источников оформляется в соответствии с [требованиями к оформлению библиографических ссылок нашего журнала](#) после подзаголовка «Литература», который выполняется полужирным шрифтом, выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Нумерация ссылок определяется порядком их упоминания в статье. При формировании списка литературы не следует использовать функцию автоматического формирования нумерованного списка. После подзаголовка «Reference» литература дублируется на английском языке. При оформлении списка литературы и его перевода редакция настоятельно просит авторов пользоваться и соблюдать требования и [рекомендации по оформлению списка литературы и его переводу на английский язык](#). После списка литературы и Reference следует пропуск строки.
 17. После списка Reference указывается дата первого представления статьи в редакцию. Данный абзац выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по правому краю страницы.
 18. В конце статьи указывается информация об авторах. Данные сведения для каждого соавтора обязательно должны содержать: фамилию, имя, отчество

полностью, научную степень, научное звание, должность и полное наименование организации, телефон и e-mail.

19. Статья завершается текстовым блоком, дублирующим название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотацию статьи и ключевые слова на английском языке. Данный текстовый блок начинается с новой страницы и его элементы оформляются так же, как соответствующие элементы на русском языке в начале статьи.

Требования к оформлению блока, содержащего сведения об авторах. Нижеуказанные сведения приводятся по каждому автору отдельно.

1. Фамилия, Имя, Отчество на русском языке.
2. Научная степень и научное звание (если есть) на русском языке.
3. Место работы с указанием страны и города на русском языке. Указывается официальное название, желательно из устава, в именительном падеже. Так как базы цитирования (например, РИНЦ) «привязывают» статью к определенному автору в определенной организации, то неверное указание места работы может привести к тому, что Ваша статья может отсутствовать в списке Ваших публикаций в базах цитирования, а также в списке публикаций сотрудников Вашей организации.
4. Должность на русском языке.
5. Область научных интересов – на русском языке.
6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
8. Телефон для связи.

1. Фамилия, Имя, Отчество на английском языке.
2. Научная степень и научное звание (если есть) на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться [рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания](#).
3. Международное название места работы с указанием страны и города на английском языке (желательно, в соответствии с уставом). Переводить по буквам аббревиатуры в названии НЕ НУЖНО. Редакция просит Вас воздержаться от использования аббревиатур и сокращений, кроме аббревиатур, указывающих на организационно-правовую форму места работы автора (ФГБОУ, ООО, ОАО и т. п.).
4. Должность на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться [рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания](#).
5. Область научных интересов – на английском языке (Field of research: ...).
6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
8. Телефон для связи.

Следует учесть, что данные, приведенные в сведениях об авторах (электронный и обычный адрес, телефоны и факс), должны позволять редакции быстро связаться с авторами статей. Если такая связь оказывается невозможной, то это может привести к задержке в публикации статьи. Следует иметь в виду, что редакция не имеет возможности для ведения длительных междугородних телефонных переговоров. Поэтому настоятельно рекомендуется всю переписку с редакцией вести по электронной почте. Редакция настоятельно рекомендует приводить действующие и часто просматриваемые электронные адреса.

При написании работ просим авторов воспользоваться [рекомендациями по написанию научных статей](#).

Минимальные системные требования:

- процессор: Intel x86, x64, AMD x86, x64 не менее 1 ГГц;
- оперативная память RAM ОЗУ: не менее 512 МБайт;
- свободное место на жестком диске (HDD): не менее 120 МБайт;
- операционная система: Windows XP и выше;
- Adobe Acrobat Reader;
- дисковод CD-ROM;
- мышь.

ООО «Корпорация «Интел Групп»

Системы управления, связи и безопасности

Научный журнал

Адрес редакции:

197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, д. 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.

Тел.: (812) 945-50-63.

<http://sccs.intelgr.com>

E-mail: sccs@intelgr.com

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 61239 от 03.04.2015 г.

Территория распространения - Российская Федерация и зарубежные страны