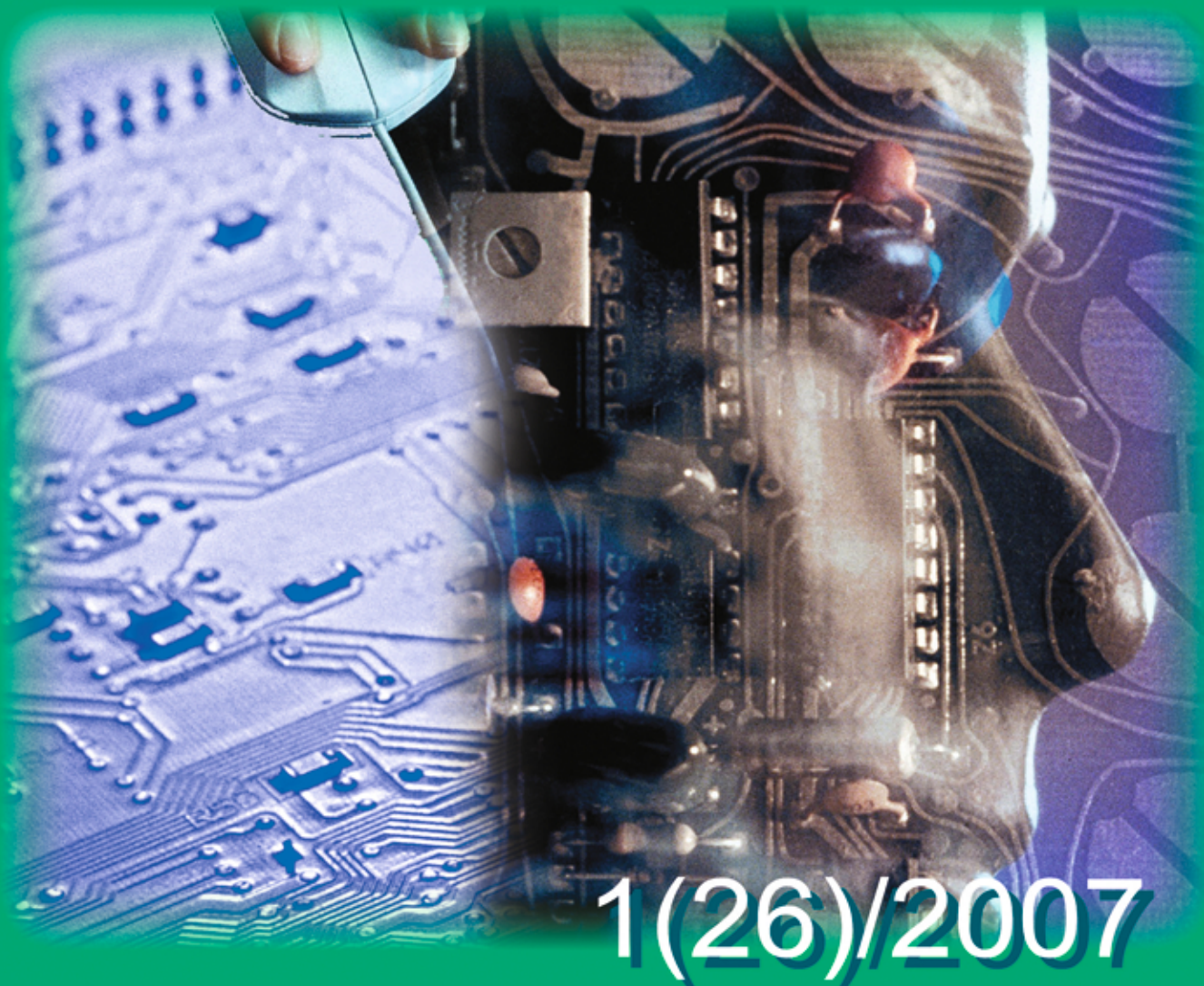


# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



1(26)/2007

1 (26)/2007

# ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

**Главный редактор**

М. Б. Сергеев,  
доктор технических наук, профессор

**Зам. главного редактора**

Г. Ф. Мощенко

**Редакционный совет:**

**Председатель** А. А. Оводенко,  
доктор технических наук, профессор  
В. Н. Васильев,  
доктор технических наук, профессор  
В. Н. Козлов,  
доктор технических наук, профессор  
Ю. Ф. Подоплекин,  
доктор технических наук, профессор  
Д. В. Пузанков,  
доктор технических наук, профессор  
В. В. Симаков,  
доктор технических наук, профессор  
А. Л. Фрадков,  
доктор технических наук, профессор  
Л. И. Чубраева,  
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН  
Р. М. Юсупов,  
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН

**Редакционная коллегия:**

В. Г. Анисимов,  
доктор технических наук, профессор  
Е. А. Крук,  
доктор технических наук, профессор  
В. Ф. Мелехин,  
доктор технических наук, профессор  
А. В. Смирнов,  
доктор технических наук, профессор  
В. И. Хименко,  
доктор технических наук, профессор  
А. А. Шальто,  
доктор технических наук, профессор  
А. П. Шепета,  
доктор технических наук, профессор  
З. М. Юлдашев,  
доктор технических наук, профессор

**Редактор:** А. Г. Ларионова

**Корректор:** Т. В. Звертановская

**Дизайн:** М. Л. Черненко

**Компьютерная верстка:** Т. М. Каргапольцева

**Ответственный секретарь:** О. В. Муравцова

**Адрес редакции:** 190000, Санкт-Петербург,

Б. Морская ул., д. 67

Тел.: (812) 494-70-36

Факс: (812) 494-70-18

E-mail: 80x@mail.ru; ius@aanet.ru

Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Журнал распространяется по подписке.

Подписку можно оформить через редакцию, а также

в любом отделении связи по каталогам:

«Пресса России» – № 42476;

«Роспечать» («Газеты и журналы») – № 15385

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ**

**Сергеев М. Б., Соловьев Н. В., Стадник А. И.** Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации 2

**Тихонов Э. П.** Стохастический, пространственный аналого-цифровой преобразователь и его связь с нейронными структурами 8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

**Нестеренко В. Д.** Концепция построения архитектуры моделей процессов управления инфокоммуникационными сетями (Часть 2) 19

**Андреев Е. Н., Вандюк Н. Ю., Волков Д. А., Коротков Д. А., Платонова М. Ю., Чубраева Л. И.** Математическое и физическое моделирование процессов в сверхпроводниковых трансформаторах 25

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ**

**Мальцев Г. Н.** Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи 33

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ**

**Сафронов В. В., Ведерников Ю. В., Матросов В. В., Умеренков С. А., Кравцов А. М.** Методика оптимизации структуры сложных технических систем в условиях риска 40

**Чернов В. Г.** Решение задач многокритериального альтернативного выбора на основе геометрической проекции нечетких множеств 46

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**Кунгурцев В. В.** Устойчивость протоколов информационного обмена в космических сетях связи и управления 52

**ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ**

**Шальто А. А.** Визит Бертрана Мейера в Санкт-Петербург 55

VI Международная конференция «Авиация и космонавтика-2007» 57

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

59

**АННОТАЦИИ**

62

ЛР № 010292 от 18.08.98.

Сдано в набор . Подписано в печать . Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 1000 экз. Заказ 396.

Оригинал-макет изготовлен  
в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 621.865.8

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

**М. Б. Сергеев,**

доктор техн. наук, профессор

**Н. В. Соловьев,**

канд. техн. наук, доцент

**А. И. Стадник,**

соискатель

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

*Приведен обзор методов повышения контрастности растровых изображений с целью увеличения визуальной различимости фрагментов, которые могут найти применение в системах цифровой обработки видеoinформации. Рассмотрены методы, основанные на преобразовании шкалы яркости, и адаптивные методы.*

*We give a review of the methods to sharpen the contrast of raster images that can be used in the systems of digital video processing with the goal of increasing the visual discernibility of certain fragments. Methods based on the transformation of the brightness scale and adaptive methods are considered.*

### Введение

В настоящее время коррекция изображений в системах цифровой обработки видеoinформации проводится в основном для компенсации пространственных искажений и подавления импульсных помех, а также для улучшения качества изображений. Алгоритмы, используемые для такой обработки, достаточно хорошо известны и применяются в различных программных пакетах и средах программирования, например в PhotoShop или Matlab. Следует отметить, что PhotoShop, обладая очень широкими возможностями по обработке изображений, предназначен в основном для создания различных визуальных эффектов с целью усиления эмоционального восприятия изображений, а не для повышения их информативности. Среда Matlab, включая в себя многочисленные процедуры обработки изображений, требует от пользователя знания специального языка программирования, а также необходимости написания и отладки отдельных программ для выполнения сложных алгоритмов обработки изображений.

Для современных систем получения изображения в цифровом виде характерно практически пол-

ное отсутствие сколько-нибудь существенных яркостных и пространственных помех, однако полученные с их помощью изображения могут иметь недостаточную различимость отдельных фрагментов, которая может быть вызвана низкой или слишком большой освещенностью объектов отображаемой сцены. Известно [1], что человек не в состоянии точно определить границу между фрагментами монохромного растрового изображения, яркость которых отличается на один уровень при наиболее распространенном диапазоне в 256 уровней яркости.

Неправильный выбор фокусного расстояния при получении изображения может вызвать существенное размывание контурных линий, что также снижает возможность визуального разделения отдельных фрагментов. Возможно и сочетание этих факторов, т. е. на одном изображении соседние фрагменты имеют низкие контрастность и резкость одновременно.

### Увеличение контрастности изображения

Контрастность монохромного изображения можно определить как

$$C = z_{\max} - z_{\min}, \quad (1)$$

где  $z_{\max}$ ,  $z_{\min}$  — соответственно максимальная и минимальная яркость пикселей на изображении. Относительная контрастность

$$C_{i oi} = \frac{N}{z_m},$$

где  $z_m = 255$  — максимально возможная яркость. Из соотношения (1) видно, что контрастность может быть оценена как для всего изображения (глобальная контрастность), так и для какой-то части изображения (локальная контрастность). В частности, для локальной контрастности фрагментов под  $z_{\max}$ ,  $z_{\min}$  понимаются соответственно яркости пикселей соседних фрагментов на линии их разделения.

Под резкостью принято понимать отношение разности яркостей соседних фрагментов, т. е. их контрастности, к ширине контурной линии, разделяющей эти фрагменты, т. е. фактически пространственную производную яркости. Очевидно, что в отличие от контрастности резкость может быть только локальной. Исходя из данного определения резкость можно повысить, или сократив ширину контурной линии, или увеличив контрастность фрагментов, причем повышение контрастности всегда приводит к увеличению резкости.

Методы увеличения контрастности и, как следствие, увеличения резкости можно разделить на глобальные, в основе которых лежит преобразование шкалы яркости, и адаптивные, в которых величина изменения яркости каждого пикселя зависит от характеристики окружающей его окрестности.

В глобальных методах повышения контрастности производится линейное или степенное преобразование шкалы яркости. Если диапазон яркости изображения меньше, чем максимально возможный  $z_m$ , то увеличение контрастности можно получить линейным растяжением шкалы яркости [1]

$$z' = \frac{z - z_{\min}}{C_{i oi}},$$

где  $z$ ,  $z'$  — яркость пикселя до и после преобразования. В результате гистограмма яркости станет более редкой, а разность яркости соседних фрагментов увеличится.

Если диапазон яркости изображения уже максимален, то увеличения различимости соседних фрагментов можно добиться за счет нелинейного преобразования шкалы яркости методом гамма-коррекции или соляризации. Гамма-коррекция [2], или степенное преобразование шкалы яркости:

$$z' = z_m k^n, \quad (2)$$

где  $k = \frac{z}{z_m}$  — относительная яркость, позволяет увеличить контрастность в локальном диапазоне

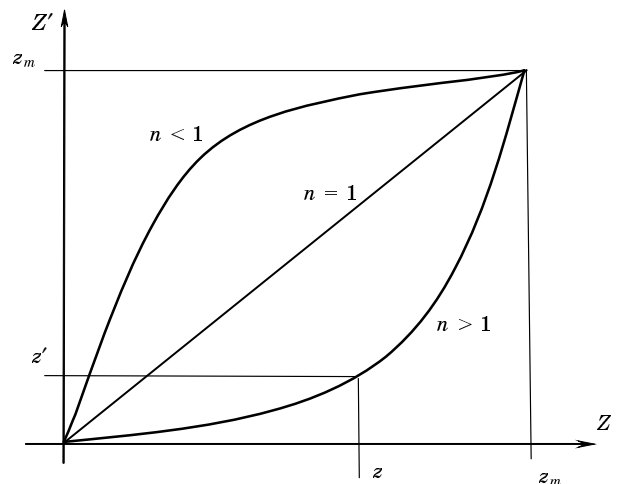
яркостей за счет снижения контрастности в других диапазонах (рис. 1). Если известно, что плохо различимые фрагменты имеют высокую яркость, то следует выбрать значение  $n$  для (2) из диапазона  $\{2 \dots 10\}$ , в противном случае диапазон выбора для значения  $n$  —  $\{0,1 \dots 0,5\}$ .

Метод соляризации [3]

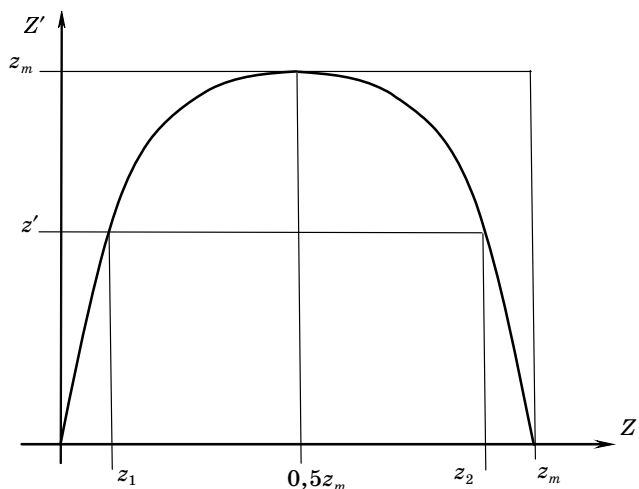
$$z' = 4 \frac{z}{z_m} (z_m - z)$$

позволяет еще больше увеличить различимость соседних фрагментов за счет слияния яркости фрагментов, симметрично расположенных на шкале яркости относительно ее середины (рис. 2), причем снижается различимость фрагментов, имеющих яркость, близкую к средней.

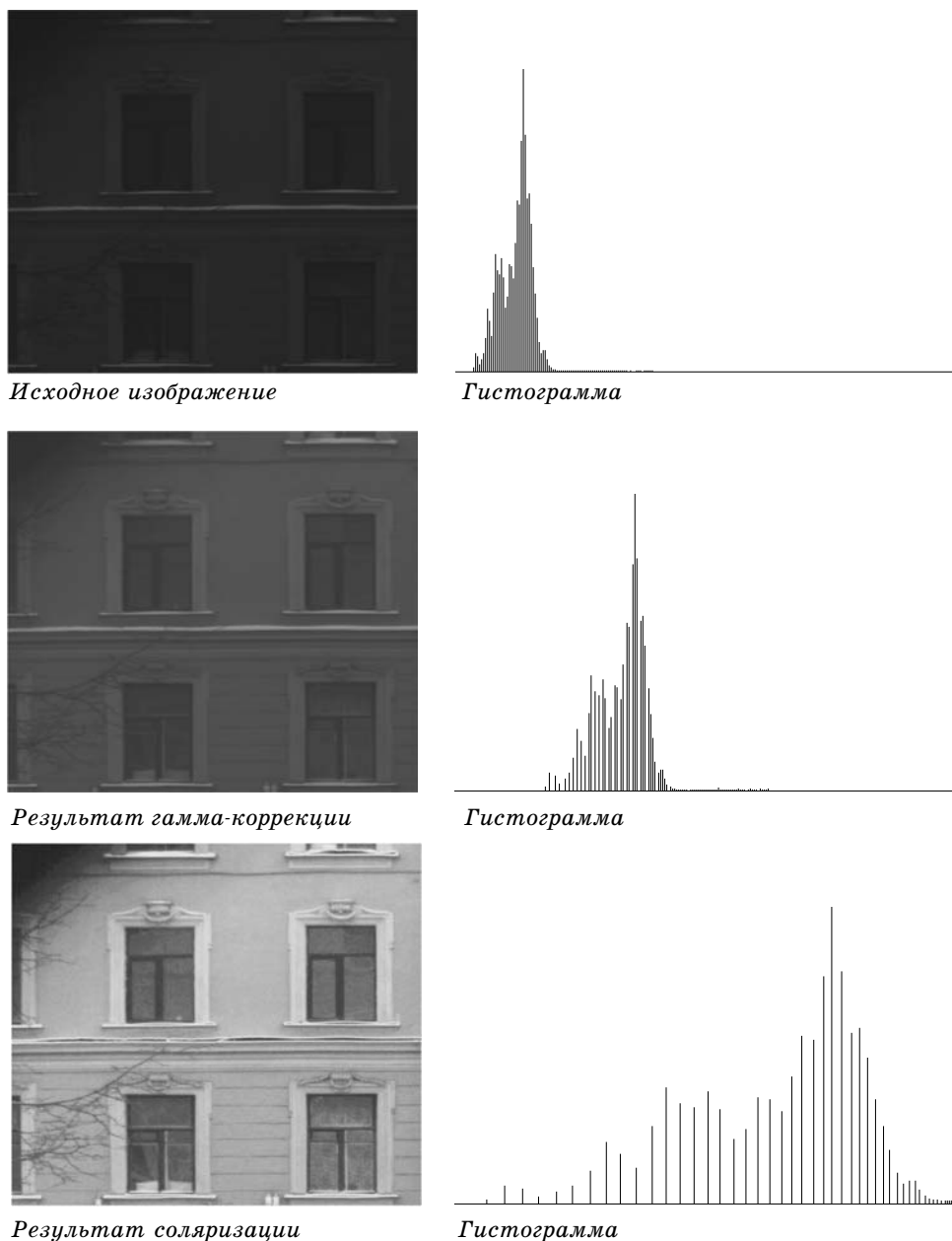
Примеры повышения контрастности приведены на рис. 3. Особенность исходного изображения заключается в том, что при общей недостаточной освещенности имеется несколько мелких фрагмен-



■ Рис. 1. Гамма-коррекция шкалы яркости



■ Рис. 2. Соляризация шкалы яркости



■ Рис. 3. Нелинейное преобразование шкалы яркости

тов максимальной яркости (снег на карнизах и подоконниках). Применение гамма-коррекции позволяет лучше увидеть ветки дерева в левом верхнем углу, а после соляризации можно рассмотреть и структуру занавесок на окнах. Приведенные гистограммы яркости обработанных изображений оказываются прореженными по сравнению с гистограммой исходного изображения.

Методы повышения контрастности являются достаточно эффективными, так как в большинстве не требуют настройки параметров и очень быстро выполняются. Последнее обстоятельство объясняется тем, что сравнительно сложному преобразо-

ванию подвергается только шкала яркости, а яркость каждого пикселя обработанного изображения зависит от яркости только одного пикселя исходного изображения.

В отличие от глобальных методов повышения контрастности ее адаптивное повышение требует установки ряда параметров и значительно больше времени на обработку.

Визуального эффекта повышения контрастности при расфокусировке крупных фрагментов можно добиться путем подчеркивания контура, например, широко известным методом с использованием лапласиана [1]. В данном методе яркость теку-



щего пикселя обработанного изображения определяется как разность яркости соответствующего пикселя исходного изображения и второй производной яркости данного пикселя в некоторой окрестности с учетом знака. В результате яркость пикселя, находящегося в начале области перепада от меньшей яркости к большей, уменьшается, а яркость пикселя в конце этой области увеличивается. В итоге увеличивается контрастность контурной линии и визуально усиливается резкость изображения (рис. 4). Основным недостатком этого метода является отсутствие избирательности, т. е. степень повышения резкости постоянна для всего изображения и не зависит от контрастности соседних фрагментов.

Хорошие результаты дает адаптивное увеличение контрастности на основе локального контраста окрестности, который вычисляется [4] как

$$C_z = \frac{|z - z_c|}{z + z_c},$$

где  $z_c$  — средняя яркость некоторой окрестности пикселя яркостью  $z$ . Нелинейное усиление локального контраста задается как  $C_z^* = f(C_z)$ , где  $f(C_z)$  — нелинейная, монотонная функция, которая удовлетворяет условиям  $f(C_z) > C_z$ ,  $C_z = 0 \dots 1$ ,  $f(C_z) = 0 \dots 1$ . В качестве функции  $f$  можно выбрать степенную функцию

$$C_z^* = C_z^n, \quad (3)$$

где  $n = 0, 1 \dots 1, 0$ . График такой функции совпадает с представленным на рис. 1 графиком гамма-коррекции для  $n < 1$ . Результирующая яркость центрального пикселя окрестности вычисляется по следующим соотношениям:

$$z' = \begin{cases} z_c \frac{1 - C_z^*}{1 + C_z^*} & \text{при } z < z_c \\ z_c \frac{1 + C_z^*}{1 - C_z^*} & \text{при } z > z_c \end{cases}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при  $n = 1$   $C_z^* = C_z$  и соответственно  $z' = z$ . Чем меньше  $n$ , тем больше  $C_z^*$  относительно  $C_z$ , а два варианта вычисления  $z'$  в зависимости от соотношения  $z$  и  $z_c$  позволяют увеличить контрастность граничных пикселей соседних фрагментов с близкой яркостью, практически не изменяя яркости пикселей хорошо различимых фрагментов.

В (3) значение  $n$  остается постоянным при любых значениях локальных контрастов, что приводит к нежелательному увеличению контрастности шумовой составляющей изображения. Избавиться от этого недостатка можно, выбирая для каждого пикселя значения  $n$  в зависимости от характеристик локальной окрестности, т. е. используя адаптивную степень усиления локального контраста  $n_z$ . Например, можно вычислять  $n_z$  как [5]

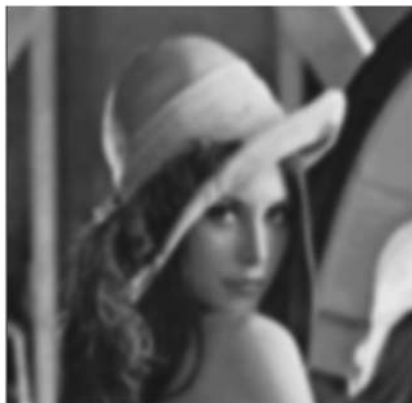
$$n_z = n_{\min} + (n_{\max} - n_{\min}) * k_n^s, \quad (5)$$

где  $n_{\min}$ ,  $n_{\max}$  — минимальное и максимальное значения степени  $n$  соответственно ( $n_{\min} = 0, 1 \dots 0, 3$ ;  $n_{\max} = 0, 7 \dots 0, 9$ );  $k_n$  — коэффициент адаптации ( $k_n = 0 \dots 1$ );  $s$  — постоянный степенной коэффициент ( $s > 1$ ). Согласно (3), максимальное усиление локального контраста достигается при  $k_n = 0$ , т. е. при  $n = n_{\min}$ , а минимальное — при  $k_n = 1$ , т. е. при  $n = n_{\max}$ .

В качестве характеристик локальной окрестности пикселя предлагается использовать протяженность гистограммы  $H_z$ , энтропию  $\epsilon_z$  или среднеквадратичное отклонение яркости  $\sigma_z$  [5]. Следует отметить, что размеры окрестности для вычисления этих характеристик могут существенно превышать размеры окрестности для вычисления локальной контрастности. Рекомендуемый в работе [5] размер составляет от 15 до 29 пикселей.

Протяженность гистограммы локальной окрестности определяется [5] как

$$H_z = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{H_{\max}}, \quad (6)$$



Исходное изображение



Результат обработки

■ Рис. 4. Увеличение резкости лапласианом

где  $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$  — минимальное и максимальное значения яркости в окрестности соответственно;  $H_{\max}$  — максимальное значение гистограммы яркости окрестности. В данном случае под гистограммой яркости окрестности понимается функция  $H(L)$ , т. е. число пикселей в окрестности, имеющих яркость  $L$ .

Из (6) следует, что фрагменты с постоянной яркостью имеют  $H_z = 0$ , так как на них  $L_{\min} = L_{\max}$ . Фрагменты с равномерной гистограммой и максимально возможным диапазоном яркости имеют  $H_z = 255$  при условии, что число пикселей окрестности  $N > 255$  (размер окрестности  $16 \times 16$  пикселей и более), так как на них, ориентировочно,  $L_{\min} = 0$ ,  $L_{\max} = 255$ ,  $H_{\max} = 1$ . У фрагментов с бимодальной гистограммой  $H_z$  зависит от диапазона яркостей и соотношения числа пикселей в окрестности минимальной и максимальной яркости. При

условии равенства этих чисел  $H_z = \frac{2\Delta}{N}$ , где  $\Delta$  — диапазон яркости. Желательно определить  $k_n$  так, чтобы  $k_n = 1$  при  $H_z = 0$ ;  $k_n \rightarrow 0$  при  $H_z \rightarrow a$  и  $k_n \rightarrow 1$  при  $H_z \rightarrow 1$  и более. Данному условию отвечает уравнение

$$k_n = 1 - \exp \left[ - \frac{(H_z - a)^2}{2 \cdot 0,14^2} \right].$$

Известно [5], что хорошие результаты можно получить при  $a = 0,5$ .

Энтропия окрестности пикселя [5]

$$\varepsilon_z = - \frac{\sum_{i=1, N} P_i \log_2(P_i)}{\log_2(N)}, \quad (7)$$

где  $P_i = \frac{H(L_i)}{N}$ ,  $H(L_i)$  — значение гистограммы яркости окрестности при  $L = L_i$ ,  $i$  — номер пикселя из окрестности  $z$  ( $i = 1 \dots N$ ). Из (7) следует, что энтропия приобретает минимальное значение на однородных фрагментах, а максимальное — на фрагментах с элементами, значения яркостей которых находятся на противоположных краях диапазона. В таком случае можно задать  $k_n$  следующим образом:

$$k_n = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}, \quad (8)$$



Адаптивное увеличение локального контраста

Адаптивное изменение степени усиления локального контраста

Рис. 5. Адаптивное увеличение контрастности

где  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение энтропии окрестностей по всему изображению.

Среднеквадратичное отклонение яркости локальной окрестности

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1, N} (z_i - z_c)^2}, \quad (9)$$

где  $z_i$  — яркость пикселя из заданной окрестности;  $z_c$  — средняя яркость окрестности;  $N$  — число пикселей в окрестности.

Согласно (9), среднеквадратичное отклонение ведет себя аналогично предыдущей характеристике локальной окрестности, следовательно, для вычисления  $k_n$  вполне можно использовать формулу (8), заменив  $\varepsilon$  на соответствующие  $\sigma$ .

На рис. 5 приведен пример обработки изображения с мелкими, плохо различимыми деталями различными адаптивными методами повышения контрастности. В результате обработки оказалась проработана структура волн на поверхности моря и подчеркнуты контуры мелких объектов.

Следует отметить, что приведенный выше подход к определению  $k_n$  для (5) сравнительно мало известен и еще не достаточно изучен. Для исследования возможностей адаптивного увеличения контрастности был создан программный продукт в виде Windows-приложения, реализующий описанные выше методы. Продукт позволяет подбирать параметры и наглядно сравнивать результаты об-

работки растровых монохромных изображений с плохо различимыми фрагментами разными методами. Представленные на рис. 3–5 изображения получены с помощью данной программы.

### Заключение

Исследования показали, что подбор методов повышения контрастности изображения следует начинать с глобальных, как наиболее быстрых и не требующих настройки многочисленных параметров. Применение методов адаптивного повышения контрастности позволяет повысить различимость мелких малоконтрастных деталей, но требует проведения ряда предварительных экспериментов для точного подбора параметров.

### Литература

1. Красильников Н. Н. Цифровая обработка изображений. М.: Вузовская книга, 2001. 320 с.
2. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
3. Грузман И. С. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах / НГТУ. Новосибирск, 2000. 156 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Журавель И. М. Краткий курс теории обработки изображений. <http://matlab.exponenta.ru>



УДК 681.314+681.51.011

# СТОХАСТИЧЕСКИЙ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ И ЕГО СВЯЗЬ С НЕЙРОННЫМИ СТРУКТУРАМИ

**Э. П. Тихонов,**

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

*Предложена структура стохастического пространственного аналого-цифрового преобразователя и исследован алгоритм его функционирования. В результате исследования усредняющих свойств алгоритма установлена связь между принципом функционирования искусственного нейрона и стохастическим пространственным аналого-цифровым преобразователем.*

*In this work we propose a structure of a stochastic spatial analog-to-digital converter and study the algorithm of its functioning. The investigation of the averaging properties of the algorithm leads to a relation between the principle of functioning of the artificial neuron and the stochastic spatial analog-to-digital changer.*

В последние годы значительно возрос интерес к искусственным нейронам и нейронным сетям, которые успешно применяются в самых различных областях, включая медицину, технику, физику, геологию, экономику [1, 2]. Нейронные сети вошли в практику там, где решаются задачи прогнозирования, классификации или управления и в отличие от цифровой электронной техники дают возможность вводить информацию из окружающей среды непосредственно в аналоговом виде без промежуточного аналого-цифрового преобразования. В то же время, следствием бурного развития цифровой вычислительной техники, особенно микропроцессоров, для решения задач в различных областях применения является дальнейшее совершенствование и создание новых типов аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Несмотря на кажущуюся простоту схемы искусственных нейронов за счет применения аналоговой электронной техники, введение контура обучения или самообучения, а также стремление к повышению адаптационных и динамических свойств искусственных нейронов приводит к необходимости широкого использования цифровой электроники при разработке и создании современных схем искусственных нейронов. Это отражает общую тенденцию, наблюдаемую в современной электронике, по повсеместному вытеснению там, где это возможно, цифровой электроникой аналоговых схем и структур. Принципиально «связка» АЦП и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) с микропроцессорами способна воспроизведе-

сти любую искусственную нейронную сеть. Однако по стоимостным и энергетическим показателям такая сеть будет проигрывать специализированной аналоговой или гибридной нейронной сети. В связи с этим возникает вопрос о создании таких аналого-цифровых искусственных нейронов, в которых наиболее рационально осуществлялась бы как функционально, так и схемотехнически гибридная обработка аналоговых входных сигналов на базе микропроцессоров без применения специализированных схем АЦП.

Как показано в настоящей работе, создание подобных аналого-цифровых искусственных нейронов возможно на базе так называемых стохастических АЦП (САЦП), которые достаточно подробно исследованы [3]. В этой работе проведен анализ возможностей САЦП, в основе которого положен алгоритм, использующий принцип уравнивания входного сигнала случайно изменяющейся уравнивающей физической величиной. Этот алгоритм представлен как стохастический алгоритм аналого-цифрового преобразования, или просто стохастический алгоритм. Анализ стохастического алгоритма САЦП установил его преимущества и недостатки. Однако представляется, что самым главным преимуществом, не указанным в статье [3], является его простая трансформация в алгоритм, в соответствии с которым может функционировать так называемый стохастический пространственный АЦП (СПАЦП). Для того чтобы понять суть такой трансформации, напомним, что в САЦП уравнивание аналоговой величины,

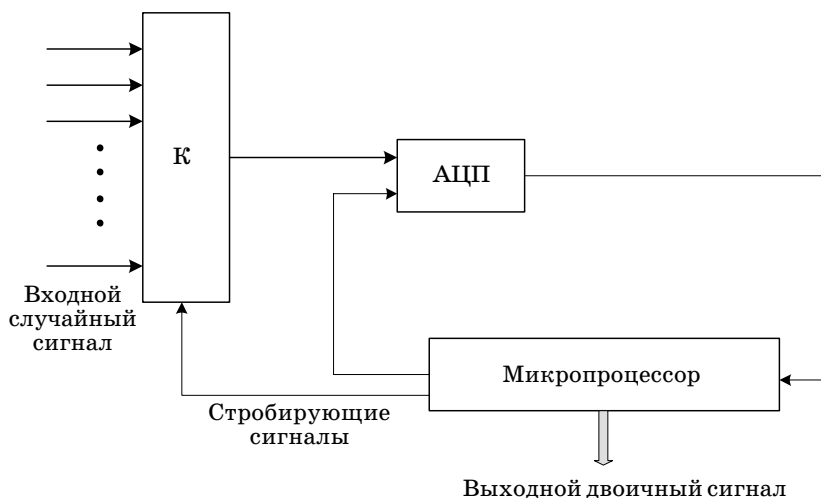
преобразуемой в цифровой двоичный код, выполняется случайно изменяющейся уравнивающей физической величиной с равномерным законом распределения вероятностей. Результаты сравнения аналоговой величины со случайно изменяющейся уравнивающей физической величиной, получаемой в виде двоичной последовательности, суммируются в двоичном счетчике. Результат суммирования в виде двоичного кода эквивалентен среднему значению входного аналогового сигнала, который за время преобразования может либо оставаться постоянным, либо изменяться по любому закону, в том числе — случайно.

Для того чтобы выявить исходные требования, на основании которых можно было бы сформировать конфигурацию СПАЦП и представить алгоритм его функционирования, рассмотрим следующую задачу. Предположим, что существует некоторое поле (некоторая поверхность  $S_0$ ), соответствующая характеристика или параметр которого в разных точках с координатами  $(x_i, y_i) \in S_0$  ( $i = 1, 2, \dots, 2^N, N > 1$ ) принимает разные значения  $\xi(x, y)$ , рассматриваемые в совокупности как случайные числа. К таким поверхностям можно отнести, например, профиль крыла самолета, или продольное сечение какой-либо плотины, поверхность земной коры или океана, или, наконец, определенную часть тела человека. Измеряемые физические и иные параметры или характеристики в разных точках поверхности (электрическое напряжение или ток, геометрическое отклонение, оптическая или иная плотность вещества, электрический потенциал и т. д.) могут быть также разными, но все они с помощью специальных датчиков преобразуются в электрический сигнал. Для названных параметров или характеристик требуется измерить среднее значение на некотором контролируемом

участке поля или поверхности  $S_0$  и представить результат измерения в цифровом коде.

В классическом случае для решения данной задачи может использоваться система, состоящая из коммутатора  $K$ , одного или группы (в зависимости от числа датчиков) обычных АЦП, микропроцессора или компьютера (рис. 1). В соответствии с выбранным алгоритмом и программой в памяти микропроцессора или компьютера накапливаются результаты преобразования в цифровой код выходных сигналов датчиков с последующим вычислением среднего значения по множеству задействованных датчиков. Допускается использовать любые алгоритмы усреднения, в том числе итерационные алгоритмы или алгоритмы прямого усреднения. Однако при любом используемом алгоритме в каждой контролируемой точке осуществляется аналого-цифровое преобразование искомой аналоговой величины с затратой соответствующего временного и энергетического ресурса системы, суммарная величина которого зависит от числа датчиков, т. е. от пространственного «шага» между датчиками и площади исследуемой поверхности. Обычно ситуация усложняется еще и тем, что с целью повышения надежности вводится избыточное число специальных датчиков, тогда коэффициент избыточности приводит к еще большему увеличению затрат временного и энергетического ресурса.

Возникает вопрос, можно ли построить такую систему, упомянутые ресурсы которой имели бы наименьшую чувствительность к количественному изменению числа контролируемых точек поля при получении цифрового эквивалента среднего значения искомой характеристики или параметра исследуемого участка поля. К такой системе можно было бы отнести некоторое устройство, в кото-



■ **Рис. 1.** Структурная схема классической измерительно-вычислительной системы измерения (вычисления) среднего значения сигналов с датчиков, распределенных по контролируемой (исследуемой) поверхности или полю

ром уравнивающая образцовая (опорная) физическая величина по определенному алгоритму без промежуточного аналого-цифрового преобразования в темпе с опросом и коммутацией датчиков компенсирует (уравнивает) случайно изменяющиеся выходные сигналы для получения искомого цифрового эквивалента среднего значения. В этом устройстве, в отличие от САЦП (рис. 2), где специально формируется случайный изменяющаяся уравнивающая опорная физическая величина с равномерным законом распределения [3] для компенсации аналогового входного сигнала, меняются местами функциональные нагрузки для уравнивающей опорной физической величины и входного, в рассматриваемом случае — многомерного, сигнала. Иначе говоря, в данном устройстве СПАЦП реализуется обратная по отношению к САЦП функция: уравнивающая опорная физическая величина в процессе аналого-цифрового преобразования компенсирует случайно изменяющийся входной сигнал. И хотя время преобразования изменяется и растет по-прежнему прямо пропорционально числу датчиков, его рост с увеличением числа датчиков незначителен по сравнению с ростом в классической системе. Действительно, для классической схемы подключение каждого нового датчика приводит к увеличению общего времени преобразования на число временных тактов, затрачиваемых АЦП на преобразование аналоговой величины в  $n$ -разрядный двоичный код, плюс время, затрачиваемое коммутатором на подключение следующего канала. Для СПАЦП суммарное время преобразования увеличивается фактически только на время переключения канала в коммутаторе, поскольку ре-

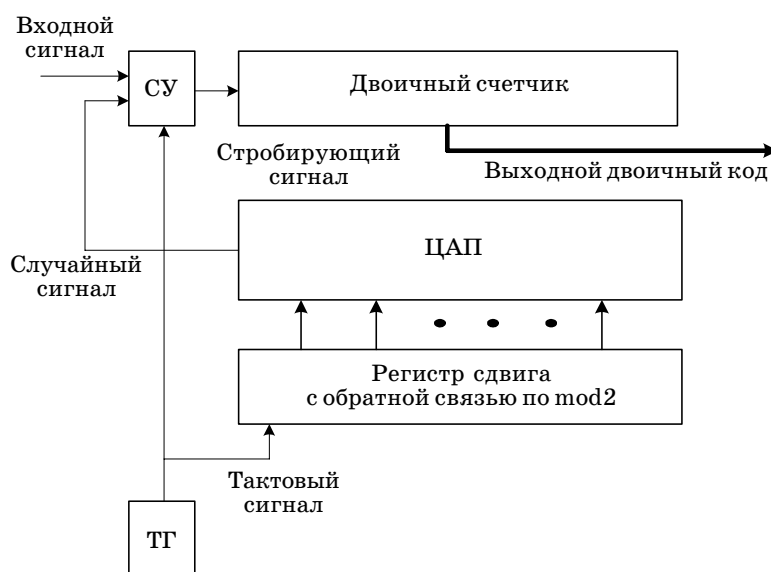
зультат сравнения уравнивающей физической величины и значения выходного сигнала подключаемого датчика устанавливаются уже к концу интервала подключения нового канала. Данное утверждение легко вытекает из сравнительного анализа структурных схем, приведенных на рис. 1–3. Как следует из анализа схем рис. 2 и 3, для каждого подключаемого к первому входу сравнивающего устройства СУ (на рис. 3 через коммутатор  $K$ ) сигнала в течение временного такта устанавливается только факт превышения или невыполнения входным сигналом уравнивающей физической величины, поступающей на второй вход СУ. Но тогда возникает вопрос, почему и когда в результате выполнения серии подобных операций устанавливается искомым цифровой эквивалент среднего значения входного многомерного сигнала?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим предварительно алгоритм аналого-цифрового преобразования со случайно изменяющейся уравнивающей физической величиной или стохастический алгоритм САЦП в аналитическом виде [3]

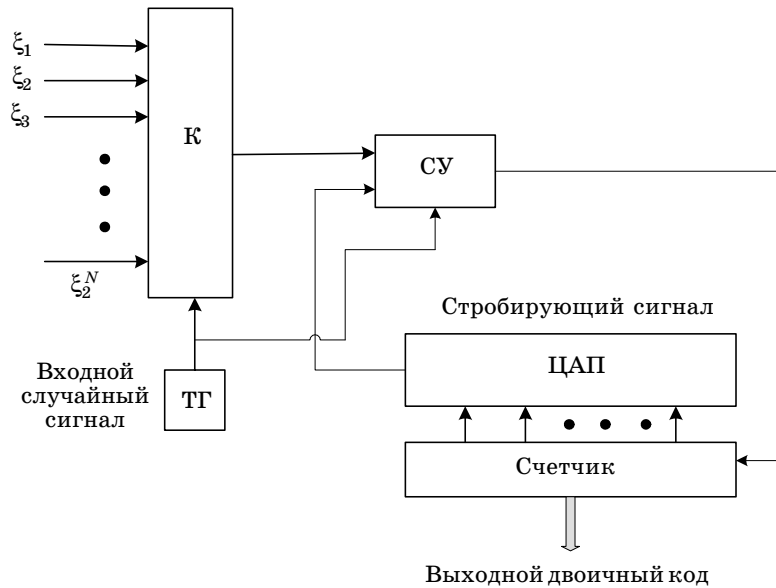
$$K[(n + 1)\Delta t] = K(n\Delta t) + h [y(n\Delta t) - \xi(n\Delta t)],$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, 2^N,$$

где  $K[(n + 1)\Delta t]$  и  $K(n\Delta t)$  — цифровой эквивалент уравнивающей физической величины, определяющий результат преобразования в конце  $n$ -го цикла преобразования;  $N$  — число двоичных разрядов;  $\Delta t = T/2^N$ ;  $T$  — время преобразования, в течение которого осуществляется накопление информации о числе событий невыполнения случай-



■ **Рис. 2.** Структурная схема стохастического АЦП на основе применения генератора  $N$ -последовательности в виде регистра сдвига с обратной связью по mod 2 и ЦАП; СУ — сравнивающее устройство; ТГ — тактовый генератор



■ *Рис. 3. Структурная схема стохастического пространственного АЦП на основе применения генератора N-последовательности в виде регистра сдвига с обратной связью по mod2 и ЦАП*

ной величиной  $\xi(n\Delta t)$  входного сигнала;  $\xi(n\Delta t)$  — случайная величина с равномерным законом распределения в пределах  $0 \leq \xi(n\Delta t) \leq E_0$ , образующая опорный или образцовый случайный сигнал;  $E_0 = \Delta q \cdot 2^N$  — заданный диапазон преобразования, в пределах которого выполняется условие  $0 \leq y(n\Delta t) \leq E_0$ ,  $\Delta q$  — величина кванта, на которую изменяется уравнивающая физическая величина на выходе ЦАП;

$$h[y(n\Delta t) - \xi(n\Delta t)] = \begin{cases} 1 & \text{при } y(n\Delta t) \geq \xi(n\Delta t) \\ 0 & \text{при } y(n\Delta t) < \xi(n\Delta t) \end{cases},$$

функция сравнения входного сигнала  $y(n\Delta t)$  со случайной величиной  $\xi(n\Delta t)$ .

Убедимся, что алгоритм (1) осуществляет функцию аналого-цифрового преобразования постоянного входного сигнала несколько с иных позиций, чем описано в работе [3]. Для этого усредним данный алгоритм справа и слева по случайной величине  $\xi(n\Delta t)$  с учетом того, что случайная величина имеет равномерный закон распределения с плотностью распределения вероятности  $1/E_0$ . В результате получим

$$M_{\xi}\{K[(n+1)\Delta t]\} = M_{\xi}\{K(n\Delta t)\} + M_{\xi}\{h[y(n\Delta t) - \xi(n\Delta t)]\}, \quad (2)$$

где  $M_{\xi}\{\dots\}$  — оператор усреднения по случайной величине  $\xi(n\Delta t)$  при фиксированном временном такте  $n\Delta t$  и  $0 \leq \xi(n\Delta t) \leq E_0$ .

В правой части равенства при фиксированном такте  $n\Delta t$ , в результате усреднения по множеству случайных равномерно распределенных на отрезке  $[0, E_0]$  величин  $\xi(n\Delta t)$ , имеем

$$M_{\xi}\{h[y(n\Delta t) - \xi(n\Delta t)]\} = 1 \cdot P[y(n\Delta t) \geq \xi(n\Delta t)] + 0 \cdot P[y(n\Delta t) < \xi(n\Delta t)] = \frac{1}{E_0} \int_0^{y(n\Delta t)} d\xi(n\Delta t).$$

Пусть для упрощения задачи  $y(n\Delta t) = y_0 = \text{const}$ , тогда

$$M_{\xi}\{h[y(n\Delta t) - \xi(n\Delta t)]\} = \frac{y_0}{E_0}.$$

Подставляя полученное равенство в уравнение (2) и выполняя итерации при условии, что  $M_{\xi}\{K(0)\} = 0$ , получим при  $n = 2^N$

$$M_{\xi}\{K[(2^N + 1)\Delta t]\} = 2^N \cdot y_0/E_0,$$

откуда следует равенство для входного сигнала

$$y_0 = \Delta q M_{\xi}\{K[(2^N + 1)\Delta t]\},$$

т. е. входной сигнал равен среднему значению результатов его преобразования в цифровой код. Погрешность преобразования и другие характеристики данного алгоритма подробно исследованы в работе [3].

Алгоритм СПАЦП в аналитическом виде с учетом вышесказанного представим в виде

$$K[(n+1)\Delta t] = K(n\Delta t) + h[\xi_i(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)], \quad (3)$$

где  $\xi_i(n\Delta t) = \xi(x_i, y_i, n\Delta t)$  — случайная аналоговая величина, поступающая с  $i$ -го канала коммутатора на вход сравнивающего устройства в  $n\Delta t$ -й момент времени и изменяющаяся в пределах  $0 \leq \xi_i(n\Delta t) \leq E_0$ .

$$h[\xi_i(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)] = \begin{cases} 1 & \text{при } \xi_i(n\Delta t) \geq \Delta q K(n\Delta t) \\ 0 & \text{при } \xi_i(n\Delta t) < \Delta q K(n\Delta t) \end{cases},$$

функция сравнения указанных в формуле (3) величин;  $i = 1, 2, \dots, 2^N$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots, 2^N$ ;  $2^N$  — общее число подключаемых к входу коммутатора датчиков.

Из алгоритма (3), в отличие от алгоритма (1), в частности, следует, что данный алгоритм по функциональному виду можно отнести к известному алгоритму аналого-цифрового преобразования считывания (его еще называют методом последовательного счета) или просто алгоритму считывания [3], функционирование которого иллюстрирует рис. 4. Существенным отличием в данном алгоритме является то, что входным сигналом является случайная величина, изменяющаяся при переходе от предыдущего к последующему такту уравнивания, что не допустимо для обычного алгоритма считывания. При этом для осуществления аналого-цифрового преобразования среднего значения пространственно распределенного входного сигнала в соответствии со стохастическим пространственным алгоритмом необходимо равенство общего количества временных тактов  $\Delta t$ , укладываемых в целое  $2^N$  число раз в течение времени аналого-цифрового преобразования  $T_{пр}$ , и общего числа квантов  $\Delta q$ , укладываемых в то же число раз в заданном диапазоне преобразования  $E_0$ . Отметим, что временной такт  $\Delta t$  и квант  $\Delta q$  — это физические величины, которые имеют разные размерности, тем не менее, временной такт  $n$  и пространственный индекс  $i$  совпадают по порядку следования и стремятся к общему пределу  $2^N$  в пределах цикла преобразования. При этом должно выполняться условие, при котором после каждого цикла преобразования временной отсчет, так же как процесс уравнивания, автоматически начинается с нуля.

Дополнительно отметим, что в случае, если сигнал изменяется по уровню как в положительной,

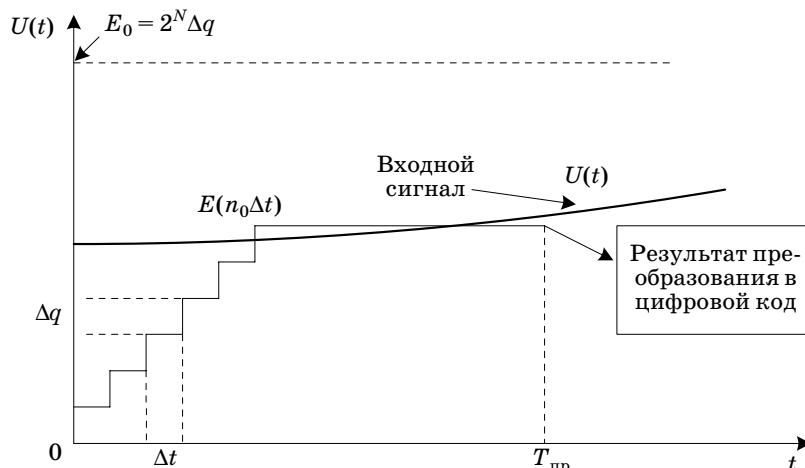
так и в отрицательной области числовой оси (что бывает достаточно редко), то необходимо дополнительно либо изменить диапазон изменения случайной величины, либо осуществить сдвиг в положительную область значения входного сигнала с последующим учетом этого сдвига в результатах преобразования. При этом величина сдвига должна быть постоянна и согласована с допустимым диапазоном изменения входного сигнала  $E_0$ . Обычно сдвиг сигнала в положительную область выбирается равным  $E_0/2$  путем аналогового сложения входного сигнала со значением  $E_0/2$ .

Для доказательства аналого-цифрового преобразования среднего значения пространственно распределенного сигнала в соответствии с алгоритмом (3) проанализируем его сходимость с ростом числа тактов или, что то же самое, числа каналов коммутатора  $N$ . Для этого усредним данный алгоритм справа и слева для соответствующего такта итерации по случайной величине  $\xi_i(n\Delta t)$  с учетом того, что случайная величина  $\xi_i(n\Delta t)$  имеет непрерывную плотность распределения вероятности  $w[\xi_i(n\Delta t)]$ . Данное ограничение по непрерывности не является существенным, так как для разрывной функции нужно для анализа использовать интеграл Стилтгеса. В результате усреднения правой и левой части алгоритма (3) получим при условии  $K(0) = 0$

$$M_{\xi}\{K[(n+1)\Delta t]\} = M_{\xi}\{K(n\Delta t)\} + M_{\xi}\{h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)]\}. \quad (4)$$

В правой части равенства при фиксированном интервале  $n\Delta t$ , в результате усреднения на отрезке  $[0, E_0]$  по множеству случайных величин  $\xi_n(n\Delta t)$ , имеем

$$\begin{aligned} M_{\xi}\{h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)]\} &= \\ &= 1 \cdot P[\xi_n(n\Delta t) \geq \Delta q K(n\Delta t)] + \\ &+ 0 \cdot P[\xi_n(n\Delta t) < \Delta q K(n\Delta t)] \end{aligned} \quad (5)$$



■ Рис. 4. Работа алгоритма аналого-цифрового преобразования считывания

или

$$M_{\xi} \{h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta qK(n\Delta t)]\} = \int_{\Delta qK(n\Delta t)}^{E_0} w[\xi_n(n\Delta t)] d\xi_n(n\Delta t) = P_n \{\Delta qK(n\Delta t)\}.$$

Выполняя итерации после операции усреднения в уравнении (4), что эквивалентно последовательному сложению во времени усредненных по множеству значений функции сравнения  $h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta qK(n\Delta t)]$ , получим

$$M_{\xi} \{K(2^N \Delta t)\} = \sum_{n=0}^{2^N} P_n \{\Delta qK(n\Delta t)\}. \quad (6)$$

Начальное значение  $K(0) = 0$ , поэтому вероятность  $P_n \{\Delta qK(n\Delta t)\}$  изменяется от единицы до нуля.

Представим вероятность  $P_n \{\Delta qK(n\Delta t)\}$  для  $n = 0$ , пользуясь свойством аддитивного представления определенного интеграла, в следующем виде:

$$P_0 \{0\} = \sum_{n=0}^{2^N-1} \int_{\Delta qK(n\Delta t)}^{2^{N-1} \Delta qK[(n+1)\Delta t]} w[\xi_n(n\Delta t)] d\xi_n(n\Delta t).$$

Для любого промежуточного значения  $n = m$  такого, что  $0 < m \leq 2^N - 1$ , получим

$$P_m \{m\Delta t\} = \sum_{n=m}^{2^N-1} \int_{\Delta qK(n\Delta t)}^{2^{N-1} \Delta qK[(n+1)\Delta t]} w[\xi_n(n\Delta t)] d\xi_n(n\Delta t).$$

Тогда равенство (6) можно выразить в виде суммы

$$M_{\xi} \{K(T)\} = \sum_{m=0}^{2^N-1} \sum_{n=m}^{2^N-1} \int_{\Delta qK(n\Delta t)}^{2^{N-1} \Delta qK[(n+1)\Delta t]} w[\xi_n(n\Delta t)] d\xi_n(n\Delta t). \quad (7)$$

Если контролируемые параметры или характеристики поверхности описываются моделью однородного и изотропного случайного поля, то  $w[\xi_0(j\Delta t)] = w[\xi_1(j\Delta t)] = \dots = w_{2^N}[j\Delta t]$  для  $j = 0, 1, \dots, 2^N$ . Поэтому равенство (7) после умножения справа и слева на величину  $\Delta q$  и преобразования внутренней суммы с учетом повторяемости слагаемых представим в виде

$$\Delta q M_{\xi} \{K(T)\} = \sum_{n=0}^{2^N-1} \Delta q(n+1) \int_{\Delta qK(n\Delta t)}^{2^{N-1} \Delta qK[(n+1)\Delta t]} w[\xi_n(n\Delta t)] d\xi_n(n\Delta t). \quad (8)$$

Правая часть полученного равенства представляет собой оператор усреднения проквантованных значений контролируемого параметра или харак-

теристики поверхности, описываемые моделью однородного и случайного изотропного поля  $\xi(x, y)$  (где  $x$  и  $y$  — координаты расположенных на контролируемой поверхности датчиков). Результат усреднения контролируемого параметра или характеристики представляется в цифровом эквиваленте. Таким образом:

$$\Delta q M_{\xi} \{K(T)\} = M_{\xi} \{\xi\}.$$

При достаточно малой величине кванта  $\Delta q$  сумму в равенстве (8) можно приближенно заменить интегралом. В результате замены приходим к предельному равенству

$$\lim_{\Delta q \rightarrow 0} M_{\xi} \{\Delta qK(T)\} = \int_0^{E_0} \xi w(\xi) d\xi.$$

Таким образом, для однородного изотропного поля получаем, что результат аналого-цифрового преобразования стремится к среднему значению по пространству и в пределах времени преобразования.

Для ответа на вопрос об эффективности рассматриваемого алгоритма аналого-цифрового преобразования определим дисперсию и, следовательно, среднеквадратическое значение результатов преобразования.

Для этого возведем правую и левую части алгоритма (3) в квадрат при фиксированном такте итерации  $n$  и усредним полученный результат справа и слева, т. е.

$$M_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\}^2 = M_{\xi} \{K(n\Delta t) + h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta qK(n\Delta t)]\}^2.$$

После возведения в квадрат и усреднения вычтем из правой и левой части полученного равенства квадрат математического ожидания в соответствии с равенством (4), преобразованным в виде

$$\{M_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\}\}^2 = \{M_{\xi} \{K(n\Delta t)\} + P_n \{K(n\Delta t)\}\}^2.$$

В результате дальнейших преобразований, пренебрегая корреляцией при фиксированном  $n$  между  $K(n\Delta t)$  и функцией сравнения  $h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta qK(n\Delta t)]$ , получим для дисперсии следующее итерационное уравнение:

$$D_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\} = D_{\xi} \{K(n\Delta t)\} + P_n \{K(n\Delta t)\} \{1 - P_n \{K(n\Delta t)\}\}, \quad (9)$$

где  $D_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\} = M_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\}^2 - \{M_{\xi} \{K[(n+1)\Delta t]\}\}^2$  и  $M_{\xi} \{K(n\Delta t)\} = M_{\xi} \{K(n\Delta t)\}^2 - \{M_{\xi} \{K(n\Delta t)\}\}^2$  — дисперсии кодового эквивалента уравновешивающей физической величины для  $(n+1)$ - и  $n$ -го тактов усреднения, так как

$$M_{\xi} \{h[\xi_n(n\Delta t) - \Delta qK(n\Delta t)]\}^2 = 1^2 \cdot P[\xi_n(n\Delta t) \geq \Delta qK(n\Delta t)] = P[\xi_n(n\Delta t) \geq \Delta qK(n\Delta t)].$$



Выполняя итерации в уравнении (9) с учетом полученных результатов усреднения и нулевого начального значения, получаем для оценки дисперсии равенство

$$D_{\xi} \{K(2^N \Delta t)\} = \sum_{n=0}^{2^N} P_n \{ \Delta q K(n \Delta t) \} \{ 1 - P_n \{ \Delta q K(n \Delta t) \} \}. \quad (10)$$

Для перехода к установленной размерности дисперсии помножим правую и левую части равенства (10) на величину  $(\Delta q)^2$ . Тогда для упрощения аналитических расчетов при достаточно малом значении кванта заменим сумму интегралом, а квант  $\Delta q$  — дифференциалом, т. е. перейдем к равенству

$$D_{\xi} \{ \Delta q K(2^N \Delta t) \} = \Delta q \int_0^{E_0} F_{\xi}(\zeta) [1 - F_{\xi}(\zeta)] d\zeta,$$

где  $F_{\xi}(\zeta)$  — функция распределения вероятностей случайной величины  $\xi$ .

Предположим для простоты вычисления, что случайная величина  $\xi$  распределена равномерно на отрезке  $[0, E_0]$ . Тогда искомая дисперсия находится из равенства

$$D_{\xi} \{ \Delta q K(2^N \Delta t) \} = \frac{E_0}{2^N} \int_0^{E_0} \frac{\zeta}{E_0} \left[ 1 - \left( \frac{\zeta}{E_0} \right) \right] d\zeta = 2 \frac{E_0^2}{12} = \frac{\sigma_{\xi}^2}{2^{N-1}},$$

где  $\zeta/E_0$  — функция распределения равномерно распределенной случайной величины  $\xi$  на отрезке  $[0, E_0]$ ;  $\sigma_{\xi}^2$  — дисперсия случайной величины контролируемого параметра однородного и изотропного поля.

При обычном классическом усреднении в соответствии со схемой рис. 1 в тех же независимых точках контролируемого однородного и изотропного поля с аналогичным законом распределения вероятностей при том же числе датчиков дисперсия искомого среднего значения без учета погрешности квантования будет в два раза меньше. Однако существенно превалирующий расходуемый энергетический и временной ресурс при одном и том же числе датчиков (см. рис. 1) будет превышать потерю информации при стохастическом пространственном аналого-цифровом преобразовании за счет увеличения дисперсии погрешности в два раза при измерении среднего значения однородного и изотропного поля (см. рис. 3).

Если контролируемое поле однородно, но анизотропно, то результат стохастического пространственного аналого-цифрового преобразования также стремится к его усредненной характеристике.

Проанализируем вариант алгоритма (3) со знаковой функцией сравнения, т. е. в виде

$$K[(n+1)\Delta t] = K(n\Delta t) + \text{sign} [\xi_i(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)], \quad (11)$$

где  $\xi_i(n\Delta t) = \xi(x_i, y_i, n\Delta t)$  — по-прежнему случайная аналоговая величина, поступающая с  $i$ -го канала коммутатора на вход сравнивающего устройства в  $n\Delta t$ -й момент времени и изменяющаяся в пределах  $0 \leq \xi_i(n\Delta t) \leq E_0$ ;

$$\text{sign} [\xi_i(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)] = \begin{cases} 1 & \text{при } \xi_i(n\Delta t) \geq \Delta q K(n\Delta t) \\ -1 & \text{при } \xi_i(n\Delta t) < \Delta q K(n\Delta t) \end{cases},$$

знаковая функция сравнения указанных в формуле величин.

Выполняя усреднения правой и левой части алгоритма (11) в его правой части при фиксированном интервале  $n\Delta t$ , в результате усреднения на отрезке  $[0, E_0]$  по множеству случайных величин  $\xi_n(n\Delta t)$  имеем

$$M_{\xi} \{ \text{sign} [\xi_n(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)] \} = 2P [\xi_n(n\Delta t) \geq \Delta q K(n\Delta t)] - 1$$

и

$$M_{\xi} \{ \text{sign} [\xi_n(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t)] \} = 2P_n \{ \Delta q K(n\Delta t) \} - 1.$$

Используя общий подход, перейдем к равенству для определения искомого математического ожидания случайной входной величины в соответствии с алгоритмом (11)

$$M_{\xi} \{ \xi \} = 1 + 0,5 \Delta q M_{\xi} \{ K(T) \}.$$

Предположим, что вместо указанной индикаторной или знаковой функции сравнения используется некоторая монотонная, непрерывно дифференцируемая так называемая «функция активации» [1]. В этом случае для выполнения аналого-цифрового преобразования входного сигнала необходим алгоритм вида

$$K[(n+1)\Delta t] = K(n\Delta t) + \text{ent} \left[ \frac{\varphi(\xi(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t))}{\Delta q} \right],$$

где  $\text{ent} \left[ \frac{\varphi(\xi(n\Delta t) - \Delta q K(n\Delta t))}{\Delta q} \right]$  — функция взятия

целой части от дроби (результата деления значения функции активации на квант), стоящей в квадратных скобках.

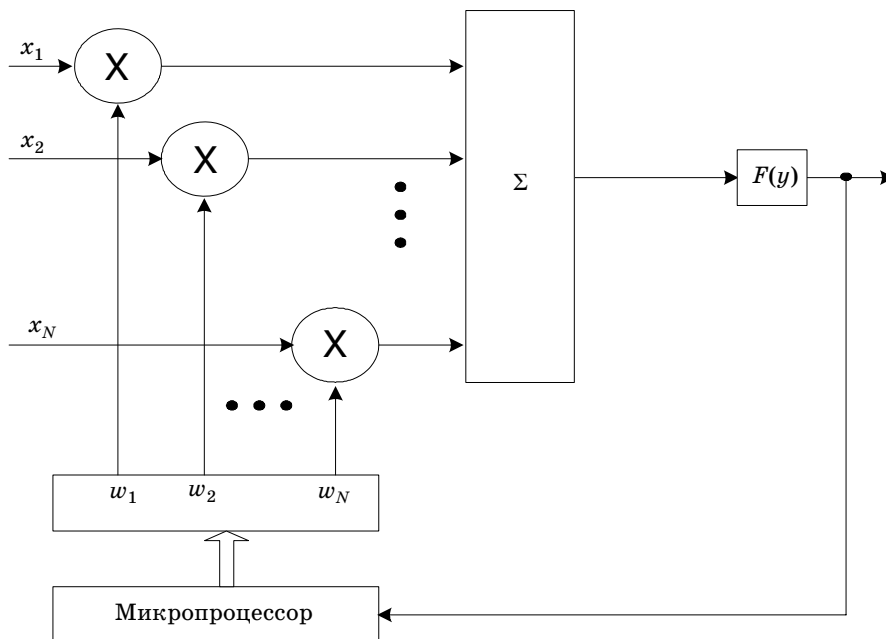
По существу функция взятия целой части математически в идеале реализуется параллельным АЦП выходного сигнала аналогового устройства, реализующего функцию активации общего вида. Исследование свойств данного алгоритма в настоящей работе не проводится.

Анализ структурной схемы и алгоритма СПАЦП выявляет аналогию между структурными схемами и принципом функционирования СПАЦП и так называемым искусственным нейроном, который в настоящее время находится под пристальным вниманием многих исследователей (достаточно заглянуть в Internet). Для того чтобы убедиться в наличии отмеченной выше аналогии, рассмотрим кратко сущность и принцип действия искусственного нейрона.

Нейроны — это некоторый технический элемент, наделенный памятью, в которую тем или иным путем в форме весовых коэффициентов предварительно записывается информация, коррелированная с соответствующей информацией, поступающей на вход этого элемента в период предварительного обучения. Рассмотрим схему нейрона (рис. 5), которая с той или иной степенью подробности (чаще — в сильно упрощенном варианте) обычно приводится почти во всей литературе, посвященной исследованию нейронов. Главная функция искусственного нейрона — формировать выходной сигнал в зависимости от сигналов, поступающих на его входы. В самой распространенной конфигурации входные сигналы обрабатываются так называемым адаптивным сумматором [4], затем выходной сигнал сумматора поступает в нелинейный преобразователь, где преобразуется функцией активации  $F(y)$ , и результат подается на выход (обычно в точку ветвления). Особенность схемы нейрона, представленного на рис. 5, состоит в том, что схема отражает работу нейрона в двух режимах: в режиме обучения и непосредственно в рабочем режиме. В режиме обучения используется

микропроцессор в обратной связи, посредством которого в соответствии с программой оптимизации выходного сигнала нейрона подбираются значения весовых коэффициентов по обучающему образцовому многомерному сигналу  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) так, чтобы на выходе нелинейного элемента  $F(y)$  появлялся бы максимальный сигнал. Тогда, если целью дальнейшей работы нейрона является выделение этого сигнала из фиксированного множества других входных сигналов, то наличие на входе нейрона искомого сигнала будет обнаруживаться по максимальному значению выходной функции нейрона  $F(y)$ . Условие существования такого сигнала вытекает из известного неравенства Коши—Буняковского [5]. С появлением нейронов стали интенсивно развиваться на их базе искусственные нейронные сети (ИНС), благодаря которым исследователи получили в распоряжение достаточно гибкий и надежный инструмент для решения целого ряда трудноразрешимых другими средствами задач [1].

Процесс обучения нейрона и, следовательно, ИНС существенно усложняется, если подобную задачу требуется решить для некоторого множества входных сигналов, так как приходится искать экстремум многомерной функции. Алгоритм предварительного обучения можно было бы существенно упростить, если бы представленная на рис. 5 схема нейрона реализовала дополнительно функцию измерения образцового входного сигнала в режиме обучения отдельно в каждом входном канале. Действительно, предположим, что на многомерный (векторный) вход нейрона в режиме обучения подавался бы образцовый сигнал. Тогда в



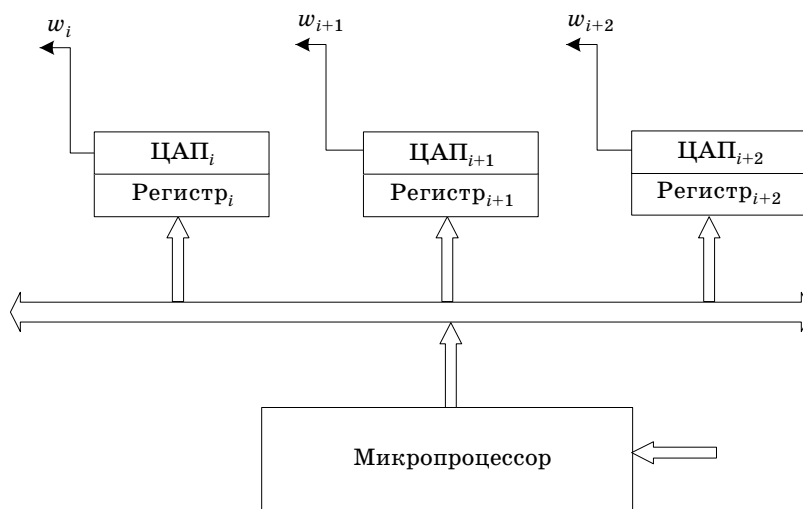
■ Рис. 5. Структурная схема искусственного нейрона с контуром, предоставляющим технические возможности для реализации принципа обучения или самообучения

результате его непосредственного измерения можно было бы приравнять искомые веса  $w_i, i = 1, 2, \dots, n$  нейрона значениям образцового сигнала или некоторой известной функции от него. Далее, в рабочем режиме, при умножении значений установленных весовых коэффициентов в каждом канале и суммировании результатов умножения, на выходе нейрона наибольшего значения сигнал достигал бы при максимальном «сходстве» входного сигнала с ранее предъявленным в режиме обучения образцовым сигналом. Если же в процессе предварительного «обучения» нейрона по некоторому ограниченному множеству образцовых входных сигналов определить соответствующие веса нейрона в каждом канале через средние значения заданного множества образцовых сигналов, то с наибольшей вероятностью максимум выходного сигнала также достигался бы при максимальном «сходстве» входного сигнала с одним из ранее предъявленных образцовых сигналов.

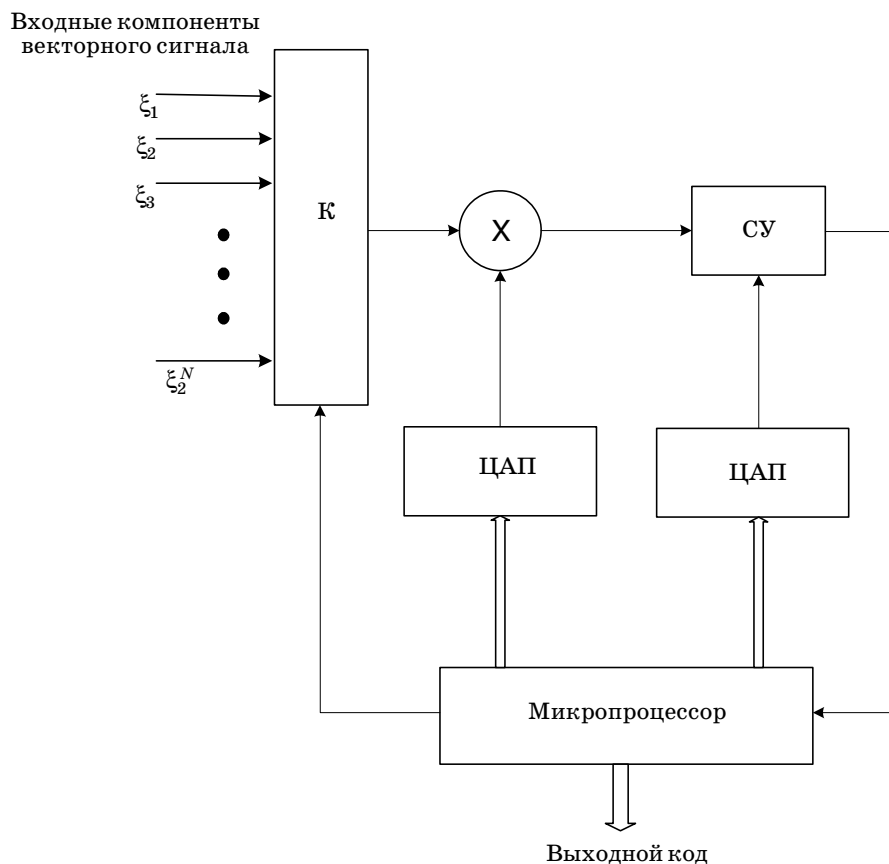
Судя по описанию схем искусственных нейронов (см., например, [1]), складывается такое впечатление, что реализация схемы памяти аналогового значения весовой функции очень проста. Эта простота возможна, если априорно известно значение веса и его можно заложить в схему операционного усилителя с заранее подобранными весовыми сопротивлениями. Но тогда спрашивается, о каком обучении или самообучении искусственного нейрона можно говорить? На самом деле, для схемы, реализующей потенциальные возможности обучения или самообучения, все несколько сложнее. Это видно из соответствующего фрагмента схемы (рис. 6) для реализации функции запоминания значения весовых коэффициентов, возможности их перестройки и представления в аналоговой форме. Поскольку функция обучения про-

граммно и технически реализуется в микропроцессоре, то результаты для установки значений весовых коэффициентов выдаются в цифровой форме. Для согласования форм входного аналогового сигнала и значений весовых коэффициентов с целью выполнения акта умножения требуется операция преобразования сигнала в каждом канале из цифровой формы в аналоговую. Для выполнения этой операции необходимо в каждом канале иметь ЦАП с соответствующим подключением их цифровых входов через регистры памяти к выходной магистрали микропроцессора.

Можно видоизменить общую архитектуру искусственного нейрона за счет его трансформации в параллельно-последовательную структуру посредством использования коммутатора, т. е. параллельные операции над сигналами, поступающими по множеству входных каналов, осуществлять в соответствии с «косым временным сечением» последовательно во времени в одноканальном варианте. Однако в этом случае существенно возрастет время работы нейрона из-за необходимости сохранения и реализации многоразрядного, т. е. многотактного, в каждом канале потока цифровой информации в последовательной одноканальной цифровой структуре. Чтобы исключить указанный недостаток в параллельно-последовательной структуре нейрона и свести к минимуму потерю временного ресурса, целесообразно совместить по времени выполнение ряда основных операций, а именно основную операцию суммирования с запоминанием (накоплением информации), с функцией аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования в едином блоке, составляющем основу общей схемы искусственного нейрона. В этом случае применение косого временного сечения не приводит к значительному увеличению времени об-



■ Рис. 6. Структурная схема, иллюстрирующая технические возможности для реализации принципа цифровой подстройки, запоминания и преобразования в аналоговую форму значений весовых функций в искусственном нейроне



■ Рис. 7. Структурная схема искусственного нейрона, реализующего стохастический пространственный алгоритм аналого-цифрового преобразования

работки векторного входного сигнала, так как в каждом канале достаточно получать информацию только по одному временному такту.

Реализацию подобного решения можно осуществить в соответствии со схемой СПАЦП (см. рис. 3), которая после незначительной модификации преобразуется в схему, представленную на рис. 7. Модификация схемы СПАЦП заключается в дополнительном введении на первый вход схемы сравнения цифроаналоговой обратной связи, состоящей из микропроцессора и ЦАП, в которой по результатам предварительного обучения схемы разделяемо для каждого входного канала устанавливается и запоминается в цифровом виде значение весового коэффициента в запоминающем устройстве микропроцессора. При последовательном переключении каналов коммутатором по сигналу синхронизации, поступающему с микропроцессора, входной сигнал каждого канала перемножается в аналоговом умножителе с преобразованным посредством ЦАП в аналоговую форму соответствующим для данного канала цифровым значением весового коэффициента. Результат умножения в этом же временном такте синхронизации, т. е. параллельно во времени, сравнивается в схеме сравнения, например в соответствии с алгорит-

мом (3), с накопленными в микропроцессоре предыдущими результатами итерационной обработки векторного (многомерного) входного сигнала.

Нетрудно установить, что для схемы, приведенной на рис. 7, сохраняется функция аналого-цифрового преобразования СПАЦП для среднего значения по всем входным сигналам, т. е. без учета какой-либо иной ранее полученной информации, если значения весовых коэффициентов по всем каналам устанавливаются равными единице. Умножение на единичный вектор соответствует тождественному представлению векторного входного сигнала на выходе умножителя.

Таким образом, представленная и исследованная в статье схема аналого-цифрового искусственного нейрона, несмотря на то, что функционально выполняет операцию накопления информации по  $n$  входным сигналам последовательно во времени, фактически эквивалентна по затратам временного ресурса параллельной обработке информации в соответствии с известной схемой (см. рис. 5). Действительно, в данной схеме при суммировании в аналоговой форме многомерного аналогового сигнала на операционном усилителе результат суммирования за счет переходных процессов в реактивных элементах схемы появляется с существенной задержкой

относительно поступления многомерного входного сигнала. Чем больше входных каналов, тем больше подключается к входу суммирующего операционного усилителя «развязывающих» сопротивлений, тем выше суммарная входная паразитная емкость. При этом динамический диапазон аналогового сумматора из-за ограниченности линейного участка передаточной характеристики операционного усилителя существенно ниже соответствующего диапазона цифроаналогового сумматора, реализуемого в схеме (см. рис. 7) на микропроцессоре и ЦАП. Проведенный сравнительный анализ показывает перспективность применения предложенного принципа построения аналого-цифровых структур для решения широкого круга технических задач.

### Литература

1. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю., Антонов В. Н. Нейросетевые системы управления. СПб.: СПбГУ, 1999. 265 с.
2. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М.: Наука, 1995. 336 с.
3. Иванов В. Н., Тихонов Э. П. Стохастический алгоритм аналого-цифрового преобразования // Вестник Метрологической академии. СПб., 2006. Вып. 17. С. 12–35.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
5. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: Наука, 1978. 574 с.

УДК 681.327.8

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ (Часть 2)

**В. Д. Нестеренко,**

канд. техн. наук, начальник отдела новых технологий  
ОАО «Северо-Западный Телеком»

*Предложена архитектура инфокоммуникационной сети как объекта управления, основанная на модели мультисреды, охватывающей среды взаимодействия, генерации, распространения инфокоммуникационных сетей и позволяющая провести структуризацию моделей и алгоритмов их адаптивного управления.*

*The paper proposes an architecture for the infocommunication network as an object of control which is based on a model of composed media including the media of interaction, generation and interaction of infocommunication systems that allows the structuring of both the models and the algorithms of their adaptive control.*

Информационно-вычислительную среду ЦОУ, т. е. **PRO(N)**-среду, представим в виде чередующихся слоев двух типов: слои первого типа являются децентрализованными структурами из однотипных элементов, которые будем называть *A*-схемами (от англ. abstract node — абстрактный узел); слои второго типа являются коммутационными системами. Понятие «абстрактный узел» было впервые предложено для формального описания протоколов в сетях передачи данных и вычислительных сетях в рамках концепции, названной «теорией разговоров». Эта концепция была затем использована для реализации протоколов по Рекомендации МККТТ X.25 на сетевом и канальном уровнях. В исходном виде «теория разговоров» характеризуется прежде всего тем, что она строится на формулировке связей и правил обмена между соседними узлами сети. При этом более сложные структуры создаются путем последовательного наращивания, т. е. на одном уровне. Но подобного рода структуры трудно реализуются при наличии нескольких одновременных «разговоров» из-за ограничений по производительности современных средств вычислительной техники. Поэтому для реализации ЦОУ с необходимой для ИКС достаточно высокой производительностью эта концепция в исходной форме представляется неприемлемой.

Основной структурный элемент первого слоя **PRO(N)**-среды, т. е. *A*-схема, обладает по сравне-

нию с абстрактными узлами «теории разговоров» рядом преимуществ, среди которых можно выделить следующие: структурную и логическую законченность, формально-логическое описание процессов обработки информации и функционирования его составляющих блоков, возможность организации внутреннего процесса вычисления и обработки информации по принципу MIMD (Multiple Instruction Stream, Multiple Data Stream), асинхронизм по отношению ко входам и выходам, единую структуру входящих и выходящих информационных единиц, возможность создания на основе *A*-схем однородных (в плоскости, т. е. в рамках одного уровня) и регулярных вычислительных сред.

Абстрактный узел сети, представляемый в виде *A*-схемы, включает в себя буфера, входной и выходной блоки, процессор.

Буфера *t*, *τ*, *η* и *c* обеспечивают асинхронизм входов и выходов; если входные команды *η* и внутренние состояния закодированы в двоичной форме, то *η*-буфер может рассматриваться как часть буфера состояний, содержащий переменные внутреннего состояния процессорного блока.

Входной блок принимает входное сообщение *μ*, проверяет его, делит его на две составляющие (текст и заголовок) и направляет текст, если он имеется, к *t*-буферу, а заголовок — к процессору; заголовок может быть закодирован каким-то образом во входном блоке.



Выходной блок получает выходной заголовок из процессора, берет, если необходимо, из  $\tau$ -буфера текст, вырабатывает выходное сообщение и отправляет его к выходу  $m$ .

Процессор получает заголовок из входного блока и вырабатывает заголовки для выходных сообщений в зависимости от входного заголовка и собственного внутреннего состояния, а также от состояния выходных команд; в наиболее простом случае — это конечный автомат с двумя входами и двумя выходами.

Когда на вход  $A$ -схемы поступает сообщение  $\mu$ , процессор срабатывает и вырабатывает новое внутреннее состояние, сообщение к выходу  $m$  и команду к выходу  $c$ . В некоторых случаях выходные сообщения могут и не вырабатываться. Если входное сообщение содержит текст, он переправляется к выходу  $t$ ; если выходное сообщение содержит текст, он берется из входа  $\tau$ .

Процессор  $A$ -схемы состоит из трех частей:

1) входного процессора, который обрабатывает параметры входящих заголовков и команд и выдает заголовки  $\mu_c$  команды  $\eta_c$  ЦОУ;

2) ЦОУ, которое вырабатывает выходной код операции (КОП) для  $\mu_c$  и  $\eta_c$ , прибывающих из входного процессора;

3) выходного процессора, который добавляет параметры к КОП, прибывающих из ЦОУ.

Словарем входа  $D_i$  называется список всех входящих заголовков, а словарем выхода  $D_0$  — список заголовков, которые может выработать  $A$ -схема.

Разговором между двумя  $A$ -схемами называется осуществление связи между ними таким образом, чтобы выходные сообщения из одной являлись входными для другой и наоборот.

Разговор состоит из сеансов — конечных периодов времени, за которые связанные между собой  $A$ -схемы обмениваются сообщениями. Процедурой называется множество правил, по которым  $A$ -схема производит выходные сообщения в разговоре в зависимости от входной команды, входного сообщения и внутреннего состояния. Протокол между  $A$ -схемами определяется как множество процедур разговора между ними.

Формальное описание функционирования  $A$ -схемы можно провести с помощью логических матриц. Определим внутреннее состояние процессора с помощью двух множеств переменных состояния.

Предложенная модель позволяет реализовать ЦОУ как конечный автомат; для входного и выходного процессоров представление в виде конечного автомата затруднительно из-за проблемы размерности. Рассмотрим работу ЦОУ.

При получении команды  $\eta_c$  ЦОУ вырабатывает:

а) КОП выходного сообщения  $m' = \|Q(\sigma, s, z)\| \eta_c$ ;

б) КОП выходной команды  $c' = \|H(\sigma, s, z)\| \eta_c$ ;

в) переход состояния  $\sigma = h(\sigma, s, z, h_c, o_\mu)$ ;

г) текст  $t = f_1(\sigma, s, z, \eta_c) \mu$ .

При получении заголовка  $\mu_c$  ЦОУ вырабатывает:

а) КОП выходного сообщения  $m' = \|P(\sigma, s, z)\| \eta_c$ ;

б) КОП выходной команды  $c' = \|G(\sigma, s, z)\| \mu_c$ ;

в) переход состояния  $\sigma = h(\sigma, s, z, o_\eta, \mu_c)$ ,  $s = g(\sigma, s, z, \mu_c)$ ;

г) текст  $t = f_2(\sigma, s, z, \mu_c) \mu$ ,

где  $\|Q\|$ ,  $\|H\|$ ,  $\|P\|$  и  $\|G\|$  — матрицы логических функций;  $h$  и  $g$  — векторы логических функций;  $f_1$  и  $f_2$  — логические функции;  $m'$ ,  $\mu_c$ ,  $\eta_c$  и  $c'$  — векторы, имеющие только один элемент, отличный от нуля;  $o_\mu$  и  $o_\eta$  — нулевые векторы подходящей размерности.

При соблюдении сформулированных правил соединения можно компоновать любые структуры, отвечающие требованиям ЭМВОС. Границы между открытыми системами являются логическими границами, т. е. им не ставятся в соответствие реальные устройства или другие объекты. Границы между отдельными слоями являются реальными коммутационными устройствами, которые формально изображаются в виде слоев второго типа.

Под протоколом в дальнейшем в терминах  $A$ -схем будем понимать правила обмена между  $A$ -схемами одного уровня, а под интерфейсом — правила обмена между  $A$ -схемами одной системы. В протоколах подразумевается семантическая связь между обмениваемыми данными. Интерфейсы же представляют собой только синтаксические правила. Протокол реализуется в виде конечного автомата или  $A$ -схемы.

Если входной алфавит  $D_i$  совпадает с выходным алфавитом  $D_0$ , то могут иметь место два случая: 1) протокольная  $A$ -схема и 2) интерфейсная  $A$ -схема. При удалении какого-либо входа или выхода  $A$ -схемы могут вырождаться. Вырожденные  $A$ -схемы могут быть правильными, когда их функционирование не приводит к нарушению принципов ЭМВОС и принятых соглашений протоколов и интерфейсов, и неправильными, функционирование которых приводит к нарушению принципов ЭМВОС, к тупиковым ситуациям, к неопределенным ситуациям.

Дадим формальное описание процессов генерации, отражающих воздействие пользователей на ИКС. Причем, если  $INT(N)$ -среда описывает статическую структуру сети и является детерминированной, то  $GEN(E)$ -среда должна отразить динамику запросов пользователей на ресурсы ИКС и их стохастичность. С точки зрения специалистов, занимающихся исследованием и проектированием системы управления ИКС, любая модель взаимодействия с внешней средой должна рассматриваться как математическая основа, позволяющая создать приемлемые для практики методы идентификации и анализа вероятностно-временных характеристик процесса функционирования ИКС.

Рассмотрение передачи различных видов сообщений пользователей в ИКС в виде потоков коммутируемых информационных единиц (сообщений, пакетов, ячеек, вызовов и т. п.) дает возмож-

ность перейти к формальному описанию  $GEN(E)$ -среды, сводимому к описанию воздействия  $GEN(E)$ -потоков на сеть.

Вид и значения параметров входящих потоков сообщений пользователей могут изменяться для каждой конкретной ИКС в зависимости от времени года, квартала, месяца, суток, часов и т. д. Из часовых колебаний информационной загрузки наибольшее значение для дальнейших исследований ИКС имеет величина входящего потока сообщений пользователей в час наибольшей нагрузки. Наблюдение в течение продолжительного времени за суточными изменениями периодами наибольшей загрузки позволяет установить интенсивность входящих потоков сообщений пользователей в час наибольшей нагрузки для ИКС от различных пользователей. Необходимо также учитывать, что в большинстве случаев основные параметры входящих потоков сообщений пользователей являются величинами, которые известны всегда лишь с определенной точностью, что является следствием недостаточной статистики о таких новых объектах как ИКС. Эта точность исходных данных определяет случайные ошибки в основных вероятностно-временных характеристиках процесса функционирования ИКС и должна сопоставляться с методической ошибкой аналитических выражений и результатов, полученных методом имитационного моделирования.

Анализ структуры и свойств потоков сообщений пользователей в различных метасистемах, предшествующий разработке ИКС и заключающийся в рассмотрении характера этих потоков и параметров сообщений пользователей с учетом общего объема информации, календарной статистики информационных потоков в ИКС, характера возникновения потоков сообщений пользователей, интенсивности поступления сообщений пользователей, длины сообщений пользователей, разбиения сообщений пользователей по категориям приоритетности, позволяет приступить к построению на этой основе модели  $GEN(E)$ -потоков.

Кроме того, необходимо определить границу взаимодействия этих потоков. Нас будет интересовать последовательность событий, когда коммутируемая информационная единица поступает в  $GEN(E)$ -среду. Событие «поступление коммутируемой информационной единицы» должно при этом означать, что порвана связь с породившим его потоком внешних сообщений, т. е.  $GEN(E)$ -потоком. Это предположение может быть сделано для исследуемых ИКС, так как, согласно ЭМВОС, функции приема сообщений пользователей полностью отделены от функций их дальнейших преобразований. Как уже отмечалось, в общем случае пользовательское сообщение, поступающее во внешний узел ИКС, не соответствует коммутируемой информационной единице, передаваемой этим узлом далее. Поэтому рационально рассмотреть

некоторый промежуточный процесс, который по своей сути является процессом формирования коммутируемых информационных единиц для данного внешнего узла ИКС. Например, в качестве процесса формирования коммутируемой информационной единицы может быть рассмотрен процесс ее сборки из ряда сообщений пользователей или процесс разбиения сообщений пользователей на несколько коммутируемых информационных единиц данного узла.

Такая интерпретация процесса взаимодействия узла с внешней средой позволяет в качестве моментов поступления коммутируемых информационных единиц рассматривать моменты их записи в накопитель ЦОУ. Это физически означает, что коммутируемая информационная единица переписывается в накопитель из устройства формирования. В дальнейшем будем предполагать, что операция записи в накопитель происходит мгновенно, а время считывания коммутируемой информационной единицы из накопителя нулевое, т. е. имеем дело с безынерционным накопителем.

Очевидно, что формат сообщений пользователей сети зависит от типа оборудования, которым укомплектованы взаимодействующие с ИКС пользовательские системы. Все структуры форматов сообщений пользователей могут быть разбиты на две категории — постоянной и случайной длины. Наиболее рациональным является получение параметров входящих информационных потоков аналитическим методом, который заключается в применении некоторых основных теорем теории вероятностей к информационному потоку, поступающему в ИКС. При этом поступление сообщений пользователей в ИКС от абонента  $a_i$  интерпретируется как свершение событий, которые происходят случайным образом с постоянной (не зависящей от времени) средней интенсивностью. На основании большого количества работ, выполненных советскими и зарубежными учеными, можно считать, что большинство внешних информационных потоков, поступающих в ИКС, являются случайными, причем в общем случае моменты между появлением отдельных внешних сообщений распределены по экспоненциальному закону.

Одной из основных характеристик коммутируемой информационной единицы является ее длина, которая измеряется количеством двоичных элементов, т. е. бит. Поток сообщений пользователей, помимо распределения времени между моментами их поступления, должен характеризоваться длиной, т. е. количеством коммутируемых информационных единиц, содержащихся в сообщениях пользователей. Для возможности полного описания всех разновидностей входящих потоков сообщений пользователей введем понятие аппарата  $F$ -схем (от англ. flow — поток), являющегося средством описания потоков неоднородных событий в такой предметной области как ИКС. Рассмотрим следующие модификации  $F$ -схем:

1) простой поток сообщений пользователей, когда количество элементов, содержащихся в информационной части коммутируемой информационной единицы и сообщений пользователей, равны, т. е.  $m_i = m_c$  и  $\xi = m_i/m_c = 1$ ;

2) сложный входящий поток сообщений пользователей, когда количество элементов, содержащихся в информационной части коммутируемой информационной единицы, меньше количества элементов, содержащихся в сообщении пользователей:  $m_i < m_c$  и  $\xi < 1$ ;

3) прореженный входящий поток сообщений пользователей, когда количество элементов, содержащихся в информационной части коммутируемой информационной единицы, больше количества элементов, содержащихся в сообщении пользователей:  $m_i > m_c$  и  $\xi > 1$ , где  $\xi$  — целое число.

Будем называть число  $\xi$  параметром  $F$ -схемы для описания  $GEN(E)$ -потока.

Исследуем ИКС с детерминированным режимом использования КСв, когда начало передачи каждой коммутируемой информационной единицы возможно только в фиксированные моменты времени, кратные  $v_1 = n/C$ , где  $n$  — количество элементов кодовой комбинации коммутируемой информационной единицы;  $C$  — скорость манипуляции в КСв в бодах. Таким образом, временная ось  $0 < t < \infty$  разбита на кванты длиной  $v_1$  временных единиц. Без потери общности можно считать, что квант времени  $v_1$  равен одной временной единице.

Рассмотрим математические модели  $GEN(E)$ -потоков ИКС для каждой из рассмотренных модификаций  $F$ -схем. Обозначим через  $X_e$  число коммутируемых информационных единиц, поступающих в течение единичного кванта  $v_1$ . Тогда для экспоненциального распределения интервалов между моментами поступления сообщений пользователей

$$\Pr\{X_e = i\} = \frac{\lambda_c^i}{i!} e^{-\lambda_c}, \quad i = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $\lambda_c$  — интенсивность поступления сообщений пользователей. Будем характеризовать соотношение величин  $m_e$  и  $m_c$  в  $F$ -схемах процессом  $Y$ . В результате взаимодействия процессов  $X_e$  и  $Y_e$  получим процесс поступления коммутируемых информационных единиц в ИКС  $U_e$ .

Для случая, когда параметр  $F$ -схемы  $\xi = 1$ , имеем  $Y_e = 1$ , т. е.  $U_e^1 = X_e$ , и распределение числа поступающих коммутируемых информационных единиц определится выражением

$$\Pr\{U_e^1 = i\} = \frac{\lambda_c^i}{i!} e^{-\lambda_c}, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Математическое ожидание и дисперсия определяются как  $M[U_e^1] = D[U_e^1] = \lambda_c$ .

Для случая параметра  $\xi < 1$  в  $F$ -схеме необходимо задать законом распределения  $\xi$ . Из статистики распределения длин сообщений пользователей, поступающих в ИКС, можно предположить,

что  $Y_e$  определяется (с учетом дискретности процесса передачи) из геометрического распределения

$$\Pr\{Y_i = j\} = \xi(1 - \xi)^{j-1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $\xi^{-1}$  — средняя длина сообщений пользователей.

Тогда общее число коммутируемых информационных единиц, поступающих в ИКС за время передачи коммутируемой информационной единицы, является случайной величиной и определяется по формуле

$$U_i\{X_i\} = \sum_{i=0}^{X_i} Y_{ei},$$

где  $Y_{ei}$  — случайная переменная величина, которая является числом коммутируемых информационных единиц, содержащихся в  $i$ -м сообщении пользователей.

Характеристические функции  $U_e$  и  $Y_e$  имеют вид

$$\varphi_U(S) = e^{-[\lambda_c + \lambda_c \varphi_Y(s)]}; \quad \varphi_Y(S) = \frac{\xi e^{js}}{1 - (1 - \xi)e^{js}},$$

где  $j = \sqrt{-1}$  — мнимая единица. Подставив выражения одно в другое, получим

$$\varphi_U(S) = e^{-\lambda_c} + \frac{\lambda_c \xi e^{js}}{1 - (1 - \xi)e^{js}}.$$

Отсюда получаем вероятность того, что  $i$  коммутируемых информационных единиц поступает в течение кванта  $v_1$

$$\Pr\{U_i^2 = i\} = \left\{ \begin{array}{l} e^{-\lambda_c}, \quad i = 0 \\ e^{-\lambda_c} \sum_{k=1}^i C_{i-1}^{k-1} \frac{(\lambda_c \xi)^k (1 - \xi)^{i-k}}{k!}, \quad i = 1, 2, \dots \end{array} \right\}.$$

Математическое ожидание и дисперсия в этом случае соответственно равны  $M[U_c^2] = \lambda_c/\xi$ ,  $D[U_c^2] = \lambda_c(2 - \xi)/\xi^2$ .

И, наконец, рассмотрим третий случай входящего потока сообщений пользователей, когда в  $F$ -схеме параметр  $\xi > 1$ , т. е. формирование коммутируемой информационной единицы из определенного числа сообщений пользователей  $\xi$ , моменты поступления которых распределены по экспоненциальному закону. В этом случае имеем дело с процессом  $Y_e$ , который является процессом «разрежения» входящего пуассоновского потока  $X_e$ . Поток коммутируемых информационных единиц, полученный в результате этой операции над потоком сообщений пользователей, будет эрланговским потоком  $\xi$ -го порядка, характеристическая функция которого

$$\varphi_U(S) = (\lambda_c/\lambda_c - is)^\xi.$$

Плотность распределения вероятностей имеет вид

$$f_\beta(t) = \frac{\lambda_c (\lambda_c t)^{\xi-1}}{(\xi-1)!} e^{-\lambda_c t}.$$

Математическое ожидание и дисперсия числа коммутируемых информационных единиц, посту-

пивших за время  $v_1$ , будут иметь вид  $M[U_e^3] = \lambda_c/\xi$ ,  $D[U_e^3] = \lambda_c/\xi^2$ . Одной из разновидностей входящего потока сообщений пользователей в этом случае следует считать регулярный поток, который может быть рассмотрен как частный случай эрланговского потока с параметром  $\xi \rightarrow \infty$ .

Таким образом, ввиду невозможности описания всего множества различных классов входящих потоков сообщений пользователей в ИКС каким-либо одним известным распределением, предложено свести эти входящие потоки для задания  $GEN(E)$ -среды к трем случаям  $F$ -схем, основой для которых является пуассоновский поток сообщений пользователей. Кроме того, при исследовании характеристик процесса функционирования ИКС аналитическим методом возникают значительные трудности при предположении произвольного распределения моментов поступления сообщений пользователей и учете их длины, что связано с невозможностью получения в явном виде характеристик при аппроксимации классическими моделями теории массового обслуживания. Поэтому, исследуя каждую конкретную ИКС, целесообразно проводить анализ в предположении наличия одной из трех модификаций  $F$ -схем для входящего потока сообщений пользователей. При этом любой входящий поток сообщений пользователей будем характеризовать количеством коммутируемых информационных единиц, поступающих в течение кванта времени  $v_1$ :  $Pr\{U_e = i\} = v_i$ .

Введем производящую функцию для этих величин  $N(z) = \sum_{i=0}^{\infty} v_i z^i$  и назовем среднее число коммутируемых информационных единиц, поступающих в единицу времени, интенсивностью входящего потока ( $F$ -потока)  $v_g = M[v_i] = N^1(1)$ . Тогда интенсивности простого, сложного и прореженного  $F$ -потоков  $v_g = \lambda_c/\xi$ , где  $\xi = 1$ ,  $\xi < 1$  и  $\xi > 1$  — параметры  $F$ -схем для простого, сложного и прореженного потоков соответственно.

Если при аппроксимации реальной статистики входящих потоков сообщений пользователей не удастся свести их непосредственно к трем рассмотренным выше модификациям  $GEN(E)$ -потоков, то можно использовать суперпозицию входящих потоков. Например, если имеется источник информации, выдающий как явно выраженные независимые одиночные сообщения пользователей, так и пачки сообщений пользователей, длины которых распределены по геометрическому закону, то для описания такого входящего потока сообщений пользователей следует использовать суперпозицию потоков. Тогда можно показать, что вероятность  $Pr\{U_e = i\}$  является сверткой соответствующих вероятностей и равна

$$Pr\{U_i = i\} = \left\{ \begin{array}{l} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)}, i = 0 \\ \frac{\lambda_1}{i!} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)} + \sum_{k=1}^i \frac{\lambda_1^{i-k} \lambda_2^{-k}}{(i-k)!} + \sum_{j=1}^k C_{k-1}^{j-1} \frac{(\lambda_2 \xi)^j (1-\xi)^{i-j}}{j!}, i = 1, 2, \dots \end{array} \right\}.$$

Интенсивность поступления коммутируемых информационных единиц составит  $v_g = \lambda_1 + \lambda_2/\xi$ .

Таким образом, результаты, полученные путем экспериментального исследования входящих информационных потоков сообщений пользователей, могут быть аппроксимированы на основе трех рассмотренных модификаций  $F$ -схем для  $GEN(E)$ -потоков, обеспечивая тем самым основу для проведения дальнейших исследований аналитическим методом и (или) методом имитационного моделирования.

Формальное описание  $GEN(E)$ -среды позволит описать взаимодействие ИКС с внешней средой на системном  $GEN(E)$ - $INT(N)$ -уровне, что особенно важно как для дальнейшей стратегической идентификации ИКС как объекта управления, так и для построения обучающихся моделей в контуре адаптивного управления ИКС. Принятый для формализации математический аппарат для  $GEN(E)$ -среды ( $F$ -схемы, т. е. потоки) и для  $INT(N)$ -среды ( $H$ -схемы, т. е. матрицы и графы) позволяет решать задачи взаимодействия на системном  $GEN(E)$ - $INT(N)$ -уровне.

Как уже отмечалось, выделение  $WID(E)$ -среды должно отразить наличие стохастических мешающих воздействий внешней среды на распространение цифровой информации в ИКС, что соответствует уровням 1 и 2 ЭМВОС. Достаточно высокие требования к верности и скорости передачи цифровой информации, предъявляемые со стороны пользователей к ИКС, приводят к необходимости применения специальных мер по борьбе с ошибками. Для разработки ИКС, наиболее эффективных в конкретных условиях эксплуатации, необходимо на стадии проектирования провести детальное исследование различных способов реализации алгоритмов защиты от ошибок в дискретных КСв. При исследовании вероятностно-временных характеристик процесса передачи коммутируемых информационных единиц необходимо иметь статистические данные об ошибках в реальных КСв, используемых в ИКС.

Недостатком многих известных работ по статистике ошибок является графическое представление конечных результатов исследования, что затрудняет их использование при необходимости сравнительной оценки вероятностно-временных характеристик процесса передачи коммутируемых информационных единиц в ИКС. Эти требования делают актуальной разработку математических моделей для описания процесса возникновения ошибок в реальных КСв, что не только упрощает процесс исследования ИКС, но и обеспечивает универсальность этих исследований.

Наиболее простой из математических моделей для описания  $WID(E)$ -среды является модель независимых ошибок, которая исходит из предположения, что ошибки в дискретном КСв возникают независимо друг от друга, т. е. между ними отсутствует корреляция. Модель независимых оши-

бок может быть использована для описания потока ошибок в собственных кабельных и оптических линиях связи, которые часто используются в абонентской части ИКС. Экспериментальные работы в области исследования телефонных каналов связи не подтвердили гипотезы о независимости ошибок для этой группы каналов, используемых в ИКС, а выявили тенденцию к их группированию (пакетированию).

Известно много математических моделей дискретных КСв, в которых различным образом отражается экспериментально установленный факт группирования ошибок. Существующие модели по способу описания параметров потоков ошибок можно условно разделить на две большие группы. Модели первой группы отражают чисто математический подход к вопросу описания потока ошибок, но при этом, как правило, игнорируется физическая сторона процессов, происходящих в КСв, и механизм группирования ошибок не задается в явном виде. В моделях второй группы делаются попытки в какой-то степени учесть физические явления, которые приводят к появлению ошибок. В моделях этой группы используется понятие пакета ошибок, механизм образования которых задается в явном виде.

Представляется наиболее рациональным строить математическую модель  $WID(E)$ -среды, оперируя понятиями, близкими к физическим явлениям, происходящим в КСв, т. е. на уровне 1 ЭМВОС. Действительно, практика показывает, что пакеты ошибок возникают под действием множества источников возмущений, порождаемых причинами, которые характеризуются случайным началом, длительностью и степенью воздействия на передаваемый сигнал. Все последствия этих причин суммируются, что позволяет, исходя из физических предпосылок, рассматривать функцию распределения интервалов между ошибками как сумму экспонент, каждая из которых характеризует распределение интервалов между ошибками одной группы причин. Это дает возможность аппроксимировать экспериментальную функцию распределения интервалов между ошибками распределением  $K$ -го порядка вида

$$\Phi_s(u) = \sum_{i=1}^K A_i e^{-\varphi_i u}.$$

Такое распределение практически позволяет описать все имеющиеся статистики ошибок для стационарных КСв.

Однако проведение исследования вероятностно-временных характеристик процесса передачи сообщений в дискретных каналах связи ИКС аналитическим методом с использованием этой трехпараметрической модели представляет определенные трудности. Их можно преодолеть, перейдя от этой исходной экспериментальной модели к математической модели канала с памятью.

Формальное представление процессов и явлений в дискретных каналах связи ИКС на базе  $WID(E)$ -потоков, математически описываемых с помощью  $C$ -схем (комбинаторных схем), позволяет в дальнейшем задачи стратегической идентификации процесса передачи и связанных с ним процессов коммутации и обмена информацией, использовать аппарат  $C$ -схем для реализации задач управления как на канальном, так и на более высоких уровнях.

Для разработки методов и алгоритмов управления ИКС необходимо рассмотреть взаимодействие процессов на  $WID(E)$ - $PRO(N)$ -уровне. Отметим, что соответствующий математический аппарат, используемый для формализации  $PRO(N)$ -среды ( $A$ -схемы, т. е. информационные автоматы) и  $WID(E)$ -потоков ( $C$ -схемы, т. е. комбинаторные схемы), позволяет это успешно сделать.

Таким образом, предложенный подход, базирующийся на представлении архитектуры процессов в ИКС в виде взаимосвязанных сред и математических схем их описания, позволит строить обобщенные модели ИКС как объекта управления.

## Литература

1. Колбанёв М. О., Яковлев С. А. Модели и методы оценки характеристик обработки информации в интеллектуальных сетях связи. СПб.: СПбГУ, 2002. 230 с.
2. Концептуальные положения по построению мультисервисных сетей на ВСС России. <http://www.minsvyaz.ru/img/uploaded/2002020610512757.pdf>
3. Крупнов А. Е. Современные телекоммуникационные технологии и услуги в России на рубеже XXI века // CONNECT. 1997. № 3. С. 5–9.

УДК 621.314.2

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

**Е. Н. Андреев,**ст. научный сотрудник  
ФГУП «НИИ Электромаш»**Н. Ю. Вандюк,**канд. техн. наук, научный сотрудник  
Институт химии силикатов РАН**Д. А. Волков,**

аспирант

**Д. А. Коротков,**

аспирант

**М. Ю. Платонова,**

канд. техн. наук, доцент

**Л. И. Чубраева,**

доктор техн. наук, член-корр. РАН

Научно-исследовательский институт инновационных технологий

в электромеханике и энергетике Санкт-Петербургского государственного  
университета аэрокосмического приборостроения

*Дан обзор современного состояния и перспектив развития трансформаторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости. Рассмотрены особенности разработки трехфазного трансформатора броневоего типа с обмотками из ленточного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и магнитопроводом из ленточной нанокристаллической стали. Представлены результаты математического моделирования электромагнитных полей трансформатора, проанализированы способы ограничения токов короткого замыкания.*

*A review the modern state and future development of the high-temperature superconductor transformers is given. We consider the three-phase shell-type transformer with windings of high-temperature superconductor tape (HTS) and a core of tape-type nanocrystalline steel. The results of mathematical modelling of electromagnetic fields of the transformer are presented and methods of short-circuit currents limitation are analyzed.*

## Введение

Явление сверхпроводимости заключается в практически полном исчезновении электрического сопротивления некоторых материалов при понижении температуры ниже критической. Удельное электрическое сопротивление сверхпроводников находится на уровне  $10^{-26}$  Ом · м. Сверхпроводимость была открыта в металлах в 1911 г. В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) в керамических материалах.

Сверхпроводники характеризуются критическими параметрами, при которых происходит их переход в резистивное состояние, — это критическая температура  $T_C$ , критическое магнитное поле  $B_C$ , критическая плотность тока  $j_C$ .

Для практического использования в технической сверхпроводимости пригодны низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) на основе сплава Nb—Ti ( $T_C = 9,3$  К) и соединения Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_C = 17,9$  К). Отечественной промышленностью освоено



но изготовление широкой номенклатуры проводов из этих материалов для постоянного и переменного тока. Для охлаждения НТСП обмоток используют жидкий и газообразный гелий (рабочие температуры 4,2–12 К).

Высокотемпературные сверхпроводники, имеющие критическую температуру выше 35 К, могут охлаждаться газообразным гелием, жидким водородом, неоном или азотом. Среди этих хладагентов жидкий (сжиженный) азот — наиболее дешевый и доступный, производимый промышленностью в больших количествах. Кроме того, он, как и жидкий водород, обладает высокими диэлектрическими характеристиками и по своим электроизоляционным свойствам близок к трансформаторному маслу.

Открытие ВТСП-материалов с критической температурой, превышающей 77,3 К (температуру кипения жидкого азота при нормальном давлении), позволило существенно упростить систему криостатирования. С учетом неизбежных потерь хладагента эксплуатационные расходы на захлаживание на азотном уровне оказываются в сотни раз ниже расходов на криостатирование на гелиевом уровне температур. Упрощенная система охлаждения принципиально более надежна в эксплуатации. В целом применение ВТСП в электротехническом оборудовании создает возможности для повышения надежности данного оборудования (отсутствие перепадов температуры, отсутствие старения электрической изоляции и др.).

В технической сверхпроводимости используются ленточные ВТСП-материалы на основе соединений висмута  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (Bi-2212) и  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223), а также объемные ВТСП-материалы (массивы) на основе висмута (Bi-2223) и иттрия (Y-123). Поскольку сверхпроводящие токонесущие элементы должны соответствовать спектру технических требований, частично взаимно противоречивых, то

они представляют собой сложные композиционные конструкции разнородных по физическим свойствам и по функциональному назначению материалов: собственно сверхпроводника, стабилизирующего материала, материала диффузионных барьеров, упрочняющих и изоляционных материалов. Плотность критического тока ВТСП-лент в собственном поле при 77 К находится на уровне  $10^8 \text{ А/м}^2$ .

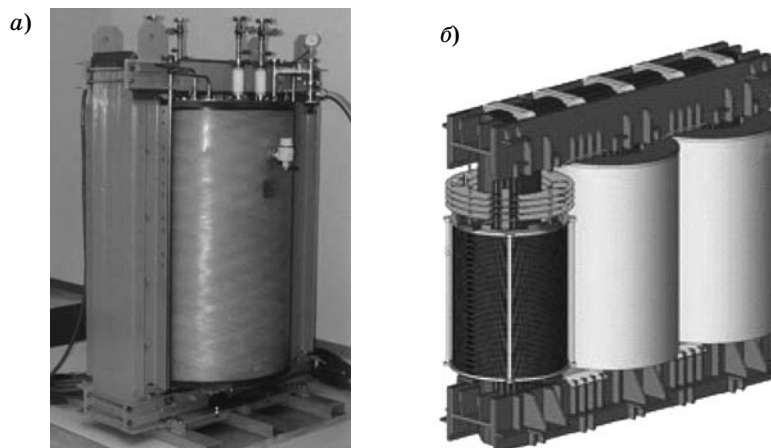
Одними из ВТСП-устройств, представляющих интерес для энергетики, являются трансформаторы. Их совершенствование в настоящее время осуществляется не за счет повышения КПД, который у трансформаторов является высоким, а связано с применением новых материалов для обмоток, магнитной системы или электрической изоляции.

В этих условиях представляет интерес оценка перспектив применения ВТСП-трансформаторов. Основными экономическими, эксплуатационными и экологическими преимуществами силовых трансформаторов на базе ВТСП-проводников являются:

- уменьшение массогабаритных характеристик;
- экологическая безопасность;
- отсутствие старения изоляции (фактор продления срока службы).

Ведущие промышленно развитые страны (США, Германия, Франция, Япония, Австралия, Швеция, Англия) к настоящему времени изготовили опытные образцы ВТСП-трансформаторов для проверки новых решений, принятых при их конструировании (рис. 1) [1–5]. Часть из них была установлена в опытную эксплуатацию в энергосети с целью проверки их работоспособности параллельно с трансформаторами традиционных конструкций. В таблице приведены данные разработок ВТСП-трансформаторов за последние 10 лет.

В настоящее время ведутся разработки силовых ВТСП-трансформаторов мощностью 10 и 20 МВ · А.



■ **Рис. 1.** Варианты конструктивного исполнения ВТСП-трансформаторов: а — однофазный ВТСП-трансформатор бронзового типа мощностью 500 кВ · А (Япония); б — трехфазный ВТСП-трансформатор стержневого типа мощностью 60 МВ · А (фирма Hitachi)

■ Основные технические характеристики ВТСП-трансформаторов

Фирма	Страна, год разработки	Мощность, кВ·А	Напряжение, кВ	Тип*	Число фаз
ABB	Швейцария, 1997	630	13,72/0,42	–	3
Fuji / SEC / Kyushu University Group	Япония, 1997	500	6,6/3,3	Б	1
Waukesha Electric Systems	США, 1998	1000	–	Б	1
Soonchunhyang University Woosuk University Korea Polytechnic University Chonnam National University Seoul National University	Корея, 2001	10	0,44/0,22	С	3
Bergische Universitat Wuppertal SKODA VYZKUM Slovak Academy of Sciences	Германия, Чехия, Словакия, 2001	14	0,4/0,2	Б	1
Hyundai	Япония, 2005	60000	–	С	3
Ansaldo	Италия, 2005	10	–	Б	1

\* С — трансформатор стержневого типа; Б — трансформатор броневое типа.

**Конструкция модельного ВТСП-трансформатора**

Для моделирования процессов в ВТСП-трансформаторах коллективом авторов разработан трехфазный двухобмоточный трансформатор броневое типа мощностью 60 кВ·А и линейным напряжением 690/400 В, который предназначен для работы в составе автономной электроэнергетической установки [3, 4]. Конструкция трехфазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 2. Отличительной особенностью данной конструкции является использование ленточного ВТСП-проводника для изготовления обмоток и ленточной нанокристаллической стали для изготовления магнитопровода. Разработана уникальная технология изготовления сердечника и ярма, которая обеспечивает ремонтпригодность трансформатора и повышает его технологичность.

Ленточная нанокристаллическая магнитомягкая сталь имеет более низкие удельные потери по сравнению с электротехнической сталью. Сердечник и ярмо трансформатора набираются из единичных галет, которые наматываются на отдельных каркасах с последующей термообработкой и пропиткой.

Сердечник трансформатора, набранный из галет, укладывается на несущий каркас из нержавеющей стали. Каркас выполняется полым для улучшения условий охлаждения сердечника. Увеличение диаметра центрального канала ведет к увеличению расхода ВТСП-ленты (рис. 3). Поэтому диаметр центрального канала выбран минимально возможным по условиям охлаждения активной стали.

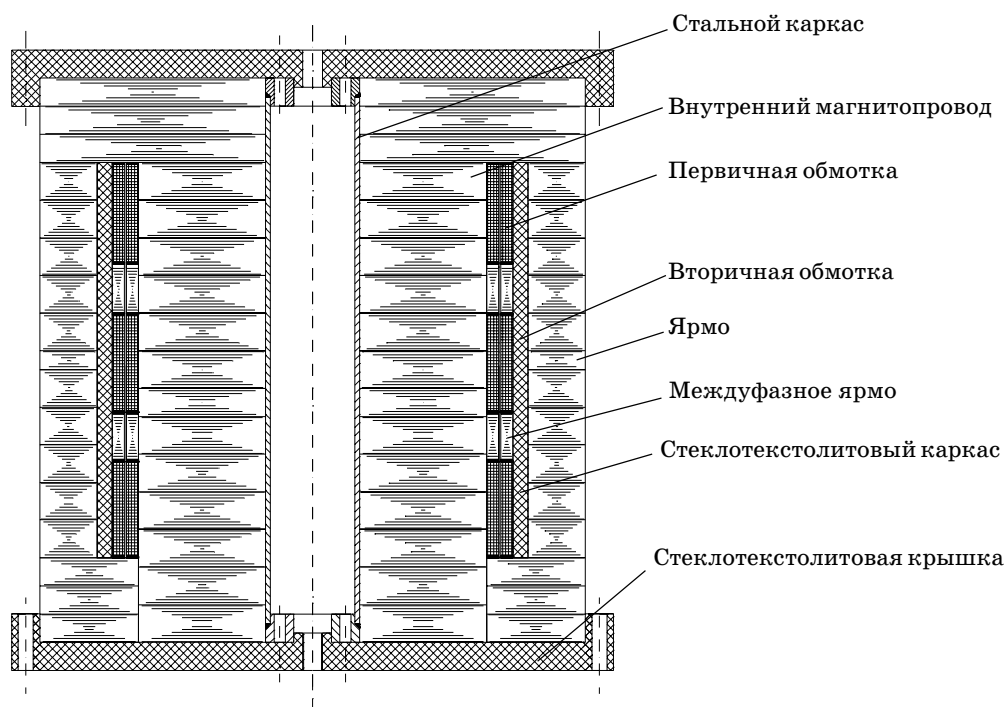
Сборка галет ярма производится на стеклотекстолитовом каркасе, что обеспечивает доступ как к отдельным частям магнитопровода, так и к обмоткам. Обмотки трансформатора изготавливаются из ленточного сверхпроводника на основе висмутовой керамики Bi-2223/Ag с критическим током более 90 А в собственном поле при температуре 77 К. Обмотки трех фаз располагаются вертикально на одном стержне друг над другом. Корпусная изоляция образована стеклотканью, пропитанной эпоксидной смолой.

Предусматривается соединение фаз обмоток трансформатора: «звезда с заземлением нулевой точки — звезда». Нулевой провод первичной обмотки, выполненный из обмоточной меди, дает возможность для замыкания третьей гармоники тока намагничивания каждой фазы, что позволяет избежать потерь в сверхпроводнике от токов третьей гармоники.

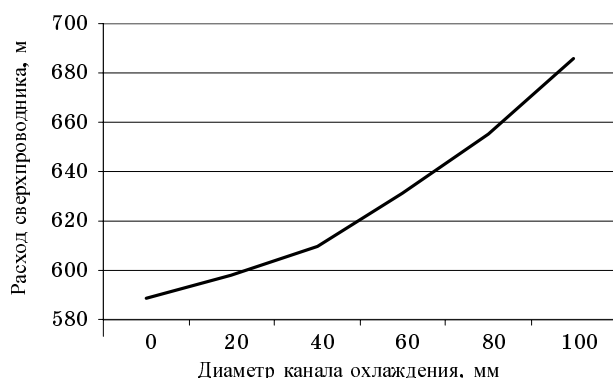
Вся конструкция помещается в криостат в среде жидкого азота (77 К). При необходимости производится откачка паров, что позволяет предусмотреть понижение рабочей температуры до 64 К (переохлажденный азот) или до 20 К (при использовании криоохладителя Гиффорда—Макмагона).

**Математическое моделирование электромагнитных полей ВТСП-трансформатора**

Разработка конструкции ВТСП-трансформатора основана на исследовании картины электромагнитных полей как в магнитопроводе, так и в немагнитном зазоре (главном канале рассеяния). Это



■ Рис. 2. Конструкция ВТСП-трансформатора



■ Рис. 3. Зависимость расхода ВТСП-ленты от диаметра центрального канала

обусловлено использованием ВТСП-ленты, параметры которой существенно зависят от величины радиальной составляющей внешнего электромагнитного поля по отношению к широкой стороне ленты. Кроме того, необходимо выявить места локальных перегревов, чтобы обеспечить интенсивный отвод потерь от магнитопровода и обмоток. Исследование картины распределения поля в магнитопроводе трансформатора проводилось при помощи программы MATLAB, подпрограммы FEMLAB, которая позволяет получать данные с заданной степенью точности. В результате исследования были получены картины распределения поля в магнитопроводе (рис. 4), где стрелками 1–8 указаны место и направление сечений математи-

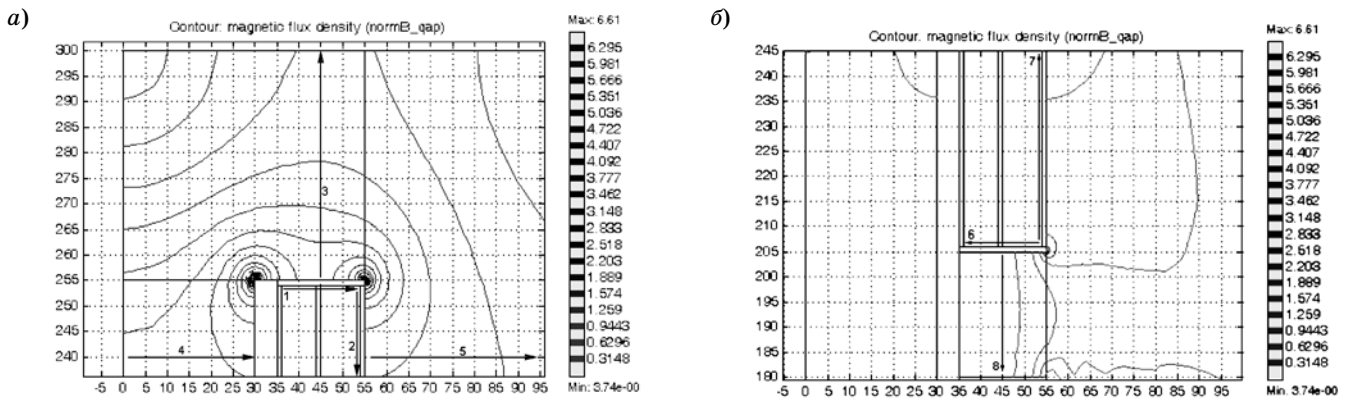
ческой модели, для которых приводятся двухмерные графики распределения индукции магнитного поля (рис. 5).

Как следует из приведенных графиков, величина радиальной составляющей электромагнитного поля к широкой стороне ВТСП-ленты находится в пределах от 1 до 10 мТл и практически не влияет на токонесущую способность.

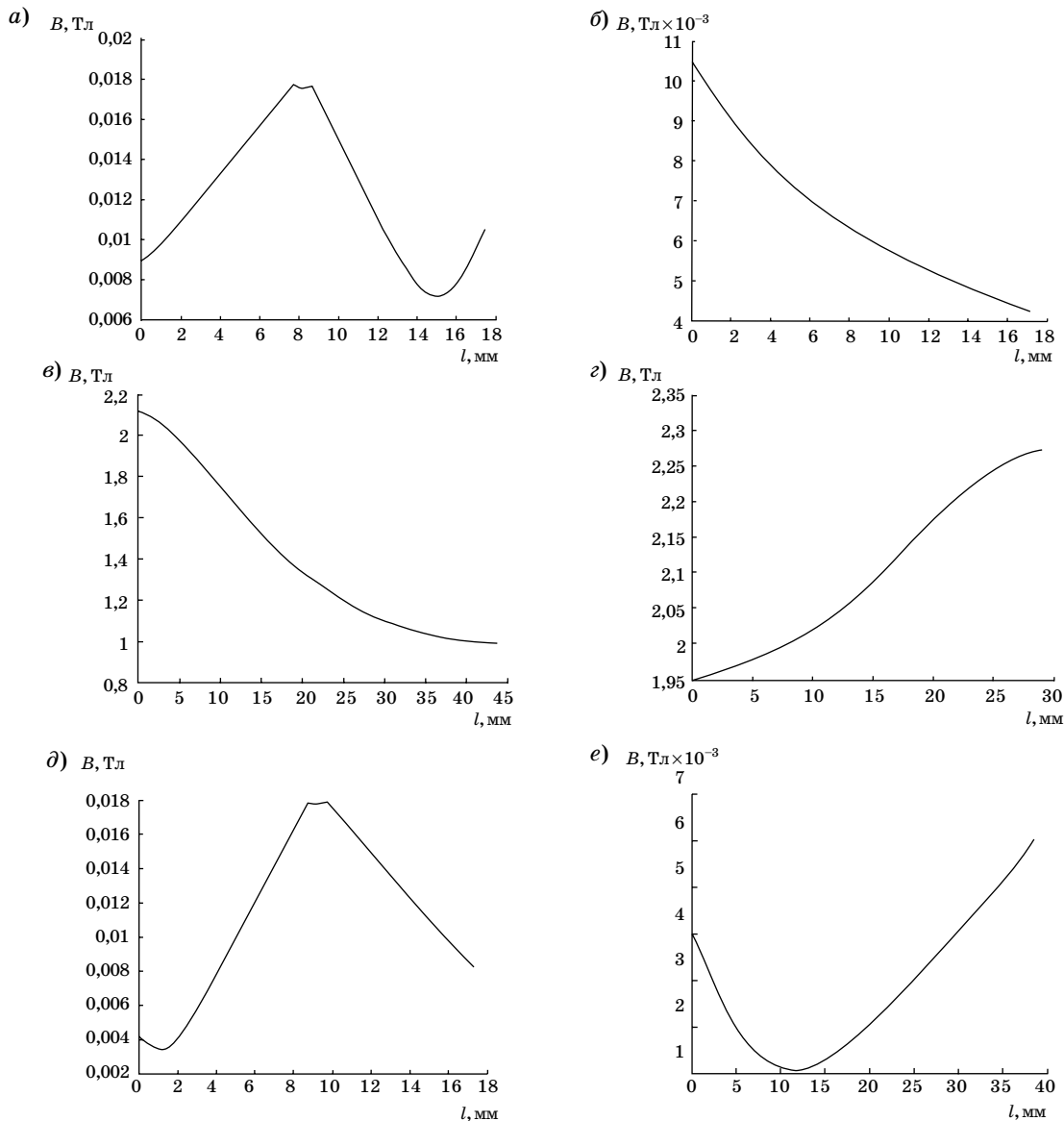
### Исследование методов ограничения токов короткого замыкания ВТСП-трансформатора

Величина напряжения короткого замыкания в ВТСП-трансформаторе в несколько раз ниже, чем в трансформаторах традиционного исполнения. Это обусловлено тем, что индуктивное сопротивление рассеяния тонких обмоток из ВТСП-ленты существенно ниже, чем у медных обмоток. В результате значительно возрастает установившийся ток короткого замыкания. Если в трансформаторах традиционного исполнения токи короткого замыкания достигают 20-кратных значений, то в ВТСП-трансформаторах имеют место 60–70-кратные токи.

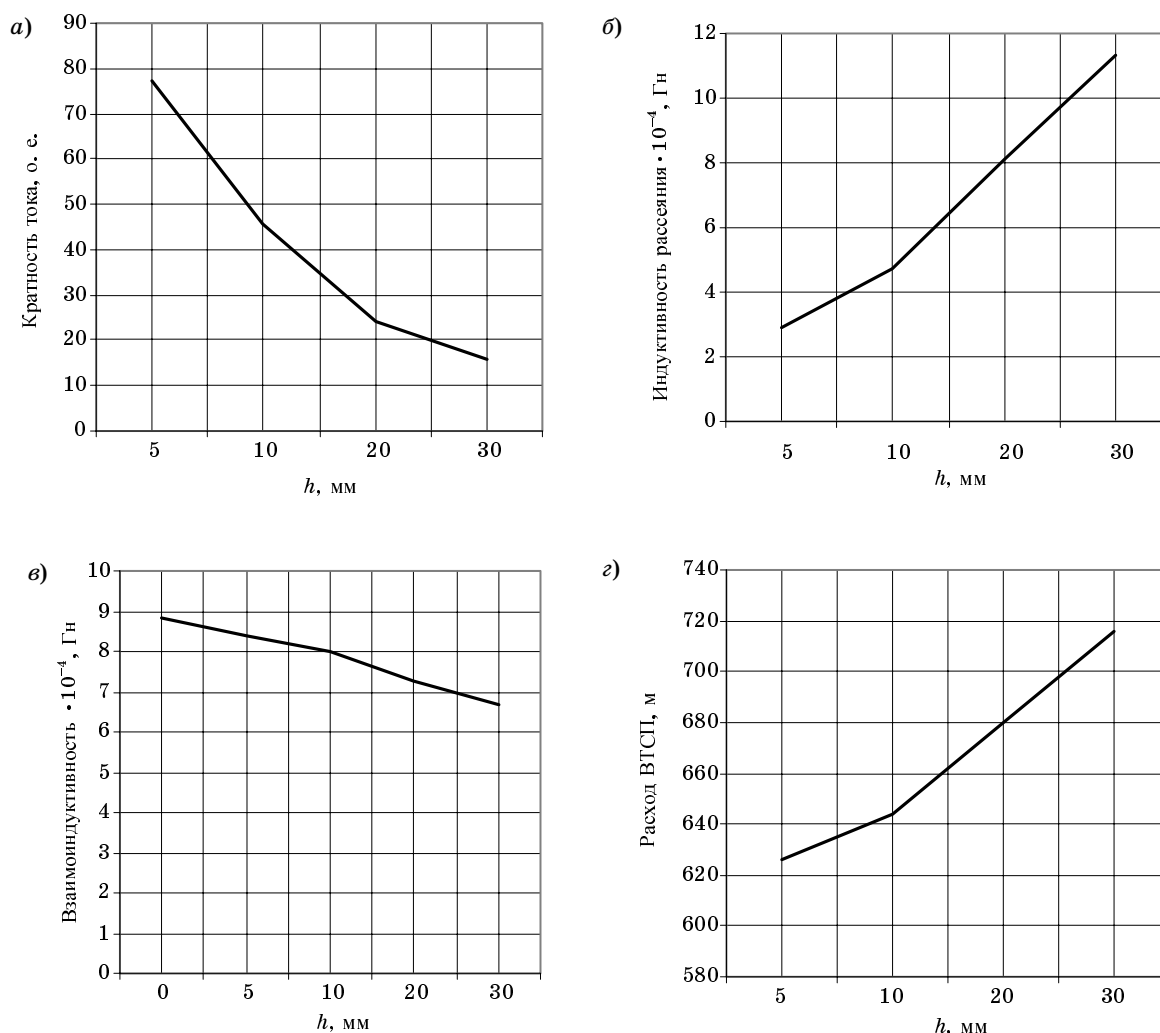
Величину токов короткого замыкания можно ограничить либо введением дополнительного канала рассеяния, либо установкой аппаратов токовой защиты. Увеличение ширины канала рассеяния позволяет существенно снизить токи короткого замыкания (рис. 6, а) за счет увеличения индуктивности рассеяния (рис. 6, б). Но при этом происходит снижение взаимоиндуктивности обмо-



■ Рис. 4. Картина электромагнитного поля на стыке сердечника с ярмом: а — в верхней части трансформатора; б — между фазами трансформатора



■ Рис. 5. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния: а — по стрелке 1; б — по стрелке 2; в — по стрелке 3; г — по стрелке 4; д — по стрелке 6; е — по стрелке 7



■ **Рис. 6.** Зависимости параметров трансформатора от ширины  $h$  канала рассеяния: а — кратности тока короткого замыкания; б — индуктивности рассеяния; в — взаимной индуктивности обмоток; г — расхода ВТСП-ленты

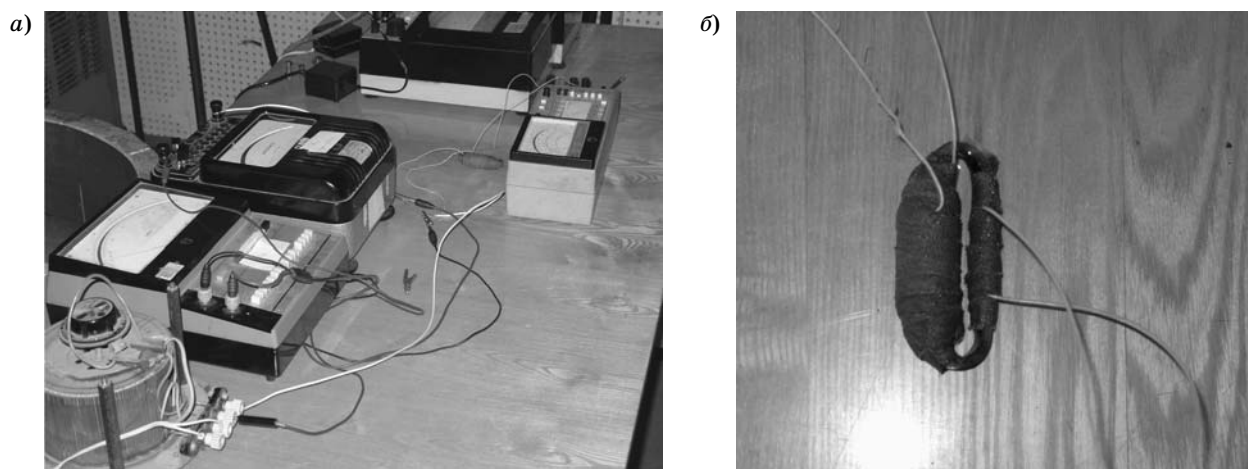
ток (рис. 6, в) и увеличение расхода ВТСП-ленты (рис. 6, г). Кроме того, увеличение канала рассеяния ведет к появлению радиальной составляющей поля в канале, которая существенно уменьшает критический ток ВТСП-ленты и приводит к снижению эффективности использования сверхпроводника. Одним из способов уменьшения нормальной составляющей магнитного поля является введение в обмоточную зону добавочных ферромагнитных колец, что усложняет конструкцию в целом [1].

Таким образом, введение дополнительного канала рассеяния имеет целый ряд указанных выше негативных последствий. Одним из интересных технологических решений является применение сверхпроводящих ограничителей токов (СОТ) короткого замыкания. Одним из вариантов СОТ является резистивный ограничитель тока, включаемый последовательно с защищаемым устройством.

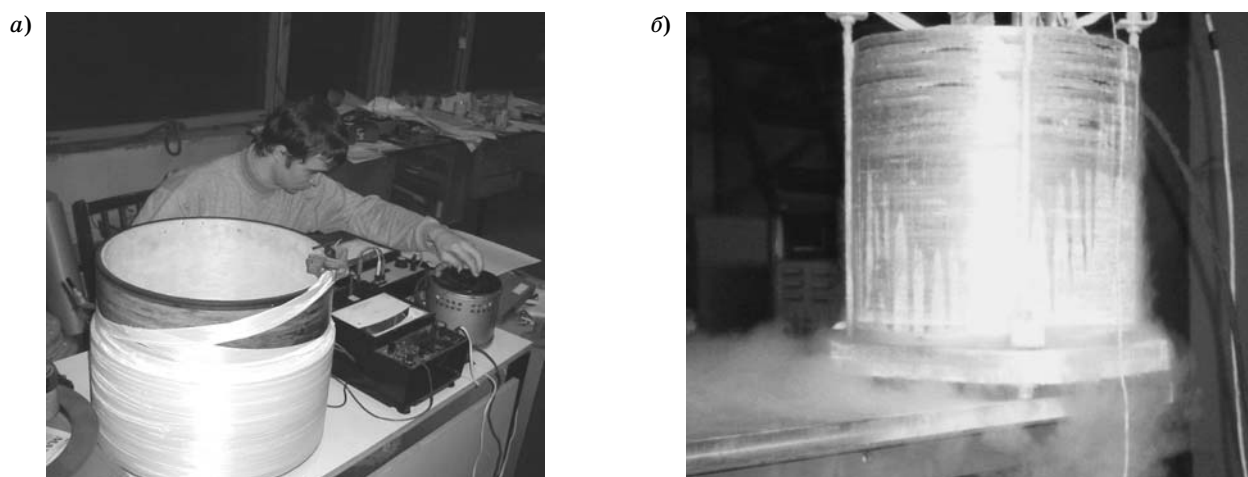
При возникновении режима короткого замыкания сверхпроводник ограничителя тока переходит в резистивное состояние. В результате в защищаемой цепи возникает активное сопротивление матрицы сверхпроводника, что и ограничивает ток короткого замыкания. Именно таким ограничителем планируется защитить разрабатываемый ВТСП-трансформатор.

### Физическое моделирование процессов в сердечнике из аморфной стали

Для оценки влияния низких температур на величину удельных потерь в магнитопроводе ВТСП-трансформатора были проведены исследования сердечника из ленточной нанокристаллической стали 5БДСР при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Общий вид экспериментальной установки и исследуемый сердечник представлены на рис. 7.



■ *Рис. 7. Физическое моделирование процессов в сердечнике: а — общий вид установки; б — сердечник из нанокристаллической стали*



■ *Рис. 8. Физическое моделирование процессов в однофазном ВТСП-трансформаторе: а — при комнатной температуре; б — в среде жидкого азота*

Результаты исследований показывают, что удельные потери нанокристаллической стали марки 5БДСР примерно в 20 раз меньше по сравнению с обычной электротехнической сталью (при комнатной температуре) и практически не изменяются при переходе к азотному уровню температур. У обычных электротехнических сталей при переходе к азотному уровню температур наблюдается значительное увеличение удельных потерь. Это делает нецелесообразным использование таких сталей для сердечников ВТСП-устройств.

После изготовления элементов магнитопровода из нанокристаллической стали необходимо подвергнуть их термообработке в продольном или поперечном магнитных полях для увеличения значения индукции насыщения. Такая термообработка — обязательная часть технологического процесса.

Для проверки расчетных методик, используемых при проектировании трансформатора, была

изготовлена модель однофазного ВТСП-трансформатора и проведены ее экспериментальные исследования. Сердечник модели однофазного трансформатора, на который осуществлялась укладка обмоток из висмутовой ленты Vi-2223/Ag, был выполнен из аморфной стали марки 2НСР. На рис. 8 показано проведение испытаний модели однофазного ВТСП-трансформатора.

Полученные результаты показали хорошее совпадение опытных и расчетных данных, они позволяют делать вывод о стабильной работоспособности разрабатываемого устройства и возможности масштабирования на более высокие мощности.

### Заключение

Математическое моделирование электромагнитных полей показывает, что для разработанной конструкции ВТСП-трансформатора радиальная

составляющая электромагнитного поля минимальна и не оказывает существенного влияния на токнесущую способность ВТСП-ленты. Данные математического моделирования были подтверждены результатами физического моделирования. На основе проведенных исследований выбраны оптимальные размеры магнитопровода и мини-

мальный расход сверхпроводника, а также принято решение о защите ВТСП-трансформатора от токов короткого замыкания при помощи сверхпроводникового ограничителя тока.

Работа проводится при поддержке гранта РФФИ 05-08-50292, НИР ГУАП № 474 и НИР ГУАП № 1.6.04.

### Литература

1. Zizek F. at all. End-Winding Region Configuration of an HTS Transformer // Applied superconductivity. IEEE superconductivity committee. March 2002. Vol. 12. N 1. P. 904–906.
2. Lee S. at all. Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings//Applied superconductivity. IEEE superconductivity committee. March 2002. Vol. 12. N 1. P. 808–811.
3. Andreev E. N. at all. Development of Three-Phase Transformer with HTSC Windings and Amorphous Alloy Cores// ICEM 2006: Proc. Ref. 347. 6 p.
4. Kosareva T. I., Volkov D. A., Korotkov D. A. Analysis of the Wave Electromagnetic Processes in the HTS Transformer's Windings// Wave Electronics and its Applications in the Information and Telecommunication Systems: VIII International Conference for Young Researchers. Preliminary Program and Abstracts. Spb.: SUAI, 2005. P. 118–120.
5. [http://www.wtec.org/loyola/scpa/10\\_01.htm](http://www.wtec.org/loyola/scpa/10_01.htm)
6. [http://www.igc.com/superpower/products/hts\\_components/transformer.htm](http://www.igc.com/superpower/products/hts_components/transformer.htm)

УДК 621.396.946

## СЕТЕВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

**Г. Н. Мальцев,**

доктор техн. наук, профессор

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Дается характеристика современных спутниковых систем связи и основных направлений развития их фиксированной и подвижной служб. Основное внимание уделено тенденции «приближения» абонентов подвижной спутниковой связи к спутниковым каналам, реализация которой неразрывно связана с внедрением в спутниковую связь сетевых информационных технологий. Приводятся примеры использования сетевых информационных технологий в современных высокоорбитальных и низкоорбитальных системах спутниковой связи общего пользования.

*We describe modern satellite communication systems and principal directions of development of their fix and mobile services. Main attention is paid to the tendency of "approaching" of the customers towards the satellite links related to the introduction of network information technologies in satellite communication. We give examples of application of the network information technologies in modern low earth orbit and high earth orbit general purpose satellite communication systems.*

### Введение

Спутниковая связь — один из наиболее динамично развивающихся сегментов мирового рынка телекоммуникаций и одновременно одна из наиболее стабильных областей применения космических средств. В настоящее время трудно найти область деятельности, в которой не могли бы использоваться спутниковые технологии, при этом круг задач, решаемых с использованием систем спутниковой связи, продолжает расширяться. Для России развитие технологий спутниковой связи имеет особое значение, и интерес к новым технологиям обусловлен не только новыми возможностями и услугами связи, но и слабым развитием на значительной части территории страны инфраструктуры наземных телекоммуникационных систем.

Одной из ведущих тенденций современного развития систем спутниковой связи является «приближение» абонентов спутниковой связи к спутниковым каналам. Реализация этой тенденции неразрывно связана с внедрением в спутниковую связь сетевых информационных технологий. Здесь сетевые технологии понимаются в широком смысле — как совокупность стандартизованных методов и технических решений передачи информации в сетевых телекоммуникационных системах.

### Общая характеристика современных спутниковых систем связи

Спутниковые системы связи предназначены для обеспечения радиосвязи между различными пунктами на земной поверхности с использованием спутников-ретрансляторов (СР). Основными преимуществами спутниковой связи по сравнению с другими видами связи являются:

— значительное расширение территории, в пределах которой возможна связь между абонентами, и одновременное использование ими СР;

— высокая пропускная способность радиоканалов спутниковой связи и возможность передачи по ним больших объемов информации;

— возможность обеспечения связью труднодоступных и удаленных районов при практической независимости стоимости спутникового канала от расстояния между абонентами.

Использование СР является развитием принципа радиорелейной связи с тем отличием, что ретрансляционная станция находится в космосе. Тем самым обеспечиваются охват зоной прямой радиовидимости СР значительных территорий земной поверхности, большая дальность и глобальные масштабы спутниковой связи. Один СР, находясь на высоте до нескольких десятков тысяч километров над поверхностью Земли, может обес-



печить прямую ретрансляцию сигналов между пунктами, удаленными друг от друга на тысячи и десятки тысяч километров. А спутниковые системы связи, включающие несколько СР, позволяют решить проблему создания глобальных телекоммуникационных систем и сетей связи [1–3].

Высокая пропускная способность радиоканалов спутниковой связи и возможность передачи по ним больших объемов информации обусловлены использованием в спутниковых системах связи «высокоинформативных» диапазонов — дециметрового и сантиметрового. Благодаря этому пропускная способность одного комплекта бортовой ретрансляционной аппаратуры (транспондера) СР соответствует передаче до сотен стандартных цифровых каналов (64 кбит/с). Основными частотными диапазонами систем спутниковой связи являются 1/2,5 ГГц (L-диапазон), 4/6 ГГц (С-диапазон), 11/14 ГГц (Ku-диапазон), 20/30 ГГц (Ka-диапазон), где первая цифра означает диапазон частот на передачу с Земли на СР, а вторая — диапазон частот на передачу со СР на Землю. Современные СР имеют до нескольких десятков транспондеров, среди которых могут быть транспондеры нескольких частотных диапазонов [1, 2]. В то же время использование частотных диапазонов спутниковой связи в наземных системах связи возможно только в радиорелейных линиях, что требует строительства большого числа ретрансляционных пунктов.

При обеспечении связью труднодоступных и удаленных районов спутниковая связь оказывается более дешевой, чем другие виды связи. В условиях России со столь обширной и протяженной территорией это имеет особенно важное значение. По оценкам специалистов, радиолинию связи через СР можно функционально приравнять к наземной радиорелейной линии протяженностью 7500 км [4]. При этом в системе спутниковой связи используются два наземных терминала и СР, а в радиорелейной линии связи ретрансляционные пункты располагаются через каждые 50–60 км. В результате даже при достаточно высокой стоимости спутниковых систем связи обслуживание ими районов нашей страны восточнее Урала оказывается по крайней мере в 3 раза дешевле, чем при использовании наземных радиорелейных линий связи, и в пределах территории, обслуживаемой одним СР, стоимость канала спутниковой связи практически не зависит от расстояния между терминалами.

Спутниковые системы связи различаются по назначению и орбитальному построению. По назначению можно выделить следующие основные классы систем спутниковой связи:

- системы многоканальной связи и передачи данных,
- системы радио- и телевизионного вещания,
- системы связи и передачи данных специального назначения,

— системы управления и связи с космическими аппаратами.

По орбитальному построению выделяют высокоорбитальные и низкоорбитальные системы спутниковой связи. Высокоорбитальные системы строятся на основе СР на геостационарной (круговая экваториальная орбита с высотой 35 875 км) и высокоэллиптических (вытянутые эллиптические орбиты с высотой около 40 000 км в апогее и около 500 км в перигее и наклоном 63°) орбитах. Низкоорбитальные системы строятся на основе СР на круговых орбитах высотой 500–2000 км с различными наклонами (преобладают околополярные орбиты). В последние годы активно обсуждается вопрос о создании среднеорбитальных систем на основе СР на орбитах высотой около 10 000 км как компромисса между высокоорбитальными и низкоорбитальными системами, однако пока такие системы находятся в стадии разработки [2, 5].

Высокоорбитальные системы являются наиболее распространенными и в полной мере реализуют достоинства спутниковой связи по глобальному охвату земной поверхности зонами обслуживания. Зона обслуживания одного геостационарного СР составляет около трети земной поверхности с центром на экваторе под так называемой точкой стояния СР, однако в приполярных областях связь через геостационарные СР затруднена или невозможна. Размер зоны обслуживания СР на «вытянутой» части высокоэллиптической орбиты также составляет до трети земной поверхности, при этом зона обслуживания вся находится в Северном полушарии и охватывает приполярные области. Продолжительность интервала времени, на котором возможна связь наземных пунктов через один СР на высокоэллиптической орбите, составляет 6–8 ч, после чего необходимо переключаться с «заходящего» СР на «восходящий».

На основе высокоорбитальных СР строятся системы многоканальной связи и передачи данных, системы радио- и телевизионного вещания, а также системы управления и связи с космическими аппаратами (командно-ретрансляционные системы) [1, 6]. Для связи через высокоорбитальные СР в большинстве случаев используются специальные станции спутниковой связи. С увеличением пропускной способности СР и числа транспондеров на каждом СР происходит интеграция спутниковых систем многоканальной связи и вещания. Современные высокоорбитальные СР позволяют предоставлять абонентам пакет мультисервисных услуг: цифровое телевизионное вещание, телефония, видеоконференцсвязь, передача данных, доступ к сети Интернет, создание корпоративных сетей связи. Пропускную способность таких СР принято характеризовать числом эквивалентных транспондеров с полосой пропускания 36 МГц.

Низкоорбитальные системы спутниковой связи длительное время развивались как системы связи и передачи данных специального назначения.

В таких системах пропускная способность радиоканалов невелика (стандартный цифровой канал), непосредственная ретрансляция сообщений возможна только для абонентов, находящихся в пределах географического района на расстоянии до 5000 км, охватываемого зоной радиовидимости СР, а для связи с абонентами, находящимися на больших расстояниях, используется ретрансляция с переносом (электронная почта). Основное достоинство низкоорбитальных систем по сравнению с высокоорбитальными — малая протяженность радиоканалов, что позволяет использовать маломощную и малогабаритную терминальную и ретрансляционную аппаратуру. Другим достоинством таких систем является относительно низкая стоимость самого СР и его вывода на орбиту.

В последние годы повышенный интерес проявляется к низкоорбитальным многоспутниковым системам связи и командно-ретрансляционным системам, включающим до нескольких десятков СР [2, 7]. В них сочетаются достоинство малой протяженности радиоканалов связи через СР с возможностью глобального охвата земной поверхности и околоземного космического пространства зонами обслуживания СР, объединенными в сетевую структуру межспутниковыми радиоканалами. В таких системах абонентам предоставляются услуги телефонной связи и передачи данных и впервые был провозглашен принцип персональной спутниковой связи, поскольку абонентские терминалы для связи через низкоорбитальные СР приближаются по размерам к обычной телефонной трубке. К реализации этого же принципа или, по крайней мере, к наибольшему «приближению» абонента к спутниковому каналу стремятся сегодня и разработчики систем спутниковой связи на основе высокоорбитальных СР. Этот процесс получил название «демократизации» услуг спутниковой связи.

### Службы и операторы спутниковой связи

Все системы спутниковой связи принято делить на три службы: фиксированной связи, подвижной связи и спутникового вещания [1, 3]. Обслуживание абонентов осуществляется службами фиксированной и подвижной связи, при этом современные тенденции развития спутниковой связи способствуют сближению и интеграции всех трех служб. Развитие технологий интерактивной спутниковой связи приводит к объединению понятий вещания и связи в мультисервисных спутниковых сетях, а появление портативной мобильной абонентской аппаратуры приводит к стиранию границ между фиксированной и подвижной службами связи.

Фиксированная спутниковая связь (ФСС) подразумевает организацию связи с использованием терминалов (земных станций), которые устанавливаются в определенном месте и имеют постоянную географическую привязку. Сети ФСС строятся

на основе высокоорбитальных СР, и их можно разделить на две группы: магистральные сети и сети, созданные на базе VSAT-технологий (VSAT — Very Small Aperture Terminal).

Магистральная связь является первичной задачей ФСС, с решением которой было связано начало развития спутниковой связи [1, 4]. При использовании систем спутниковой связи для организации магистральных линий по спутниковым каналам осуществляется двусторонняя передача интегрированных потоков информации с последующим ее распределением по наземным сетям, при этом абоненты не получают непосредственного доступа к спутниковым каналам.

VSAT-технологии предполагают использование наземных малогабаритных терминалов спутниковой связи для предоставления абонентам в некоторой зоне обслуживания услуг телефонии, передачи данных и доступа в Интернет [1]. Станции VSAT предназначены для создания наземных сетей связи, где группы абонентов, хотя и не имеют непосредственного доступа к спутниковому каналу, работают через «свою» станцию VSAT, которая решает, таким образом, проблему «последней мили» для персональной спутниковой связи.

Подвижная спутниковая связь (ПСС) подразумевает предоставление услуг связи мобильным объектам, оборудованным терминалами спутниковой связи, в том числе непосредственно конечным абонентам. В качестве дополнительной услуги во всех системах ПСС, как правило, предполагается возможность определения географических координат абонента [8, 9]. В сетях ПСС на основе высокоорбитальных СР услуги связи и передачи данных предоставляются либо непосредственно через мобильные терминалы спутниковой связи, либо через сеть станций, обеспечивающих доступ к спутниковым каналам абонентам в некотором регионе. В сетях ПСС на основе низкоорбитальных СР услуги связи и передачи данных предоставляются непосредственно абонентам с помощью портативной терминальной аппаратуры типа радиотелефона.

Первоначально технология персональной спутниковой связи с помощью абонентского терминала типа радиотелефона была реализована в низкоорбитальных системах спутниковой связи, но не имела коммерческого успеха. В дальнейшем достижения в области разработки элементной базы для наземной и бортовой аппаратуры спутниковой связи позволили реализовать персональную связь абонентов с помощью портативных радиотелефонов через геостационарный СР. В результате системы спутниковой связи стали реально конкурировать с наземными сотовыми системами связи.

Зарубежные спутниковые системы связи с самого начала своего существования развивались на коммерческой основе и предоставляли свои услуги через операторов спутниковой связи. Зарубежный рынок спутниковой связи представлен круп-

ными международными системами связи, зонами обслуживания которых перекрываются практически все регионы земного шара, и системами спутниковой связи отдельных стран. Отечественные системы спутниковой связи первоначально развивались как государственные системы, их переход на коммерческую основу произошел в 90-х годах. Благодаря этому переходу, а также возможности точного учета предоставляемых услуг российские системы спутниковой связи в последние годы динамично развивались — сохранилась их орбитальная группировка, в настоящее время осуществляется переход на СР нового поколения. Для сравнения: российская глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС поддерживается в настоящее время в 50-процентном составе, и для ее восстановления принята Федеральная целевая программа.

Российские операторы спутниковой связи имеют достаточно стабильные позиции на рынке ФСС, где услуги связи предоставляют ФГУП «Космическая связь» и ОАО «Газком». ФГУП «Космическая связь» обладает самой крупной в России орбитальной группировкой, включающей более десятка геостационарных СР типа «Горизонт» и «Экспресс». Система получает государственную поддержку и частично финансируется из госбюджета. ОАО «Газком» обладает в настоящее время системой спутниковой связи, состоящей из трех геостационарных СР типа «Ямал». Развитие системы осуществляется по принципу проектного финансирования с привлечением внебюджетных инвестиций газовой отрасли.

В настоящее время российскими операторами ФСС осуществляется переход к использованию СР нового поколения, обеспечивающих предоставление абонентам кроме многоканальной телефонии современных услуг связи: передачу данных, скоростной доступ в Интернет, создание наземных сетей VSAT. Такими СР нового поколения являются СР «Экспресс-АМ22» и «Ямал-202», имеющие пропускную способность в 36 эквивалентных транспондеров и срок службы 12 лет. СР оборудованы фиксированными и перенацеливаемыми антеннами, обеспечивающими устойчивое покрытие зон обслуживания и их расширение с учетом пожеланий заказчиков [5].

Услуги ПСС в России предоставляет ЗАО «Гонец», являющееся оператором низкоорбитальной системы спутниковой связи, использующей СР «Гонец» на круговых орбитах высотой 1000 км. Система имеет глобальную зону обслуживания и предназначена для ретрансляции сообщений (в пределах одной зоны обслуживания) и передачи данных в пакетном режиме в режиме электронной почты (за пределы зоны обслуживания). В настоящее время планируется расширение состава орбитальной группировки системы «Гонец» с 6 до 12 СР. Уступая зарубежным низкоорбитальным системам по набору услуг связи, система «Гонец»

успешно функционирует, занимая свой сектор обслуживания среди российских телекоммуникационных систем [2].

Среди крупных зарубежных операторов ФСС отметим международное акционерное общество Intelsat и европейскую компанию Eutelsat. В организацию крупнейшего мирового оператора спутниковой связи Intelsat входят в настоящее время более 140 стран, а еще более 50 стран пользуются ее услугами. В системе используются геостационарные СР «Intelsat», на основе которых многими странами строятся национальные сети связи и вещания. СР серии «Intelsat» имеют пропускную способность до 94 эквивалентных транспондеров, срок службы до 13 лет, глобальные, фиксированные и перенацеливаемые антенны. В организацию Eutelsat входят 47 стран. В системе используются геостационарные СР «Eutelsat» и «SeSat», имеющие пропускную способность в 16–24 эквивалентных транспондеров, срок службы до 12 лет, фиксированные и перенацеливаемые антенны. Кроме того, Eutelsat арендует каналы СР ряда европейских стран. Один из СР «Eutelsat» используется ФГУП «Космическая связь» в российской национальной вещательной сети.

Особенно интенсивно развиваются в последние годы зарубежные системы ПСС. Предоставление услуг персональной спутниковой связи предусматривается в четырех развернутых системах ПСС: Inmarsat, Iridium, Globalstar, Thuraya. Все эти системы ориентированы на предоставление услуг связи с непосредственным доступом абонента к спутниковому каналу [5, 8].

Международная организация Inmarsat была первым оператором мобильной спутниковой связи в мире. Геостационарные СР «Inmarsat» обеспечивают работу системы спутниковой связи для подвижных морских, воздушных и наземных служб. Абоненты получают доступ к спутниковым каналам с использованием специальных терминалов. Связь между абонентами и выход в сети общего пользования осуществляется через береговые (базовые) станции. В системе функционируют более 200 береговых станций, расположенных в различных регионах мира [8]. Предусмотрено несколько стандартов спутниковой связи в режимах телефонии, телеграфии и передачи данных. Вхождение в связь осуществляется полностью в автоматическом режиме.

Системы Iridium и Globalstar относятся к многоспутниковым сетевым низкоорбитальным системам связи. Обе системы были развернуты в полном составе и введены в конце 90-х годов в эксплуатацию, которая высветила проблемы рентабельности таких систем, поскольку скорость передачи информации в них не превышает десятка килобит в секунду, а стоимость услуг связи высока по сравнению с тарифами наземных сотовых систем связи. В настоящее время в коммерческой эксплуатации остается система Globalstar, система Iridium

передана Министерству обороны США и используется как система двойного (специального и коммерческого) назначения.

Система Iridium состоит из 66 СР, находящихся на круговых орбитах высотой 780 км и связанных между собой межспутниковыми каналами. В любой точке на поверхности Земли система предоставляет услуги персональной телефонной связи. Абоненты имеют непосредственный доступ к спутниковому каналу с помощью терминала типа телефонной трубки. Система Globalstar состоит из 48 СР, находящихся на круговых орбитах высотой 1400 км. Система предоставляет услуги телефонной связи и передачи данных и охватывает зоной обслуживания практически все населенные регионы мира. Абоненты получают доступ к спутниковым каналам через одну из станций сопряжения. Предусмотрено использование стационарных, мобильных и персональных абонентских терминалов.

Наконец, самой современной системой персональной связи является система Thuraya. Система построена на основе геостационарных СР «Thuraya», связь через которые осуществляется с помощью портативных абонентских терминалов. В системе обеспечивается поддержка всех видов связи, используемых в наземных системах сотовой связи, а также предусмотрено сопряжение с сотовым стандартом GSM с его адаптацией для спутниковой технологии. В настоящее время на орбите работают 2 СР «Thuraya». Спутниковые каналы системы Thuraya арендует система Inmarsat для предоставления услуг связи в региональных сетях, сопрягаемых с наземными сотовыми сетями. Начало эксплуатации системы Thuraya знаменует начало слияния сотовых и спутниковых сетей связи. Это становится возможным благодаря использованию высокотехнологичного наземного и бортового оборудования. Энергетический потенциал транспондера СР «Thuraya» обеспечивает возможность вхождения с ним в связь с помощью спутникового радиотелефона, при этом сигнальный процессор СР поддерживает до нескольких десятков тысяч телефонных линий связи. Спутниковый радиотелефон системы Thuraya соединяет в себе абонентский терминал спутниковой связи, сотовый телефон стандарта GSM-900 и навигационный GPS-приемник.

Наличие десятков транспондеров с управляемых сигнальными процессорами и использование узконаправленных перенацеливаемых антенн даже при реализации в коммутируемых каналах «прозрачной» ретрансляции делает геостационарные СР нового поколения космическими узлами связи глобальных сетевых телекоммуникационных систем. Что же касается низкоорбитальных спутниковых систем связи, то они изначально были ориентированы на реализацию сетевых технологий. Многоспутниковый сетевой принцип построения низкоорбитальных систем спутниковой связи в виде сетевой структуры, состоящей из не-

скольких десятков СР, является единственно возможным при характерных для них малых зонах обслуживания каждого СР и находит свое выражение в формулировке «все или ничего».

### Сетевые технологии современных систем спутниковой связи

Можно выделить два основных направления развития сетевых технологий спутниковой связи: во-первых, интеграция систем спутниковой связи с наземными сетями связи и передачи данных, во-вторых, организация связи по спутниковым каналам с использованием сетевых технологий. В качестве основных сетевых технологий современных систем спутниковой связи, «приближающих» абонентов к спутниковым каналам и услугам спутниковой связи, рассмотрим:

- VSAT-технологии;
- технологии непосредственного доступа абонентов к СР;
- технологии интерактивного спутникового доступа к Интернету;
- сетевые технологии низкоорбитальных спутниковых систем связи.

Первые три направления соответствуют использованию в системах спутниковой связи сетевых технологий передачи данных в части, обеспечивающей сопряжение спутниковых каналов с наземными сетями связи. Четвертое направление связано с построением всей системы спутниковой связи с использованием сетевых технологий.

Использование VSAT-технологий признается сегодня одним из наиболее выгодных с экономической точки зрения решений в области предоставления услуг связи конечному абоненту и доступа к глобальным и локальным информационным ресурсам. Абонентами станций VSAT могут быть как небольшие группы абонентов, «привязанные» к отдельной станции, так и крупные организации, эксплуатирующие сети станций VSAT. В России развитие технологий VSAT связано с появлением отечественных СР нового поколения типа «Экспресс» и «Ямал» с высокими пропускной способностью и энергетическим потенциалом, а также с созданием отечественных наземных станций VSAT, позволяющих решать широкий круг задач связи и вещания (телефония, передача данных, организация спутниковых каналов связи, в том числе для доступа в Интернет, создание наземных телекоммуникационных сетей). Станции VSAT имеют антенные системы диаметром 1–2 м и обеспечивают скорости обмена данными через СР от 2 до 50 Мбит/с на прием и от 64 кбит/с до 2 Мбит/с на передачу. При использовании в составе сети эти скорости характеризуют станции VSAT как сетевые маршрутизаторы с поддержкой стека IP-протоколов.

В современных станциях VSAT обеспечивается возможность создания асимметричных каналов, необходимых, например, для организации эффективного доступа в Интернет и позволяющих опти-

мальным образом использовать частотный ресурс СР при изменяющейся интенсивности трафика. Другим перспективным направлением развития станций VSAT является использование в них технологии SkyFrame для сопряжения с наземными сетями FrameRelay. Это позволяет реализовать протоколы совместной передачи голоса и данных в соответствии с установленными приоритетами.

Если VSAT-технологии лишь «приближают» конечного абонента к спутниковому каналу, то технологии непосредственного доступа к СР напрямую предоставляют абонентам услуги персональной спутниковой связи. Основными областями применения систем персональной спутниковой связи с непосредственным доступом абонентов к СР являются: обеспечение связью удаленных регионов с неразвитой телекоммуникационной инфраструктурой; контроль состояния и местоположения подвижных средств; промышленный, экологический и научный мониторинг. Персональная спутниковая связь незаменима при оказании услуг экстренной помощи, позволяющих определить местонахождение и состояние мобильных абонентов в чрезвычайных обстоятельствах и в тех случаях, когда этого требует ситуация.

Возможности современных систем персональной спутниковой связи позволяют осуществить быструю телефонизацию и информатизацию всех видов транспорта, а также удаленных населенных пунктов, которые не входят в зоны покрытия наземных сотовых сетей связи. Операторами систем подвижной спутниковой связи предлагается несколько систем мониторинга подвижных объектов с использованием спутниковых радиотелефонов, совмещенных с навигационными приемниками GPS/ГЛОНАСС. Функционирование систем мониторинга с предоставлением услуг диспетчерской связи, телефонии и передачи формализованных сообщений позволяет существенно повысить надежность, безопасность и управляемость транспортных средств.

Ни одно из направлений развития телекоммуникаций не развивается сегодня так стремительно, как технологии доступа к информационным ресурсам Интернета. Роль спутниковой связи не ограничивается простым использованием спутниковых каналов для передачи информации из опорной сети пользователям. Доступ в Интернет по спутниковому каналу выгоден конечному абоненту, поскольку при этом он получает доступ к первичному провайдеру и, следовательно, плата за предоставляемую информацию будет минимальна, а соединение — качественным и надежным.

Для доступа абонентов к информационным ресурсам Интернета по спутниковым каналам в настоящее время в мире интенсивно развиваются так называемые интерактивные сети спутникового доступа. Они строятся, в основном, на базе станций VSAT, удовлетворяющих специальным системным и техническим требованиям DVB-RCS по

поддержанию асимметричных дуплексных спутниковых каналов (для передачи характерного для доступа в Интернет несимметричного трафика) и приема цифрового спутникового вещания в стандарте DVB-S. Анализ экономической эффективности систем интерактивного спутникового доступа показывает, что при наличии соответствующего оборудования интерактивный доступ в Интернет по спутниковым каналам для конечного абонента более выгоден, чем работа по коммутируемой наземной телефонной сети связи, но уступает работе по выделенной линии связи.

Известным препятствием для развития сетей VSAT и интерактивных сетей спутникового доступа в настоящее время является сложность существующих правил оформления разрешительных документов на эксплуатацию приемопередающих спутниковых терминалов. Зарубежный опыт показывает возможность упрощения процедуры регистрации спутниковых терминалов и дифференцирования стоимости оборудования и предоставляемых услуг для различных абонентов (пользователей) в интересах массового использования и развития новых технологий.

Низкоорбитальные системы спутниковой связи рассматриваются в настоящее время как важное дополнение к существующим системам спутниковой связи с высокоорбитальными СР. Применение низкоорбитальных СР позволяет обеспечить спутниковой связью удаленные регионы, обеспечить непосредственный доступ абонентов к спутниковым каналам и использовать в процессе информационного обмена через СР новые технологии связи и передачи данных (пакетный режим передачи, электронная почта, обработка информации в бортовой ретрансляционной аппаратуре).

В низкоорбитальных многоспутниковых системах связи, включающих до нескольких десятков СР, связанных межспутниковыми радиоканалами, сетевые информационные технологии являются основой организации связи в самой системе, представляющей собой спутниковую радиосеть. Низкоорбитальные СР представляют собой узлы коммутации и маршрутизации информационных потоков и сообщений и реализуют более сложный по сравнению с «прозрачной» ретрансляцией, используемой на высокоорбитальных СР, режим ретрансляции с обработкой информации [10]. При этом отличительной особенностью низкоорбитальных сетевых систем спутниковой связи является динамическое изменение топологии сети, что приводит к появлению при проектировании таких систем ряда новых проблем — обеспечения связности и поддержания альманаха сети, выбора алгоритмов маршрутизации сообщений, аутентификации абонентов и других. Потому по сравнению с наземными радиосетями низкоорбитальные сетевые спутниковые системы характеризуются более сложными алгоритмами управления информационными потоками и маршрутизации сообщений.

В общем случае сетевые технологии информационного обмена между абонентами реализуются в низкоорбитальных системах спутниковой связи с использованием различных вариантов ретрансляции сообщений [2, 7]:

- с непосредственной ретрансляцией;
- с переносом информации (режим электронной почты);
- с космическим сегментом ретрансляции (по межспутниковым каналам);
- с наземным сегментом ретрансляции (через промежуточную земную станцию).

Портативные (носимые) абонентские терминалы низкоорбитальной спутниковой связи представляют собой компактные и легкие устройства со слабонаправленными антеннами, позволяющими при установке их на транспортных средствах вести связь в движении. Обслуживаемые терминалы типа малогабаритных радиомодемов обеспечивают пакетную передачу данных и дуплексную речевую связь. Необслуживаемые терминалы обеспечивают автоматическую передачу данных и предназначены для автономной работы в системах мониторинга и сбора различных видов информации. Одновременно абонентские терминалы сопрягаются с наземными сетями связи и с ПЭВМ и поддерживают используемые в них протоколы обмена информацией. Растущие информационные потребности общества в недалеком будущем, несомненно, приведут к увеличению числа потенциальных абонентов (потребителей) систем персональной спутниковой связи на основе низкоорбитальных СР.

### Заключение

Развитие систем спутниковой связи отвечает современным потребностям в услугах телекоммуникационных систем общества в целом, отдельных ведомств (организаций) и конечных абонентов. Однако рынок связи спутниковые системы сегодня завоевывают в острой конкурентной борьбе с наземными системами: системы ФСС — с высокоскоростными волоконно-оптическими линиями связи, а системы ПСС — с системами сотовой радиосвязи. Поэтому внедрение в системы спутниковой связи новых сетевых информационных технологий связано не только с техническим прогрессом, но и с конкурентной борьбой за конечного абонента.

Одновременно расширяются потребности в использовании спутниковых каналов для решения

специальных задач — передачи сигналов управления в распределенных системах, сбора и передачи данных дистанционного зондирования Земли, оказания телематических услуг и мониторинга экологических процессов. При этом для большинства перспективных направлений использования спутниковых каналов ставится задача непосредственного доступа к ним с помощью обслуживаемых и необслуживаемых абонентских терминалов. Дополнительный импульс развитию спутниковой связи в России придает принятие Федерального закона «О связи», определяющего базовые услуги связи, которыми должны быть обеспечены все удаленные, труднодоступные и малонаселенные пункты, в том числе с использованием рассмотренных технологий, «приближающих» каналы спутниковой связи к конечному абоненту.

### Литература

1. Спутниковая связь и вещание: Справочник / В. А. Бартечев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др.; Под ред. Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
2. Невдяев Л. М., Смирнов А. А. Персональная спутниковая связь. М.: Эко-Трендз, 1998. 216 с.
3. Аболиц А. И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность / ИТИС. М., 2004. 426 с.
4. Авдудевский В. С., Успенский Г. Р. Народнохозяйственные и научные космические комплексы. М.: Машиностроение, 1985. 416 с.
5. Андрианов В. И., Соколов А. В. Средства мобильной связи. СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 2001. 256 с.
6. Кравец В. Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
7. Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами / МГУЛ. М., 2003. 200 с.
8. Цифровые терминалы спутниковых систем связи: Справ. издание / А. А. Ильин, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов. СПб.: Деан. 192 с.
9. Смирнов Д. А., Худяков Г. И., Шипалов М. М. Телекоммуникационные сети и информационно-управляющие системы: Словарь-справочник / СПбГУТ. СПб., 2001. 208 с.
10. Управление информационными потоками в спутниковых радиосетях / Н. А. Важенин, Ю. М. Галантерник, В. М. Тамаркин, Д. В. Усков; МАИ. М., 1993. 48 с.

УДК 007:004.3

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ РИСКА

**В. В. Сафронов,**

доктор техн. наук, профессор

ОАО «КБ Электроприбор»

**Ю. В. Ведерников,**

канд. техн. наук, доцент

**В. В. Матросов,**

соискатель

**С. А. Умеренков,**

соискатель

**А. М. Кравцов,**

соискатель

Михайловская военная артиллерийская академия

Рассматривается оптимизация сложной технической системы на начальных стадиях ее жизненного цикла в условиях риска. Задача сводится к построению упорядоченного множества (подмножества) Парето. Предлагается метод решения, основанный на комплексном применении методов теории принятия решений, ветвей и границ, интервального анализа.

We study the optimization of a complex technical system at an early stage of its life cycle in the conditions of risk. The problem is reduced to the construction of an ordered Pareto set (subset). We propose a solution based on a complex application of methods of the decision making theory, the branch and bound method, and interval analysis.

### Введение

Важной задачей, решаемой на ранних этапах проектирования сложных технических систем (СТС), является задача выбора оптимального варианта структуры СТС из множества возможных вариантов, который удовлетворял бы всем предъявляемым к нему требованиям.

При этом разработчик поставлен перед необходимостью принимать решения в условиях риска, так как любое нерациональное решение, принятое на этих этапах, никогда не позволит получить систему высокого качества. Это обусловлено сложной динамикой объекта управления и его внешнего окружения, ролью человеческого фактора в процессе проектирования — в результате математическая модель будущей системы оказывается недостаточно адекватной реальности [1].

Известно, что *неопределенность* проявляется тогда, когда результатом действия является набор возможных альтернатив, вероятность получения которых неизвестна. *Риск* имеет место, если действие приводит к набору альтернатив, причем

вероятность осуществления каждой из них известна. Отсюда следует, что риск есть неопределенность, которую можно формализовать.

Традиционным способом решения задач в *риск-ситуации* является использование вероятностного подхода [2]. К его недостаткам следует отнести то, что риск выбора неоптимального решения даже при достоверном решении задачи сохраняется, также велика трудность формирования исходных данных и присвоения им вероятностей (порою это становится вообще невозможно). Для преодоления трудностей и недостатков, рассмотренных выше, предлагается метод «интервального» ранжирования. Основная идея этого метода заключается в использовании в риск-ситуации специальных интервальных величин как самостоятельных целостных объектов, между которыми в соответствии со смыслом задачи вводятся операции и отношения в терминах границ интервалов. Эти интервальные величины должны полностью характеризовать риск-ситуацию заданием диапазона изменения качества СТС от лучшего до худшего таким

образом, чтобы все возможные исходы от принятых решений попали в этот диапазон.

Впервые задачи оптимизации в интервальной постановке рассмотрел А. А. Ватолин [3], который сформулировал для них определение множества решений. Математическим и вычислительным аспектам анализа статических систем в условиях интервальной неопределенности посвящена работа С. П. Шарыя [4]. Постановка и решение ряда задач непрерывной и дискретной оптимизации в условиях интервальной неопределенности представлены в работах В. И. Левина [5].

В данной статье предлагается метод решения задачи построения множества (подмножества) эффективных систем по совокупности критериев, заданных интервалами возможных значений, основанный на развитии идей, изложенных в работах [6, 7]. С этой целью:

- показаны возможные подходы к сравнению интервалов;
- предложен метод принятия решений по критерию, заданному в интервальном виде;
- раскрыты особенности решения задачи со многими критериями, заданными в интервальном виде.

При решении поставленной задачи будем использовать специальную интервальную арифметику Каухера в терминах концов интервалов [8].

### Математическая постановка задачи

Введем необходимые для постановки задачи обозначения:

- $C = \{C_i, i = \overline{1, q}\}$  — множество вариантов базовых систем, которое может быть получено, например, с использованием известного метода морфологического ящика Цвикки;

- $G_j(X_i, \Gamma_i)$  — граф системы  $C_i$ , где  $X_i = \{x_j, j \in N_i\}$  — множество вершин, определяющих подсистемы, которые входят в состав  $C_i$ ;  $N_i$  — множество номеров подсистем  $i$ -й базовой системы;  $\Gamma_i = \{\Gamma x_j, \Gamma x_j^{-1}, j \in N_i\}$  — отображение множества  $X_i$  на  $X_i$ ;  $\Gamma x_j, \Gamma x_j^{-1}$  — соответственно прямое и обратное отображения вершины  $x_j$ ;

- $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$  — множество возможных вариантов технической реализации СТС, где  $n = \sum_{i=1}^q \prod_{j \in N_i} g_j$ ,  $g_j$  — число вариантов технической реализации  $r_{jl}$  подсистемы  $x_j$ ,  $l = \overline{1, q_j}$ ;

- $K_j(S_\alpha) = [K_j(S_\alpha); \overline{K_j(S_\alpha)}]$  — частные критерии качества, заданные в интервальном виде, характеризующие систему  $S_\alpha$ , где  $\underline{K_j(S_\alpha)}$  — нижний конец интервала, а  $\overline{K_j(S_\alpha)}$  — верхний конец интервала,  $j = \overline{1, r}$ ,  $\alpha = \overline{1, n}$ ;

- $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\} = \{\underline{K_1(S_\alpha)}$ ;

$\overline{K_1(S_\alpha)}], [K_2(S_\alpha); \overline{K_2(S_\alpha)}], \dots, [K_r(S_\alpha); \overline{K_r(S_\alpha)}]\}$  —

векторный критерий, характеризующий систему  $S_\alpha$ ;

- $A = \{a_j, j = \overline{1, r}\}$  — множество коэффициентов важности критериев  $K_j(S_\alpha)$ ;

- $D^0 = \{D_1^0, D_2^0, \dots, D_m^0\}$  — множество значений констант ограничений.

В общем случае для технической реализации системы должно выполняться условие совместности [6]

$$A_k(S_\alpha) * A_j(S_\alpha), k \in N_i, j \in N_i, \quad (1)$$

где  $A_k(S_\alpha), A_j(S_\alpha)$  — множества, характеризующие особенности вариантов технической реализации подсистем, входящих в состав системы  $S_\alpha$ , с точки зрения возможности их сопряжения друг с другом. Например, они могут отражать характер входного и выходного сигналов, алгебраические языки, число допустимых входов и выходов, характер перерабатываемой информации и т. д. Индекс  $k$  относится к выходам подсистем, а  $j$  — к входам; знак \* описывает определенное соотношение между функциями, которое должно обязательно выполняться, например, равенство, неравенство или некоторые функциональные зависимости.

Кроме условий совместности необходимо учитывать множество ограничений, накладываемых на технико-эксплуатационные характеристики (ТЭХ) (надежность, стоимость и т. д.) системы. Эти ограничения могут быть заданы в виде

$$\sum_{r_{jl} \in S_\alpha} d_{j\gamma}(r_{jl}) \leq D_\gamma^0, \gamma = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где  $d_{j\gamma}(r_{jl})$  — ТЭХ реализации  $r_{jl}$  ( $j \in N_i, l = \overline{1, g_j}$ );

- $P$  — множество эффективных систем, расположенных в порядке убывания приоритета (упорядоченное множество). Такое множество назовем кортежем Парето [6]. Число элементов множества равно  $n^p$ ,  $P \subseteq S_D$ , где  $S_D \subseteq S$  — множество допустимых систем, для которых выполняются условия (1), (2);

- $P_R$  — подмножество эффективных систем, расположенных в порядке убывания приоритета. Такое подмножество назовем подкортежем Парето [6]. Число элементов подмножества равно  $R$ ,  $P_R \subset P$ ;

- $S_p^0 \in P$  ( $S_p^0 \in P_R$ ) — системы, которые входят в множество (подмножество) эффективных решений,  $p \in \{1, 2, \dots, n\}$ .

С учетом введенных обозначений сформулируем задачу.

Допустим, даны множества  $A, D^0$ , выражения для вычисления элементов множеств  $K(S_\alpha), D(S_\alpha)$ , решающие правила [6]. Требуется найти кортеж Парето  $P$ , для элементов которого справедливо



$$K(S_p^0) = \min_{S_\alpha \in S} K(S_\alpha), S_p^0 \in P \quad (3)$$

при выполнении условий (1), (2).

Если строится подмножество эффективных решений, то задача с учетом исходных посылок заключается в следующем. Требуется найти подкортеж Парето  $P_R$ , для элементов которого справедливо

$$K(S_p^0) = \min_{S_\alpha \in S} K(S_\alpha), S_p^0 \in P_R \quad (4)$$

при выполнении условий (1), (2).

Прежде чем раскрыть особенности решения задач (3), (4) при выполнении условий (1), (2), рассмотрим возможные методы сравнения интервалов и метод решения задачи оптимизации структуры СТС по одному критерию, заданному в интервальном виде.

### Способы сравнения интервалов

Для решения поставленных задач необходимо уметь сравнивать интервалы и ранжировать их по важности (т. е. располагать в порядке убывания приоритета).

Допустим, даны два интервала:  $B = [\underline{b}; \bar{b}]$  и  $C = [\underline{c}; \bar{c}]$ , где черта снизу или сверху означает взятие нижнего или верхнего концов интервалов соответственно [4]. Воспользуемся для сравнения интервалов методами теории принятия решений. Для выбора лучшего, с точки зрения лица, принимающего решение, интервала необходимо ввести (как в многокритериальных задачах) решающие правила. При оптимизации структуры СТС по критериям, заданным интервалами значений, к числу задач, где необходимо многократно осуществлять выбор, в частности, относят:

- 1) отыскание из множества градиентов максимального градиента, заданного интервалами значений;
- 2) выбор минимальной из множества оценок, заданных интервалами значений;
- 3) выбор вершины-кандидата на дальнейшее ветвление, лучшей по совокупности критериев, заданных интервалами значений;
- 4) ранжирование систем по совокупности критериев, заданных интервалами значений.

Задачи 1, 2 сводятся к проблеме сравнения интервалов, а задачи 3, 4 — к проблеме сравнения систем, которые характеризуются критериями, заданными в интервальном виде. Рассмотрим возможные подходы к решению этих проблем.

Обозначим:

$I = \{1, 2, \dots, M\}$  — множество номеров сравниваемых интервалов;

$K = \{K(i) = [\underline{K}(i); \bar{K}(i)], i = \overline{1, M}\}$  — множество сравниваемых интервалов;

$b_{1i}, b_{2i}$  — соответственно коэффициенты важности нижнего и верхнего концов  $i$ -го интервала ( $i = \overline{1, M}$ ).

Необходимо найти упорядоченное множество  $P_I$  номеров эффективных интервалов, для элементов  $i_p^0$  которого справедливо условие (5) или условие (6), в зависимости от смысла задачи:

$$K(i_p^0) = \min_{i \in I} [K(i)], i_p^0 \in P_I; \quad (5)$$

$$K(i_p^0) = \max_{i \in I} [K(i)], i_p^0 \in P_I. \quad (6)$$

Для решения уравнений (5), (6) воспользуемся методом «жесткого» ранжирования [6] с учетом коэффициентов важности концов интервалов. Заметим, что номер лучшего интервала является первым элементом множества  $P_I$ . Как правило, ранжировать остальные интервалы во многих задачах и не требуется.

Рассмотрим задачу ранжирования систем  $S_\alpha$ ,  $\alpha = \overline{1, n}$ , которые характеризуются критериями  $K_j(S_\alpha)$ , заданными в интервальном виде, с соответствующими коэффициентами важности нижнего  $a_{1j}$  и верхнего  $a_{2j}$  концов интервалов,  $j = \overline{1, r}$ . Задача сводится к построению множества эффективных упорядоченных систем  $P_s$ , для элементов которого справедливо

$$K(S_p^0) = \min_{S_\alpha \in S_D} K(S_\alpha), S_p^0 \in P_s. \quad (7)$$

Каждый критерий задается в интервальном виде, т. е. задача является многовекторной [9]. Для решения задачи (7) воспользуемся методом многовекторного ранжирования [10].

Таким образом, уравнения (5), (6) могут быть решены методом «жесткого» ранжирования, а уравнение (7) — методом многовекторного ранжирования. Для удобства дальнейшего изложения указанные методы будем называть, соответственно, метод 1, метод 2.

### Оптимизация сложной технической системы по скалярному критерию, заданному в интервальном виде

Для решения однокритериальных и сводимых к ним задач оптимизации структуры СТС используется метод ветвей и границ (МВГ) [11]. Рассмотрим особенности применения МВГ для решения задачи выбора оптимальной структуры СТС по критерию, заданному интервалом возможных значений.

Допустим, имеем единственный критерий, заданный в интервальном виде:  $K(S_\alpha) = [\underline{K}(S_\alpha); \bar{K}(S_\alpha)]$ , т. е.  $r = j = 1$ .

Тогда задача оптимизации структуры СТС формулируется следующим образом. Требуется из множества  $S$  выбрать такую систему  $S_\alpha^0 \in S$ , для которой справедливо

$$K(S_\alpha^0) = \min_{S_\alpha \in S} [\underline{K}(S_\alpha); \bar{K}(S_\alpha)] \quad (8)$$

при выполнении условий (1), (2).

Комбинаторный характер задачи, необходимость учета связей между подсистемами, критерия, заданного в интервальном виде, явились причиной разработки метода, основанного на совместном применении аппарата теории графов, МВГ, интервального анализа. Для МВГ основной является задача определения оценки и способа ветвления. В процессе поиска оптимального решения используем схему ветвления Лэнда и Дойга [11]. Однако очередность ветвления будем определять графом структуры.

Основная идея вычисления оценки заключается в следующем. Допустим, для  $i$ -й базовой системы оцениваются вершины  $\beta$ -го уровня ветвления ( $\beta = \overline{1, d_i}$ ), где  $d_i$  — число элементов множества  $N_i$ . Каждая из вершин представляет собой конкретный вариант реализации подсистемы, рассматриваемой на  $\beta$ -м уровне ветвления. В общем случае номера уровней ветвления и номера подсистем могут не совпадать. Поэтому обозначим  $j(\beta)$  — номер подсистемы  $\beta$ -го уровня ветвления. При решении задачи оптимизации системы существенным моментом является построение изменяющегося (динамического) множества  $M_i^\beta$  допустимых вариантов реализации подсистем, на котором и строится оценка.

Для построения такого множества необходимо:  
 — по графу системы определить связи рассматриваемой подсистемы  $x_{j(\beta)}$  с другими подсистемами, т. е. найти множества  $\Gamma x_{j(\beta)}$ ,  $\Gamma x_{j(\beta)}^{-1}$ ;  
 — проверить условие совместимости (1) и исключить все несовместимые с вариантом  $r_{j(\beta)l}$  реализации подсистем  $x_k \in \{\Gamma x_{j(\beta)}, \Gamma x_{j(\beta)}^{-1}\}$ ;

— после нахождения оценки для вершины  $r_{j(\beta)l}$  восстановить все ранее исключенные по признаку несовместимости с реализацией  $r_{j(\beta)l}$  варианты.

Далее переходим к очередной вершине. Если они все просмотрены, то после определения лучшей вершины текущего уровня следует перейти к очередному уровню ветвления.

Построение усеченного множества уже позволяет найти оценку решения задачи оптимизации структуры СТС. Необходимо лишь на каждом уровне ветвления из усеченного множества выбрать минимальные значения показателей качества и затем определить их сумму. Такая оценка была предложена в статье [12]. Для повышения эффективности вычислений дополнительно применяют различные методы оптимизации. Для выпуклых или сводимых к ним функций одним из эффективных оказался градиентный метод [11, 13]. Рассмотрим определение оценки более подробно.

Будем считать, что

$$K(S_\alpha) = \sum_{r_{j(\beta)l} \in S_\alpha} K_j(r_{j(\beta)l}) = \sum_{r_{j(\beta)l} \in S_\alpha} [K_j(r_{j(\beta)l}); \overline{K_j(r_{j(\beta)l})}], \quad (9)$$

где  $K_j(r_{j(\beta)l})$  — показатель качества реализации  $r_{j(\beta)l}$   $i$ -й базовой системы, заданный интервалом  $[K_j(r_{j(\beta)l}); \overline{K_j(r_{j(\beta)l})}]$ .

Обозначим:

- $S_i^\beta$  — множество реализации подсистем, включенных в решение на  $\beta$ -м уровне ветвления;
- $H_i^\beta$  — множество реализаций, не удовлетворяющих условиям (1), (2);

•  $R_i = \bigcup_{j \in N_i} R_j$  — множество возможных вариантов технической реализации всех подсистем  $i$ -й базовой структуры, где  $R_j = \{r_{j(\beta)l}, l = \overline{1, g_{j(\beta)}}\}$ ;

•  $M_i^\beta = R_i / (S_i^\beta \cup H_i^\beta)$  — множество, из которого будет выбираться реализация на  $(\beta + 1)$ -м уровне ветвления;

•  $T_i(r_{j(\beta)l})$  — нижняя граница (оценка) вершины  $r_{j(\beta)l}$   $\beta$ -го уровня ветвления при оптимизации  $i$ -й базовой структуры ( $i = \overline{1, q}$ ). Выражение для определения оценки  $T_i(r_{j(\beta)l})$  при включении реализации  $r_{j(\beta)l}$  в решение определяется зависимостью [11, 13]

$$T_i(r_{j(\beta)l}) = \sum_{r_{j(\beta)l} \in S_i^\beta} K_{j(\beta)}(r_{j(\beta)l}) + Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l}), \quad (10)$$

где  $Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l})$  — нижняя граница минимального значения суммы:

$$Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l}) = \min_{r_{j(\beta)l} \in M_i^\beta} \sum K_{i(\beta)}(r_{j(\beta)l}) = \min_{r_{j(\beta)l} \in M_i^\beta} \sum [K_j(r_{j(\beta)l}); \overline{K_j(r_{j(\beta)l})}] \quad (11)$$

при условии (1) и

$$\sum_{r_{j(\beta)l} \in M_i^\beta} d_{j(\beta)\gamma}(r_{j(\beta)l}) \leq b_\gamma(r_{j(\beta)}), \quad (12)$$

где  $b_\gamma(r_{j(\beta)l}) = D_\gamma^0 - \sum_{r_{j(\beta)l} \in S_i^\beta} d_{j(\beta)\gamma}(r_{j(\beta)l})$ ,  $\gamma = \overline{1, m}$ .

Таким образом, задача отыскания нижней границы сводится к определению  $Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l})$ , причем [11]

$$Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l}) = \max_{\gamma} f_\gamma^0(r_{j(\beta)l}), \quad \gamma = \overline{1, m}, \quad (13)$$

где  $f_\gamma^0(r_{j(\beta)l})$  — нижняя граница решения задачи (11), (12) при ограничении  $\gamma$ .

Нижняя граница  $T_i^*(i = \overline{1, q})$  целевой функции определяется в виде

$$T_i^* = \max_{\gamma} T_{i\gamma}^*, \quad \gamma = \overline{1, m}, \quad (14)$$

где  $T_{i\gamma}^*$  — нижняя граница целевой функции при ограничении  $\gamma$ , определяемая в результате решения выражений (11), (12) без учета (1) при условии

$$b_\gamma(r_{j(\beta)l}) = D_\gamma^0, \quad S_i^\beta = \emptyset, \quad H_i^\beta = \emptyset.$$

Согласно принципам интервального анализа [8], произведение, частное, сумма и разность интервалов есть интервал. Таким образом, оценки  $T_\beta(r_{j(\beta)l})$ ,  $Q_{j(\beta)}^0(r_{j(\beta)l})$ ,  $T_{i\gamma}^*$ ,  $T_i^*$  являются интервальными значениями. При их определении используем метод 1. Например, имеем следующие значения оценок  $T_{i\gamma}^*$ :  $T_{i1}^* = [4; 8]$ ,  $T_{i2}^* = [5; 7]$ ,  $T_{i3}^* = [3; 8]$ , причем  $b_{1i} = 0,9$ ,  $b_{2i} = 0,1$ . В результате решения задачи (14) методом 1 получим  $T_i^* = T_{i2}^* = [5; 7]$ .

Для нахождения оценки  $f_\gamma^0(r_{j(\beta)l})$  используют градиентный метод [11]. Для градиентов, заданных интервалом значений, выбор лучшего градиента в зависимости от цели исследования осуществляется с помощью метода 1. Например, получены следующие интервалы градиентов:  $[4; 11]$ ,  $[2; 14]$ ,  $[3; 14]$ ,  $[6; 7]$ , причем  $b_{2i} = 0,9$ ,  $b_{1i} = 0,1$ , ( $i = 1, 4$ ). Тогда в соответствии с методом 1 и с учетом формулы (13) получим множество  $P_\gamma = \{3, 2, 1, 4\}$ .

После определения всех оценок на  $\beta$ -м уровне ветвления в решение включается такая вершина  $r_{j(\beta)z}$ , для которой

$$T_\beta(r_{j(\beta)z}) = \min_l T_\beta(r_{j(\beta)l}), \quad l = \overline{1, g_{j(\beta)}}. \quad (15)$$

Для задачи оптимизации с интервальными оценками при выборе вершины используем метод 1. Ветвление на  $(\beta + 1)$ -м уровне продолжается из вершины  $r_{j(\beta)z}$ . Условие  $M_i^\beta = 0$  означает, что  $S_i^\beta$  сформирована полностью, при этом оценка решения равна  $T_i^0 = T_{d_i}(r_{j(d_i)z})$ .

Решение ведется до тех пор, пока дерево ветвлений не будет иметь висячих вершин с оценками  $T_\beta(r_{j(\beta)l}) < T_i^0$ , заданными в интервальном виде.

Рассмотрим пример. Допустим:  $\beta = 5; l = 1, 3$ ;  $T_5(r_{j(5)1}) = [5; 7]$ ,  $T_5(r_{j(5)2}) = [3; 6]$ ,  $T_5(r_{j(5)3}) = [5; 6]$ ;  $b_{2i} = 0,8$ ,  $b_{1i} = 0,2$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Тогда в соответствии с методом 1 и с учетом формулы (15) получим, что  $r_{j(5)2}$  является вершиной, из которой следует продолжить ветвление.

### Построение упорядоченного подмножества эффективных систем с учетом нескольких критериев, заданных в интервальном виде

Дальнейшее изложение метода проведем для задачи выбора подкортежа Парето, т. е. задачи (4) при условиях (1) и (2). Введем необходимые обозначения:

- $T_R^0$  — соответствующее подкортежу Парето  $P_R$  множество значений показателей качества:  $T_R^0 = \{K_t(S_\alpha^0), t = \overline{1, r} \forall S_\alpha^0 \in P_R\}$ , где  $K_t(S_\alpha^0) = [K_t(S_\alpha^0); \overline{K_t(S_\alpha^0)}]$ . До начала решения  $K_t(S_\alpha^0) = [\infty; \infty]$ ,  $P_R = \emptyset$ ;

- $T_\beta$  — множество значений оценок  $T_\beta(r_{j(\beta)l})$  на  $\beta$ -м ( $\beta = \overline{1, d_i}$ ) уровне ветвления, полученных

в интервальной форме:  $T_\beta = \{T_t(r_{j(\beta)l}), t = \overline{1, r}, l = \overline{1, g_{j(\beta)}}\}$ , где  $T_t(r_{j(\beta)l}) = [\underline{T_t(r_{j(\beta)l})}; \overline{T_t(r_{j(\beta)l})}]$ ;

- $\|C_{kl}\|_\beta$  — оценочная матрица, построенная на  $\beta$ -м уровне ветвления с использованием метода 2 [6] на основе информации о множествах  $T_R^0$ ,  $T_\beta$ ,  $A$ , где  $k = \overline{1, (R + g_{j(\beta)})}$ ;  $l = \overline{1, (R + g_{j(\beta)})}$ ;  $C_{kl} = 0$ , если  $k = l$ .

Метод решения заключается в следующем. Решаем  $r$  задач оптимизации по каждому из  $r$  критериев. Определяем  $T^* = \{T_{th}^* : t = \overline{1, r} \forall h = \overline{1, r}\}$  — множество нижних оценок, заданных в интервальном виде. Если число элементов последнего уровня ветвления  $g = g_{j(d_i)}$ , то получим в общем случае  $k = r \cdot g$  решений (варианты систем  $S_\gamma^0$ ,  $\gamma = \overline{1, k}$ , и соответствующее им множество показателей качества  $K_t(S_\gamma^0)$ , заданных в интервальном виде,  $t = \overline{1, r}$ ).

На каждом  $\beta$ -м уровне ветвления находим интервалы оценок  $T_\beta(r_{j(\beta)l}), t = \overline{1, r}, l = \overline{1, g_{j(\beta)}}$  для всех вершин и формируем множество  $T_\beta$ . Таким образом, на  $\beta$ -м уровне имеется информация о характеристиках частично сформированных систем.

На основе множества  $A$ , используя метод 2 и попарное сравнение всех элементов множеств  $T_R^0$  и  $T_\beta$ , формируем матрицу  $\|C_{kl}\|_\beta$ . Определяем  $R$  лучших систем, расположенных в порядке убывания приоритета, и формируем текущие множества  $K_\beta$  и  $N_\beta$  мощностью  $R$ . В множество  $K_\beta$  входят лучшие элементы (с точки зрения совокупности показателей качества, заданных в интервальной форме) множеств  $T_R^0$  и  $T_\beta$ . Множество  $N_\beta$  представим состоящим из двух подмножеств:  $N_\beta^{(1)}, N_\beta^{(2)}$ , — в которые входят соответственно номера элементов множеств  $T_R^0(1, 2, \dots, R)$  и  $T_\beta(1, 2, \dots, g_{j(\beta)})$ , включенные в множество  $K_\beta$ , т. е. номера систем, вошедших в число  $R$  лучших. Общее число элементов множества  $N_\beta$  равно  $R$ .

В ходе анализа множеств  $K_\beta, N_\beta$  возможны следующие варианты.

1.  $K_\beta = T_R^0, N_\beta^{(2)} = \emptyset$ , т. е. ни один из элементов множества  $T_\beta$  не может быть включен в множество  $K_\beta$ . Дальнейшее ветвление из любой вершины  $\beta$ -го уровня нецелесообразно.

2.  $N_\beta^{(2)} = \emptyset$ , в множество входят один или более элементов множества  $T_\beta$ . Поиск оптимального решения можно продолжить. Очередность выбора вершин для ветвления определяется подмножеством  $N_\beta^{(2)}$ .

Таким образом, в ходе анализа на  $\beta$ -м уровне ветвления формируется подмножество номеров вершин, лучших по совокупности показателей качества, заданных интервалом значений. Ветвление необходимо проводить из первой вершины, указанной в подмножестве  $N_\beta^{(2)}$ . До последнего

уровня ветвления множества  $T_R^0, P_R$  не изменяются. На уровне ветвления  $\beta = d_i$  после применения метода 2 уточняем множества  $T_R^0, P_R$ .

Вновь проводим анализ возможности улучшения решения до получения подкортежа Парето длиной  $R$ . Кортж Парето строится аналогично, но число  $R$  не задается и элементы кортежа от множества  $A$  не зависят.

### Заключение

Таким образом, поставлена и решена важная в прикладном плане задача оптимизации структу-

ры сложных технических систем в условиях риска, которая сведена к задаче построения упорядоченного множества эффективных вариантов структуры сложных технических систем для случая, когда критерии заданы в интервальном виде.

Предложены методы сравнения интервалов и критериев, заданных в интервальном виде, основанные на применении аппарата теории принятия решений. Это позволило решить проблемы выбора: максимального градиента, заданного интервалами значений; оценки вершины по совокупности ограничений; подмножества и множества эффективных вариантов систем.

### Литература

1. Ведерников Ю. В. Системный анализ: Учеб. пособие / СПИЭУ. СПб., 2006. 136 с.
2. Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Босов Д. Б. Введение в теорию эффективности инвестиционных процессов / МПГУ. М., 2006. 92 с.
3. Ватолин А. А. О задачах линейного программирования с интервальными коэффициентами // ЖВМ и МФ. 1984. Т. 24. № 11. С. 1629–1637.
4. Шарый С. П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной неопределенностью в данных // Вычислительные технологии. 1997. № 1. С. 84–101.
5. Левин В. И. Задачи непрерывной оптимизации в условиях интервальной неопределенности // Информационные технологии. 1999. № 7. С. 31–37.
6. Сафронов В. В. Проблемы проектирования сложных технических систем и некоторые пути их решения // Докл. Акад. военных наук. 1999. № 1. С. 84–95.
7. Сафронов В. В., Гаманюк Д. Н., Ведерников Ю. В. Метод принятия решений при большом числе критериев // Информационные технологии. 2000. № 4. С. 43–48.
8. Kaucher E. Algebraische Erweiterungen der Intervallrechnung unter Erhaltung Ordnungs- und Verbandsstrukturen // Computing Suppl. N 1. P. 65–79.
9. Подчукаев В. А. Декомпозиция, агрегирование и векторная оптимизация больших систем автоматического управления / СПИ. Саратов, 1983. 48 с.
10. Сафронов В. В. Гипервекторное ранжирование сложных систем // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23–27.
11. Алексеев О. Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. М.: Наука, 1987. 248 с.
12. Катханов М. Н., Сафронов В. В. Оптимизация структуры сложной технической системы по минимаксному критерию // Автоматика и вычислительная техника. 1977. № 4. С. 47–53.
13. Катханов М. Н., Сафронов В. В. Об одном методе оптимизации структуры сложной системы // Вопросы оптимизации и моделирования сложных систем: Препринт / АН СССР. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика». М., 1980. С. 10–18.

УДК 519.81

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ВЫБОРА НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

**В. Г. Чернов,**

канд. техн. наук, профессор

Владимирский государственный университет

Рассматриваются ограничения, которые имеют место при решении задач многокритериального выбора альтернатив на основе правил нечеткого условного вывода, когда для свертки условий критериального соответствия используется операция  $\min$ . Предлагается новый метод решения задач многокритериального выбора альтернатив, основанный на операции геометрической проекции нечетких множеств.

In the article the author examines the limitations, that take place in the process of decision of multicriterial choice of alternative on the base of fuzzy conditional conclusion rules when  $\min$ -operation procedure is used for convolution of the conditions of criterial accordance. The new method of decision of the problem of multicriterial alternative choice based on operation of geometrical projection of fuzzy sets is supposed.

Известен метод многокритериального выбора альтернатив на основе композиционного правила агрегирования описаний альтернатив с информацией о предпочтениях лица, принимающего решения (ЛПР), заданных в виде нечетких суждений [1, 2]. В основе этого метода лежит обработка высказываний вида

$$d_i: \text{если } x_1 = m_{1i} \text{ и } x_2 = m_{2i} \text{ и } \dots \text{ и } x_p = m_{pi}, \\ \text{то } S = B_i, \quad (1)$$

где  $d_i \in D = \{d_i : i = \bar{1}, \bar{l}\}$  — множество высказываний, удовлетворяющих предпочтениям ЛПР;  $x_j \in X = \{x_j : j = \bar{1}, \bar{J}\}$  — множество критериев;  $m_{ij}$  — оценка соответствия альтернативы  $j$ -му критерию, используемому в  $i$ -м высказывании;  $B_i$  — значение вывода высказывания  $d_i$ .

Процесс решения задачи состоит из нескольких этапов [3]:

1) вычисления свертки условий в левой части высказывания (1) на основе операции пересечения ( $\min$ );

2) вычисления импликаций;

3) построения композиционного правила вывода для каждой альтернативы;

4) сопоставления альтернатив.

Наилучшая альтернатива определяется на основе интегральной оценки соответствия альтернатив по всему множеству высказываний вида (1).

В известных примерах решения [3] этой задачи оценки  $m_{ij}$  — это некоторые числа из интервала  $[0, 1]$ , т. е. предполагается, что существует рациональный эксперт, который способен выставить эти оценки.

В данном случае возникает некоторое несоответствие: имея точечные оценки, ЛПР на их основе строят нечеткие выводы. Кроме этого, сочетание числовых оценок и их свертки с помощью операции  $\min$  делает всю достаточно сложную процедуру получения окончательного вывода практически нецелесообразной. В примере задачи [3] многокритериального альтернативного выбора с использованием правил нечеткого условного вывода для пяти альтернатив  $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$  и пяти критериев  $A, B, C, D, E$  используется следующий набор оценок:

$$A = \left\{ \frac{0.3}{u_1}, \frac{0.6}{u_2}, \frac{0.5}{u_3}, \frac{0.1}{u_4}, \frac{0.3}{u_5} \right\}; \\ B = \left\{ \frac{0.5}{u_1}, \frac{1}{u_2}, \frac{0}{u_3}, \frac{0.5}{u_4}, \frac{1}{u_5} \right\}; \\ C = \left\{ \frac{0.6}{u_1}, \frac{0.9}{u_2}, \frac{1}{u_3}, \frac{0.7}{u_4}, \frac{1}{u_5} \right\}; \\ D = \left\{ \frac{1}{u_1}, \frac{0.3}{u_2}, \frac{1}{u_3}, \frac{0}{u_4}, \frac{0}{u_5} \right\}; \\ E = \left\{ \frac{0}{u_1}, \frac{0.5}{u_2}, \frac{1}{u_3}, \frac{0.8}{u_4}, \frac{0.1}{u_5} \right\}. \quad (2)$$

Применяя к этому набору максиминное преобразование, получим

$$\min_i = \left\{ 0/u_1, 0.3/u_2, 0/u_3, 0/u_4, 0/u_5 \right\};$$

$$\max_j = \left\{ 0.3/u_2 \right\},$$

что говорит о предпочтительности второй альтернативы. Этот результат совпадает с тем, который был получен после весьма громоздких вычислений [3].

Следует отметить, что объективность дальнейших выводов на основе операции  $\min$  вызывает достаточно серьезные сомнения. Так, применение этой операции к соотношениям (2), по существу, уравнивает четыре весьма различные по качеству альтернативы  $a_1, a_3, a_4, a_5$ . Далее, наличие всего одной минимальной оценки может исключить из рассмотрения альтернативу, которая по всем остальным позициям превосходит другие. В том же самом примере далеко не очевидно полное преимущество альтернативы  $a_2$  над  $a_3$ .

Применение операции  $\min$  — это отражение позиции «осторожного наблюдателя», когда все последующие решения принимаются из расчета на наихудший случай. Как отмечается в различных источниках, это может привести к созданию неоправданных резервов, а в некоторых случаях — и к параличу деловой активности. Известно также, что операцию  $\min$  при свертке условий рекомендуется применять в условиях полной неопределенности, что для рассматриваемых задач не имеет места. Наконец, следует отметить, что использование операции  $\min$  приводит к тому, что решение по существу принимается по одному критерию (условию), а не по всей их совокупности. Использование числовых, по существу точечных, оценок и операции  $\min$  в задачах принятия решений приводит к тому, что без достаточных оснований ограничивается область, на которой будет приниматься решение.

При свертке условий (критериев) должна быть создана некоторая область (некоторое пространство), где было бы представлено совокупное (интегральное) влияние всех условий. Операция пересечения в ее классическом определении позволяет это обеспечить. Операция  $\min$ , да еще при точечных оценках, дает свертку в виде точки, обоснованность которой, вообще говоря, недостаточна.

Более обстоятельное доказательство сформулированных выше положений может быть получено из рассмотрения уже упоминавшегося примера, соотношения (2)[3]. В частности, для оценки альтернатив используются шесть правил нечеткого условного вывода. Рассмотрим ситуацию с одной альтернативой  $a_2$ , которая получила наибольшую итоговую оценку, и запишем для нее все правила [3]:

$$a_1: \text{если } x = A \text{ и } B \text{ и } C, \text{ то } y = S;$$

$$a_2: \text{если } x = A \text{ и } B \text{ и } C \text{ и } D, \text{ то } y = MS;$$

$$a_3: \text{если } x = A \text{ и } B \text{ и } C \text{ и } D \text{ и } E, \text{ то } y = P;$$

$$a_4: \text{если } x = A \text{ и } B \text{ и } C \text{ и } E, \text{ то } y = VS;$$

$$a_5: \text{если } x = (\text{очень } A) \text{ и } (\text{не } B) \text{ и } C \text{ и } E, \text{ то } y = S;$$

$$a_6: \text{если } x = \text{не } (A) \text{ и } \text{не } (C), \text{ то } y = US. \quad (3)$$

Остановимся на рассмотрении только условной части этих правил. Подставим в (3) числовые значения оценок критериального соответствия из (2) и выполним свертку условий в левой части правил, используя операцию  $\min$ :

$$d_1: \text{если } \langle x = 0.6 \rangle \text{ и } \langle 1 \rangle \text{ и } \langle 0.9 \rangle, \text{ то } y = S,$$

$$\text{если } \langle x = 0.6 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_2: \text{если } \langle x = 0.6 \rangle \text{ и } \langle 1 \rangle \text{ и } \langle 0.9 \rangle \text{ и } \langle 0.3 \rangle,$$

$$\text{то } y = MS,$$

$$\text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = MS;$$

$$d_3: \text{если } \langle x = 0.6 \rangle \text{ и } \langle 1 \rangle \text{ и } \langle 0.9 \rangle \text{ и } \langle 0.3 \rangle$$

$$\text{и } \langle 0.5 \rangle, \text{ то } y = P,$$

$$\text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = P;$$

$$d_4: \text{если } \langle x = 0.6 \rangle \text{ и } \langle 1 \rangle \text{ и } \langle 0.3 \rangle \text{ и } \langle 0.5 \rangle,$$

$$\text{то } y = VS,$$

$$\text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = VS;$$

$$d_5: \text{если } \langle x (0.6)^2 \rangle \text{ и } \langle 0 \rangle \text{ и } \langle 0.9 \rangle \text{ и } \langle 0.5 \rangle,$$

$$\text{то } y = S,$$

$$\text{если } \langle x = 0 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_6: \text{если } \langle x = 1 - 0.6 \rangle \text{ и } \langle 0.1 \rangle, \text{ то } y = US,$$

$$\text{если } \langle x = 0.4 \rangle, \text{ то } y = US. \quad (4)$$

Окончательно:

$$d_1: \text{если } \langle x = 0.6 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_2: \text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = MS;$$

$$d_3: \text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = P;$$

$$d_4: \text{если } \langle x = 0.3 \rangle, \text{ то } y = VS;$$

$$d_5: \text{если } \langle x = 0 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_6: \text{если } \langle x = 0.4 \rangle, \text{ то } y = US. \quad (5)$$

Или, с учетом (3):

$$d_1: \text{если } \langle x = A/0.6 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_2: \text{если } \langle x = C/0.3 \rangle, \text{ то } y = MS;$$

$$d_3: \text{если } \langle x = D/0.3 \rangle, \text{ то } y = P;$$

$$d_4: \text{если } \langle x = C/0.3 \rangle, \text{ то } y = VS;$$

$$d_5: \text{если } \langle x = B/0 \rangle, \text{ то } y = S;$$

$$d_6: \text{если } \langle x = \text{не } (A)/0.4 \rangle, \text{ то } y = US. \quad (6)$$

Последний набор правил, так же как и предыдущий, вызывает ряд вопросов, которые, в принципе, могут поставить под сомнение получаемый на их основе вывод. В наборе (6) отсутствует критерий  $E$ , в правилах  $d_2$  и  $d_4$  при одних и тех же критериальных оценках делаются различные выводы, достаточно низкая оценка альтернативы по критерию  $D$  делает ее безупречной, нулевая оценка по критерию  $B$  позволяет рассматривать альтернативу как удовлетворительную. И, наконец, вместо достаточно большого набора условий в каждом правиле осталось по одному. Причины этих противоречий заключаются не в неудачном подборе числовых оценок, а в принципиальных недо-

статках использования точечных оценок критериального соответствия в совокупности с применением операции min для свертки условий.

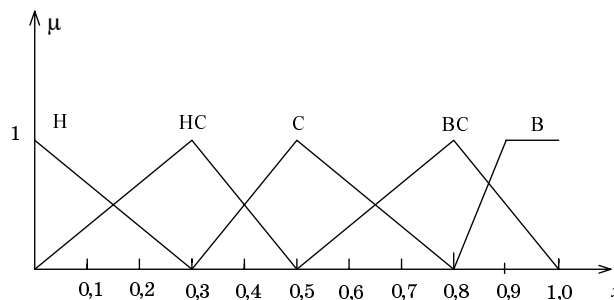
Наверное, больший интерес может представлять эта же задача, но в более общей формулировке, когда оценки соответствия альтернатив условиям критериев заданы либо нечеткими числами, например «примерно 0,8», либо в лингвистической форме. Например, оценка 0,8 трансформируется в оценку «выше среднего», 0,9 — «высокая», 0,3 — «ниже среднего». В любом случае при таком подходе критериальные оценки представляются нечеткими множествами с различными областями определения.

Изменения, которые претерпят формулировки правил (4), покажем на примере одного правила:

$d_1$ : если < степень соответствия критерию А = средняя > и < степень соответствия критерию В = высокая > и < степень соответствия критерию С = высокая >, то  $y = S$ . Остальные правила преобразуются аналогичным образом. На рис. 1 представлен один из вариантов лингвистических оценок критериального соответствия. Выбор треугольных функций принадлежности объясняется только соображениями простоты графических представлений.

Условные части всех правил (3) в сокращенном варианте записаны в таблицу.

Анализ содержания таблицы с учетом рис. 1 показывает, что в лучшем случае из шести правил только два дают непустые пересечения, т. е. принятие решений будет приниматься не по всей совокупности правил условного вывода. Обоснованность таких заключений оказывается явно недостаточной. Таким образом, классический



■ Рис. 1. Лингвистические оценки критериального соответствия

вариант операции пересечения при лингвистической форме оценок критериального соответствия затрудняет решение поставленной задачи. Можно достаточно просто доказать, что аналогичная ситуация будет иметь место и при альтернативных вариантах операции пересечения на основе:

- ограниченного произведения (граничное произведение) [5];
- алгебраического произведения;
- драстического произведения [6].

В работе [4] для подобных задач вводятся так называемые цилиндрические продолжения.

Теоретически они позволяют разрешить проблему пустых пересечений, но в практическом плане цилиндрические продолжения могут быть использованы только для простейших условных высказываний.

Предлагается новая операция над нечеткими множествами — геометрическая проекция нечетких множеств.

Пусть имеются нечеткие множества

$$\tilde{A} = \{\mu_{\tilde{A}}(y)/y\};$$

$$\tilde{B} = \{\mu_{\tilde{B}}(x)/x\};$$

$$y \in [0, 1], \quad x \in [0, 1].$$

Последнее условие не ограничивает общность рассмотрения, так как любой реальный интервал значений приводится к указанному.

Введем операцию проекции  $\Pi^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{B})$  нечеткого множества  $\tilde{A}$  на нечеткое множество  $\tilde{B}$ , которая должна удовлетворить следующим условиям:

d	A B C D E для альтернативы				
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$d_1$	$BC \cdot C \cdot C = 0$	$C \cdot B \cdot B = 0$	$C \cdot H \cdot B = 0$	$H \cdot C \cdot BC = 0$	$HC \cdot B \cdot B = 0$
$d_2$	$BC \cdot C \cdot C \cdot B = 0$	$C \cdot B \cdot B \cdot HC = 0$	$C \cdot H \cdot B \cdot B = 0$	$H \cdot C \cdot BC \cdot H = 0$	$HC \cdot B \cdot B \cdot H = 0$
$d_3$	$BC \cdot C \cdot C \cdot B \cdot H = 0$	$C \cdot B \cdot B \cdot HC \cdot C = 0$	$C \cdot H \cdot B \cdot B \cdot B = 0$	$H \cdot C \cdot BC \cdot H \cdot B = 0$	$HC \cdot B \cdot B \cdot H \cdot H = 0$
$d_4$	$BC \cdot C \cdot C \cdot H = 0$	$C \cdot B \cdot B \cdot C = 0$	$C \cdot H \cdot B \cdot B = 0$	$H \cdot C \cdot BC \cdot B = 0$	$HC \cdot B \cdot B \cdot H = 0$
$d_5$	$(BC)^2 \cdot \text{не}(C) \cdot C \cdot H = 0$	$(C)^2 \cdot \text{не}(B) \cdot C \cdot C \neq 0$	$(C)^2 \cdot \text{не}(H) \cdot B \cdot B \neq 0$	$(H)^2 \cdot \text{не}(C) \cdot BC \cdot B \neq 0$	$(HC)^2 \cdot \text{не}(B) \cdot B \cdot H \neq 0$
$d_6$	$\text{не}(BC) \cdot \text{не}(C) \neq 0$	$\text{не}(BC) \cdot \text{не}(B) \neq 0$	$\text{не}(C) \cdot \text{не}(B) \neq 0$	$\text{не}(H) \cdot \text{не}(BC) \neq 0$	$\text{не}(HC) \cdot \text{не}(B) \neq 0$

111Примечание. Символом «·» обозначена операция пересечения.

- 1)  $\Pi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B})$  — нечеткое множество;
- 2)  $\Pi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{A}) = \tilde{A}$ ;
- 3)  $\Pi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \emptyset$  — пустое множество, если хотя бы одно из множеств  $\tilde{A}$  или  $\tilde{B}$  — пустое или множества ортогональны.

Процедуру построения проекции нечеткого множества  $\tilde{A}$  на нечеткое множество  $\tilde{B}$  определим следующим образом (рис. 2):

$$\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \{ \varphi[\mu_{\tilde{A}}(y), \mu_{\tilde{B}}(x')] / [y, x' = f(y)] \},$$

где  $f(y) = \frac{CG[\mu_{\tilde{B}}(x)]}{CG[\mu_{\tilde{A}}(y)]}y$  — проекционная функция;  $CG[\mu_{\tilde{B}}(x)]$

и  $CG[\mu_{\tilde{A}}(y)]$  — координаты центра тяжести фигур, ограниченных функциями принадлежности  $\mu_{\tilde{B}}(x)$  и  $\mu_{\tilde{A}}(y)$  соответственно;  $\varphi$  — функционал, задающий вид преобразований над функциями принадлежности;  $y \in [0, 1]$ ,  $x \in [0, 1]$ .

Треугольные функции принадлежности используются только из соображений простоты графических представлений.

Нечеткое множество  $\tilde{B}$ , на которое производится проекция, назовем приемником проекции. Нечеткое множество, которое проецируется на другое нечеткое множество, назовем источником проекции.

Нечеткие множества  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  ортогональны, если угол наклона  $\beta$  проекционной функции  $f(y)$  равен 0 или  $90^\circ$ . В этом случае  $\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \emptyset$ .

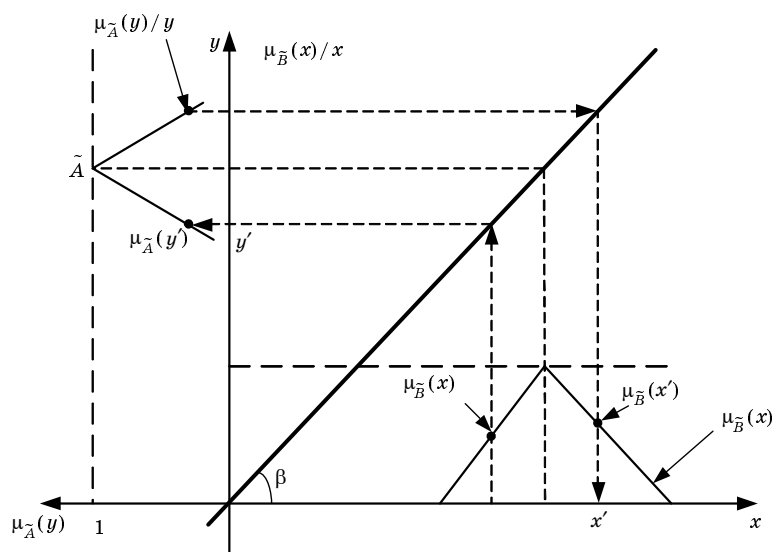
Геометрическая проекция типа  $\min$  будет иметь место, если  $\varphi = \min$ , типа  $\max$  — при  $\varphi = \max$ :

$$\Pi_{\min}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \{ \min[\mu_{\tilde{A}}(y), \mu_{\tilde{B}}(x')] / y, x' = f(y) \};$$

$$\Pi_{\max}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) = \{ \max[\mu_{\tilde{A}}(y), \mu_{\tilde{B}}(x')] / y, x' = f(y) \}.$$

Обратная геометрическая проекция

$$\begin{aligned} \Pi_\varphi^{-\Gamma}(\tilde{B}, \tilde{A}) &= \\ &= \{ \varphi[\mu_{\tilde{B}}(x), \mu_{\tilde{A}}(y')] / x, y' = f(x) \}. \end{aligned}$$



■ Рис. 2. Построение проекции нечетких множеств

**Основные свойства геометрической проекции.**

1. Геометрическая проекция нечетких множеств не коммутативна:

$$\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}) \neq \Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{B}, \tilde{A}).$$

*Доказательство:*

Результат геометрической проекции зависит от проекционной функции.

Для  $\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B})$   $f(y) = \frac{CG[\mu_{\tilde{B}}(x)]}{CG[\mu_{\tilde{A}}(y)]}y$ ;

для  $\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{B}, \tilde{A})$   $f(x) = \frac{CG[\mu_{\tilde{A}}(y)]}{CG[\mu_{\tilde{B}}(x)]}x$

и  $f(y) \neq f(x)$ .

2. Геометрическая проекция нечетких множеств в общем случае не ассоциативна:

$$\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{B}, \tilde{C})) \neq \Pi_\varphi^\Gamma(\Pi_\varphi^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}), \tilde{C}).$$

Доказательство этого утверждения можно провести аналогично доказательству первого утверждения.

Как следует из определения операции геометрической проекции нечетких множеств, ассоциативность может иметь место, если нечеткие множества имеют однотипные симметричные функции принадлежности и угол наклона проекционной функции равен  $\frac{\pi}{4}$ .

В этом случае при выполнении преобразований не происходит перемещений центров тяжести соответствующих нечетких множеств и не изменяется проекционная функция.

Во всех остальных ситуациях центры тяжести перемещаются в разных направлениях.

3. Геометрическая проекция в общем случае не дистрибутивна, т. е.

$$\begin{aligned} &\Pi_{\max}^\Gamma(\tilde{A}, \Pi_{\min}^\Gamma(\tilde{B}, \tilde{C})) \neq \\ &\neq \Pi_{\min}^\Gamma(\Pi_{\max}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}), \Pi_{\max}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{C})); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\Pi_{\min}^\Gamma(\tilde{A}, \Pi_{\max}^\Gamma(\tilde{B}, \tilde{C})) \neq \\ &\neq \Pi_{\max}^\Gamma(\Pi_{\min}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{B}), \Pi_{\min}^\Gamma(\tilde{A}, \tilde{C})). \end{aligned}$$

Доказательство аналогично предыдущим.

4. Свойство поглощения в традиционном виде для геометрической проекции нечетких множеств не выполняется, но справедливо следующее соотношение:



$$\begin{aligned} & \Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{B}, \tilde{C})) = \\ & = \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{B})) = \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{B}). \end{aligned}$$

5. Для геометрической проекции нечетких множеств  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  выполняется правило Моргана:

$$\begin{aligned} \overline{\Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{B})} &= \Pi_{\min}^{\Gamma}(\overline{\tilde{A}}, \overline{\tilde{B}}); \\ \overline{\Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{B})} &= \Pi_{\max}^{\Gamma}(\overline{\tilde{A}}, \overline{\tilde{B}}). \end{aligned}$$

6. Геометрическая проекция нечетких множеств идемпотентна:

$$\Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{A}) = \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{A}).$$

7. Для геометрической проекции нечетких множеств

$$\begin{aligned} \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \overline{\tilde{A}}) &\neq \emptyset; \\ \Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \overline{\tilde{A}}) &\neq U, \end{aligned}$$

где  $U$  — универсальное множество.

8. С точностью до постоянного множителя:

$$\begin{aligned} \Pi_{\min}^{\Gamma}(\tilde{A}, \overline{\tilde{A}}) &= \Pi_{\min}^{\Gamma}(\overline{\tilde{A}}, \tilde{A}); \\ \Pi_{\max}^{\Gamma}(\tilde{A}, \overline{\tilde{A}}) &= \Pi_{\max}^{\Gamma}(\overline{\tilde{A}}, \tilde{A}). \end{aligned}$$

**Обработка нечетких высказываний.** Под нечетким высказыванием будем понимать условное высказывание вида

если  $\langle \text{условие } 1 \rangle$  и  $\langle \text{условие } 2 \rangle$  и ...  $\langle \text{условие } n \rangle$ , то  $\langle \text{вывод} \rangle$ ,

в котором и условия, и выводы имеют нечеткую форму, т. е. каждому условию и выводу соответствуют нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности, т. е. правило (7) имеет вид

$$\text{если } \tilde{A}_1 \text{ и } \tilde{A}_2 \text{ и ... и } \tilde{A}_n, \text{ то } \tilde{W}, \quad (8)$$

где  $\tilde{A}_i = \{\mu_{A_i}(x) / x\}$ ,  $\tilde{W} = \{\mu_W(z) / z\}$ .

Как уже отмечалось, для правила (8) свертка условий на основе операции пересечения может привести к пустому множеству, при этом достаточно хотя бы одного пересечения, т. е. если хотя бы для одной произвольной пары  $i, k$ :  $\tilde{A}_i \wedge \tilde{A}_k = \emptyset$ , то свертка всех условий будет пустое множество.

Применив геометрическую проекцию нечетких множеств, можно устранить эту ситуацию. Однако надо иметь в виду, что геометрическая проекция не коммутативна и поэтому порядок записи условий имеет существенное значение.

Для того чтобы это обстоятельство не сказывалось на конечном результате, предлагается следующая процедура.

Пусть имеется некоторое нечеткое высказывание вида (8).

Геометрические проекции нечетких множеств вычисляются как в прямом (слева направо), так и в обратном (справа налево) направлении. В каждом из направлений формируется несколько вариантов геометрических проекций путем циклического сдвига условий, например:

— для прямой геометрической проекции

$$\begin{aligned} \Pi_1 & (\underline{A}_1, A_2 \dots A_n); \\ \Pi_2 & (\underline{A}_n, A_1, A_2 \dots A_{n-1}); \\ \Pi_n & (\underline{A}_2, A_3 \dots A_{n-1}, A_n, A_1); \end{aligned}$$

— для обратной геометрической проекции

$$\begin{aligned} \Pi_1^{-1} & (\underline{A}_1, A_2 \dots A_n); \\ \Pi_2^{-1} & (A_2, A_3 \dots \underline{A}_n, A_1); \\ \Pi_n^{-1} & (A_n, A_1, A_2 \dots \underline{A}_{n-1}). \end{aligned}$$

Число сдвигов для каждого направления геометрических проекций равно числу условий в нечетком высказывании.

После выполнения всех преобразований получим  $2n$  ( $n$  — число условий) нечетких множеств, представляющих агрегирование нечетких условий. Количество нечетких множеств может быть уменьшено за счет исключения одинаковых комбинаций и использования свойства поглощения.

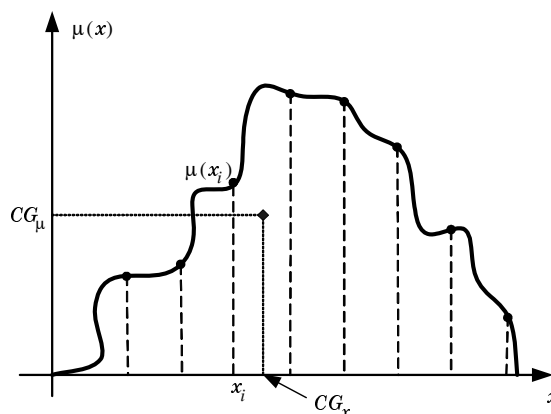
Заключительным этапом является вычисление импликации:  $\tilde{A} \rightarrow \tilde{W}$ , где  $\tilde{A}$  — агрегированное нечеткое условие;  $\tilde{W}$  — нечеткий вывод.

Вычисление импликации можно выполнить по нескольким вариантам.

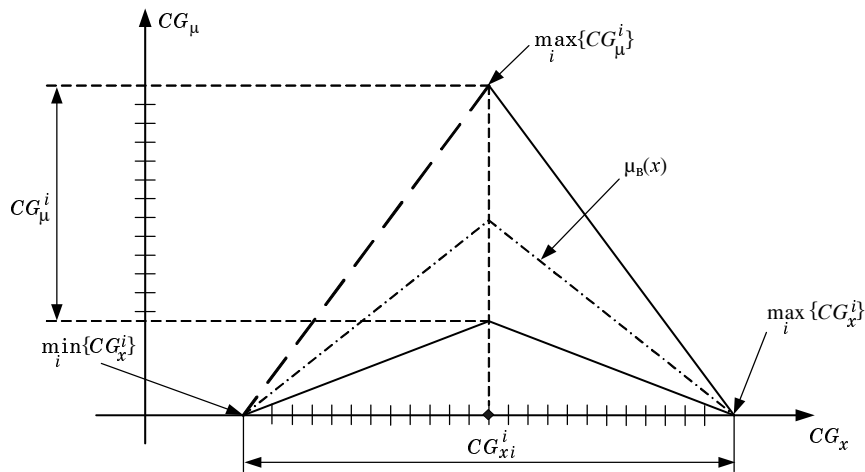
1. Импликация вычисляется для каждой геометрической проекции и затем формируется агрегированный вывод.

2. Выполняется агрегирование оценок по всем геометрическим проекциям, а затем вычисляется импликация.

При вычислении самой импликации можно так же идти двумя путями:



■ Рис. 3. Определение координат центра тяжести



■ Рис. 4. Построение результирующей функции принадлежности

а) использовать геометрическую проекцию нечетких множеств  $\Pi^{\Gamma}(\tilde{A}, \tilde{W})$ ;

б) использовать одну из известных формул вычисления импликации [5].

Для построения интегрированных оценок или выводов можно предложить следующее решение.

Известно, что обобщенной характеристикой множества материальных точек является координата центра тяжести.

В каждом из предложенных вариантов вычисления импликации получается некоторый набор нечетких множеств, каждое из которых имеет свою функцию принадлежности. Если рассматривать нечеткое множество как множество точек с единичной массой в системе координат, значение функции принадлежности — аргумент функции принадлежности, то в этой системе координат можно вычислить следующие координаты центра тяжести

$$\text{(рис. 3): } CG_x = \frac{\sum \mu(x_i) x_i}{\sum \mu(x_i)}; \quad CG_{\mu(x)} = \frac{\sum \mu(x_i) x_i}{\sum x_i}.$$

В общем случае будем иметь два множества значений:  $CG_x = \{CG_x^i : i = \overline{1, n+1}\}$ ,  $CG_{\mu(x)} = \{CG_{\mu}^i : i = \overline{1, n+1}\}$ .

Агрегированная оценка может быть представлена в виде эквивалентного нечеткого множе-

ства, полученного с помощью операции триангуляции, левая граница которого определяется как  $L = \min_i CG_x^i$ , правая —  $R = \max_i CG_x^i$ . Центр не-

четкого множества  $CG = \frac{\sum CG_x^i \cdot CG_{\mu}^i}{\sum CG_{\mu}^i}$ , значение

функции принадлежности в этой точке можно определить как пессимистическую:  $\mu(CG) = \min_i \{CG_{\mu}^i\}$

или как оптимистическую:  $\mu(CG) = \max_i \{CG_{\mu}^i\}$ ,

возможно также использование взвешенной оцен-

$$\text{ки } \mu_B(CG) = \frac{\sum \mu(CG_x^i) \cdot CG_{\mu}^i}{\sum CG_{\mu}^i} \text{ (рис. 4).}$$

Для проверки предлагаемых преобразований были использованы известные примеры [3], в которых числовые оценки при сохранении их общего смысла были заменены на лингвистические, так, как это описывалось в начале данной работы. Полученные результаты по своему смыслу совпадают с результатами тестовых примеров. В то же время предложенные методы свободны от противоречий и ограничений, которые были отмечены в начале работы.

## Литература

1. Yager R. R. Multiple — objective decision — making using fuzzy sets // Intern. J. Man — machine Studies. 1977. Vol. 9. N 4. P. 375–382.
2. Yager R. R. Multicriterial decisions with soft information: an application of fuzzy set and possibility theory // Fuzzy Mathematics. 1982. Pt. 1. Vol. 2. N 2. P. 21–28; Pt. 2. Vol. 2. N 3. P. 7–16.
3. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.

4. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженов А. В. Нечеткие модели для экспериментальных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 136 с.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
6. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.

УДК 621.396.96

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОТОКОЛОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В КОСМИЧЕСКИХ СЕТЯХ СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ

**В. В. Кунгурцев,**

канд. техн. наук

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

*Проведен сравнительный анализ помехоустойчивости и скорости передачи информации в протоколах информационного обмена с автоматическим переспросом на канальном и транспортном уровнях информационного взаимодействия космических сетей связи и управления.*

*An analysis of the noise stability and transfer speed of automatic repeat request protocols is given. These protocols may be used at data-link level and at transport level of communication and management space network systems. In the analysis, the author compares the performance and error-rate for using protocols at these two levels.*

Взаимозависимость пропускной способности и достоверности передачи информации в определенных условиях каналов информационного обмена создает возможности для оптимизации параметров протоколов. В общем случае описание протокола информационного обмена содержит неформальное и формальное описание правил информационного обмена, а также предусматривает определение форматов сообщений и временных параметров обмена, формирование управляющей информации, управление потоком команд и процессом исправления ошибок.

За последние годы потребности в объемах и скоростях передачи данных резко возросли одновременно с ростом качества каналов информационного обмена, так что использование существующих сетей типа X.25 или выделенных каналов стало неэффективным и неадекватным в новых условиях. Возникла необходимость в создании новых экономичных высокоскоростных методов передачи, коммутации и ретрансляции данных, которые могли бы заменить или дополнить ныне существующие. Таким явился метод ретрансляции кадров, определенный стандартами ITU-T, ANSI и группой Frame Relay, став основой одноименных сетей Frame Relay, получивших самостоятельное применение, и сетевых технологий Frame Relay, подживающих работу других сетей.

Появлению методов и сетей ретрансляции кадров в значительной мере способствовало повышение качества и пропускной способности новых средств связи (волоконно-оптических, спутнико-

вых, цифровых). При работе на таких каналах исправлению ошибок в самой сети уделяется меньше внимания, и при их обнаружении искаженный кадр просто аннулируется. Окончательная проверка правильности информации, повторная передача искаженных пакетов (блоков) данных и управление потоком осуществляются протоколами вышерасположенных уровней, которые реализуются конечными устройствами сети Frame Relay, устройством доступа FRAD (Frame Relay Access Device) или устройствами других подключенных к Frame Relay сетей. Однако использование подобных технологий является оправданным только в сетях с низкими вероятностями ошибок, приходящихся на бит информации.

Для того чтобы оценить целесообразность использования технологий Frame Relay, необходимо провести анализ обеспечиваемых с их помощью достоверности и скорости передачи информации. При исследовании помехоустойчивости каналов информационного обмена на канальном уровне исходной величиной для проведения расчетов показателей помехоустойчивости и эффективной скорости прием вероятностный ошибочный прием символа сообщения  $p_0$ . Величина  $p_0$  характеризует помехоустойчивость протоколов физического уровня. В технологии Frame Relay автоматический переспрос искаженных сообщений используется на более высоких уровнях информационного взаимодействия, чем канальный. При этом изменяются размеры допустимых «окон» сообщений, соответствующие длине пакетов и длительности

циклов передачи информации, определяемые временем обработки и «сбора» сообщений на приемной стороне. Используемые параметры помехоустойчивого кодирования передаваемой информации обычно учитываются в виде эффективной скорости, определяемой отношением числа переданных информационных символов к общему числу переданных символов с учетом автоматических переспросов:

$$V_{\text{эф}} = \frac{k}{N} \approx \frac{k}{nr_{\text{ср}}},$$

где  $k$  — число информационных символов, переданных за единицу времени;  $N$  — общее число переданных за единицу времени символов, с учетом избыточных и служебных символов;  $n$  — число передаваемых символов на  $k$  информационных, без учета переспросов (сумма длин пакетов, переданных за единицу времени);  $r_{\text{ср}}$  — среднее число повторных передач пакетов.

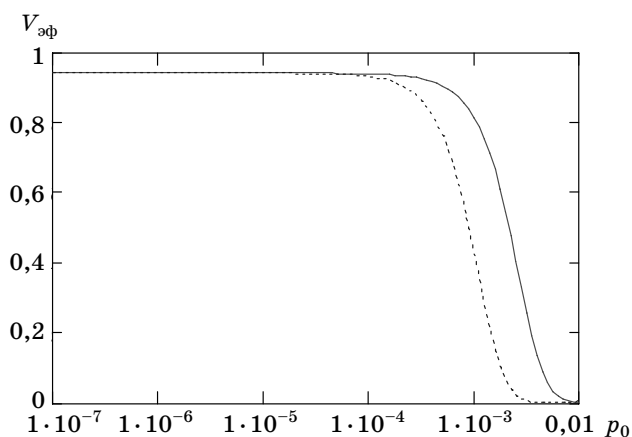
Для проведения анализа эффективности протоколов информационного обмена канального уровня представления была использована математическая модель, построенная на основе матричного описания процесса передачи информации и математического аппарата марковских случайных процессов. Показатели скорости передачи информации для различных условий помехоустойчивости представлены на рис. 1. Для семейства протоколов X.25 алгоритмы информационного обмена с автоматическим переспросом искаженных пакетов используются на канальном уровне, а для семейства FR осуществляются на более высоких уровнях информационного взаимодействия.

Как видно из графиков, при высоком качестве связи, когда вероятность искажения информационного символа сообщения достаточно мала ( $p_0 =$

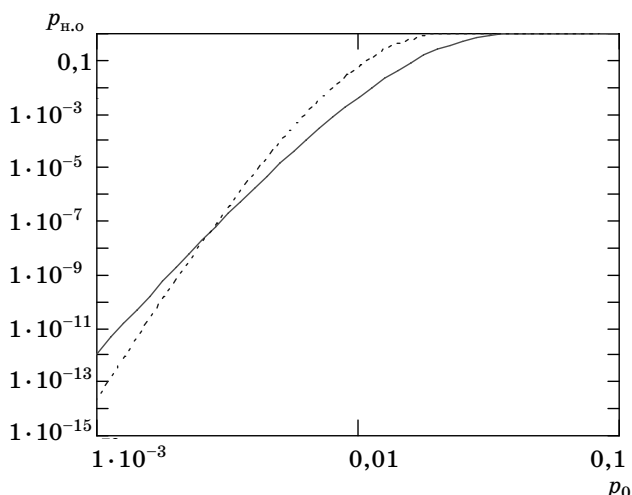
$= 10^{-7} - 10^{-5}$ ), эффективные скорости при использовании протоколов информационного обмена с автоматическим переспросом на канальном и транспортном уровнях практически равны. Однако при проведении расчетов не учитывалась высокая эффективность использования протоколов высоких уровней при передаче больших потоков информации, достигаемая сокращением избыточности сообщений. С ухудшением условий передачи информации эффективность использования гибридных протоколов информационного обмена повышается и позволяет улучшить пропускную способность систем связи.

Достоверность используемых гибридных протоколов будем характеризовать вероятностью необратимой ошибки (рис. 2). Под необратимыми ошибками понимаются ошибки, результаты которых не могут быть исправлены методами автоматического переспроса искаженных сообщений или помехоустойчивого кодирования на данном уровне представления.

Из графиков видно, что при малых значениях вероятностей ошибочного приема символа информации вероятности необратимых ошибок для протоколов с автоматическим переспросом на транспортном уровне представления несколько ниже, чем для протоколов канального уровня. Однако при построении данных зависимостей для протоколов канального уровня не учитывалась возможность исправления ошибок на более высоких уровнях представления, поэтому в реальных системах, использующих многоуровневые протоколы канального уровня, все же обеспечивают требуемую достоверность передачи информации. При ухудшении условий в каналах информационного обмена сетей связи и управления протоколы, не реализующие автоматический переспрос искаженных сообщений на канальном уровне, могут не удовлет-



■ Рис. 1. Зависимости эффективной скорости передачи информации от вероятности ошибочного приема символа для протоколов X.25 (—) и FR (---)



■ Рис. 2. Зависимости вероятности необратимой ошибки от вероятности ошибочного приема символа для протоколов X.25 и FR

ворять требованиям по достоверности передачи информации. В работе [6] представлены математические модели протоколов информационного обмена канального уровня с автоматическим переспросом и рассмотрены вопросы их практической реализации и выбора параметров в перспективных низкоорбитальных спутниковых системах.

Таким образом, использование протоколов информационного обмена с автоматическим переспросом на канальном уровне необходимо в условиях «плохих» каналов связи и желательно в условиях «хороших» каналов, так как позволяет за счет незначительного снижения пропускной способности каналов информационного обмена добиться высокой достоверности передаваемых сообщений. Использование технологий Frame Relay оправдано для каналов информационного обмена космических сетей связи и управления с низкой вероятностью ошибки на символ, для которых наиболее существенным является высокая пропускная способность и в которых каналы информационного обмена обладают более высокой надежностью и устойчивостью.

## Литература

1. **Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации** / Г. И. Тузов, Ю. Ф. Урядников, В. И. Прытков и др.; Под ред. Г. И. Тузова. М.: Радио и связь, 1993. 384 с.
2. **Якубайтис Э. А.** Открытые информационные сети. М.: Радио и связь, 1991. 208 с.
3. **Каневский З. М., Дорман М. К., Токарев Б. В., Крестинин В. В.** Передача информации с обратной связью. М.: Связь, 1976. 352 с.
4. **Протоколы и методы управления в сетях передачи данных:** Пер. с англ. / Под ред. Ф. Ф. Куо. М.: Радио и связь, 1985. 480 с.
5. **Мальцев Г. Н., Кунгурцев В. В.** Методы передачи данных в телекоммуникационных системах с переспросом субпакетов при сбоях и ошибках // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. Тез. докл. конф. СПб., 1999. С. 45–46.
6. **Мальцев Г. Н., Кунгурцев В. В., Штанько С. В., Моторин Н. М.** Принципы построения и технические решения перспективной низкоорбитальной космической командно-ретрансляционной системы // Военно-космическая деятельность России — истоки, состояние, перспективы: Тр. науч.-практич. конф. и выставки / ВКА. СПб., 2005. С. 97.

## ВИЗИТ БЕРТРАНА МЕЙЕРА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Воспитание молодежи невозможно без знакомства с людьми, с которых можно брать пример. В Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУИТМО) встречи с такими людьми становятся доброй традицией. В 2005 г. гостем преподавателей и студентов ИТМО был Никлаус Вирт<sup>1</sup>, в этом году — его преемник на посту декана факультета Высшей политехнической школы Цюриха (ETN) Бертран Мейер (Bertrand Meyer).

Профессор Бертран Мейер, как и его предшественник, знает русский язык, на мой взгляд, практически в совершенстве. Несмотря на то, что сам Б. Мейер неоднократно отмечал, что давать оценку «в совершенстве» в его случае несправедливо, я остаюсь при своем мнении.

Мы познакомились с Б. Мейером под Санкт-Петербургом, в Зеленогорске, в 2004 г.<sup>2</sup>, где он был приглашенным докладчиком на конференции «Microsoft Research in St. Petersburg». Первое словосочетание, которое он сначала сказал, а потом написал по-русски, было «на авось». Это относится к традиционному написанию программ, которому он противопоставлял предложенный им метод написания программ по контракту. Б. Мейер еще раз приезжал в Россию на конференцию по образованию и выступал с очень интересным докладом. Потом он прислал труды В. Г. Парфенову и мне по программной инженерии (software engineering), которой мы тоже активно занимаемся.

28 марта 2006 г. я предложил Ученому совету СПбГУИТМО избрать Бертрانا Мейера почетным доктором университета и был единогласно поддержан.

Визит Б. Мейера с супругой в СПбГУИТМО состоялся 2 июня 2006 г.<sup>3</sup>. Сначала они встретились с ректором В. Н. Васильевым, который рассказал гостям об университете и победах студентов и выпускников в различных чемпионатах по программированию. Профессор Мейер на русском языке поблагодарил руководителя университета за оказанную честь и сказал, что об успехах ИТМО слышан.

Для того чтобы у гостей не сложилось впечатление, что университет имеет успехи только в области олимпийского программирования, по предварительному согласованию был проведен более чем двухчасовой семинар «Работы по программной ин-

женерии, проводимые на кафедре “Технологии программирования” СПбГУИТМО»<sup>1</sup>, на котором было сделано 12 докладов, в большинстве посвященных автоматному программированию — направлению в программировании, предложенному и развиваемому на указанной кафедре ИТМО. Доклады по этой тематике вызвали неподдельный интерес профессора Мейера.

По завершении семинара состоялось торжественное вручение Бертрану Мейеру мантии и диплома почетного доктора, которое проходило в присутствии большого числа студентов-программистов, обучающихся не только в нашем университете.

В начале встречи я познакомил присутствующих с биографией Бертрانا Мейера.

Он родился 21 ноября 1950 г., а в 1974 г. закончил Политехническую школу (Ecole Polytechnic) в Париже, став инженером.

В этом же году получил степень магистра по Computer Science в Стэнфордском университете. Степень доктора наук получил в 1985 г. в университете Анри Пуанкаре (Нанси).

С 1974 по 1983 гг. работал инженером-исследователем. Затем возглавил отдел программных разработок во Французской Национальной электрической компании.

В 1978 г. в соавторстве с К. Бодуэном вышла первая книга Б. Мейера «Методы программирования». Русский перевод издан в 1982 г. под редакцией и с предисловием Андрея Петровича Ершова.

С 1983 по 1986 гг. — приглашенный профессор в университете Калифорнии (Санта Барбара).

В 1985 г. Б. Мейер опубликовал отчет по языку Eiffel (Eiffel: A Language for Software Engineering). Этот язык наиболее полно отразил концепции объектно-ориентированного программирования.

В этом же году он основал компанию ISE (Interactive Software Engineering), переименованную позже в Eiffel Software. До 2001 г. Б. Мейер являлся ее президентом, а с 2001 г. стал научным руководителем. Под руководством Бертрана Мейера сотрудниками компании разработаны компиляторы языка Eiffel и объектно-ориентированная среда разработки программных проектов, доступная практически на всех платформах<sup>2</sup>.

Язык Eiffel продолжает непрерывно развиваться. В 2005 г. принят и опубликован стандарт этого языка «ECMA standard: Eiffel Analysis, Design and Programming Language», редактором которого являлся Б. Мейер. Стандарт утвержден как международный (International Standard 367 by ECMA International).

<sup>1</sup> Шальто А. А. Никлаус Вирт — почетный доктор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики // Информационно-управляющие системы. 2005. № 5. С. 56–58. <http://is.ifmo.ru>

<sup>2</sup> <http://is.ifmo.ru/misc/meyer/>

<sup>3</sup> <http://is.ifmo.ru/misc/meetmeyer.pdf>

<sup>1</sup> [http://is.ifmo.ru/seminar/\\_meyerprog.pdf](http://is.ifmo.ru/seminar/_meyerprog.pdf)

<sup>2</sup> [www.eiffel.com](http://www.eiffel.com)

В 1988 г. Б. Мейер опубликовал книгу «Object-Oriented Software Construction», переведенную на немецкий, французский, итальянский, японский, китайский и румынский языки. В книге подробно описываются основы создания надежных программных продуктов с использованием объектной технологии, а также основы проектирования по контракту. Второе издание вышло в 1997 г., а в 1998 г. книга получила почетную премию Jolt. В России перевод второго издания («Объектно-ориентированное конструирование программных систем», 2005 г.) вышел под редакцией Владимира Биллинга (он помог составить биографию Б. Мейера, за что я ему очень признателен). Это стало возможным благодаря объединенным усилиям издательств «Русская Редакция» и «Интернет Университет».

В 2003 г. Б. Мейер стал преемником Никлауса Вирта, сменив его на посту заведующего знаменитой кафедры Software Engineering в швейцарском ЕТН. Эту должность он занимает и в настоящее время, возглавляя одновременно и факультет Computer Science в ЕТН.

Бертран Мейер является одним из ведущих ученых в области инженерии программного обеспечения. Он автор девяти книг. Им опубликовано более 250 научных работ, охватывающих широкий спектр направлений, которые все трудно перечислить. Вот лишь некоторые из них: методы построения надежных, повторно используемых компонентов и программных продуктов, параллельное, распределенное и Интернет-программирование, технологии баз данных, формальные методы и доказательство корректности программ.

Последние 25 лет на большинстве известных международных конференций, посвященных проблемам инженерии программ (ICSE, OOPSLA, ECOOP, APSEC, TOOLS, ASWEC, ESEC), Б. Мейер выступал в роли приглашенного докладчика. В течение многих лет он являлся организатором одной из наиболее известных конференций по объектному программированию — конференции TOOLS (Technology of Object-Oriented Languages and Systems).

Бертран Мейер издавал журнал JOT (Journal of Object Technology), вел колонки в таких журналах как IEEE Computer (1996–2000 гг.), Journal of Object-Oriented Programming (1995–2001 гг.), Software Development (1999–2001 гг.).

В сферу его научных интересов входят и проблемы образования в областях Computer Science и Software Engineering. Им разработан оригинальный метод обучения основам программирования, получивший название «обращенный учебный план», подтвержденный опытом работы со студентами ЕТН.

За заслуги перед программистским сообществом профессор Б. Мейер в 2005 г. удостоен высокой

награды — стал первым лауреатом премии Дала-Нигарда, учрежденной в честь создателей первого объектного языка программирования Simula.

Профессор Б. Мейер имеет давние дружественные связи с российским программистским сообществом. Начиная с ученым он был приглашен А. П. Ершовым на стажировку в Новосибирский академгородок. Эти связи укрепились в последние годы. Бертран Мейер в качестве приглашенного докладчика выступал:

- в 2003 г. в Новосибирске на Пятой Международной конференции «Perspectives of System Informatics», посвященной памяти А. П. Ершова;
- в 2004 г. в Зеленогорске (Санкт-Петербург) на Международной конференции, организованной Microsoft Research;
- в 2005 г. в Рыбинске (Ярославль) на конференции «Преподавание информационных технологий в России»;
- 1 июня 2006 г. под Москвой на конференции по оффшорному программированию, организованной ассоциацией Руссофт.

После знакомства с Берtrandом Мейером и его биографией наступил торжественный момент вручения мантии почетного доктора СПбГУ ИТМО.

Затем профессор Мейер выступил с часовой лекцией, в которой изложил свои взгляды на создание надежных программ и рассказал, что такое «программирование по контракту».

Все это время в зале звучала живая русская речь, что вызвало большое удивление и радость у слушателей. Доклад завершился овацией.

После доклада профессор Мейер ответил на вопросы присутствующих, а затем он с супругой и участниками семинара в неформальной обстановке провели еще около двух незабываемых часов, обсуждая проблемы компьютерного образования и науки.

Вскоре профессор В. Н. Васильев получил от Б. Мейера письмо, в котором тот благодарил за оказанную честь и теплоту приема: «Этот день будет для меня и моей жены прекрасной памятью на всю жизнь»\*, а в письме ко мне высказал предложение о дальнейшем сотрудничестве. В заключение этого письма Бертран Мейер пишет: «Я был сильно удивлен качеством выступлений ваших студентов и их командным духом».

Эта встреча останется незабываемой и для молодых людей, которые первый раз в жизни общались с классиком. Как говорится — надо чаще встречаться.

*А. А. Шалыто,  
доктор техн. наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Технологии программирования»  
СПбГУИТМО*

\* <http://is.ifmo.ru/english/meyerblag/>

## КАФЕДРЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ — 35 ЛЕТ. ИЗ ПРОШЛОГО ЧЕРЕЗ НАСТОЯЩЕЕ В БУДУЩЕЕ

История кафедры вычислительных систем и сетей начинается с февраля 1972 г., когда она была организована в Ленинградском институте авиационного приборостроения (ЛИАП), ныне Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Первым заведующим кафедрой стал доктор технических наук профессор М. Б. Игнатъев.

Основным научным направлением кафедры было определено исследование новых развивающихся вычислительных структур для решения задач искусственного интеллекта, управления роботами, гибкими системами. В 1972 г. М. Б. Игнатъев был назначен заместителем Главного конструктора СССР по роботам и внес большой вклад в создание отрасли роботостроения.

Работы сотрудников кафедры по роботам получили признание не только в СССР, но и за рубежом. В 1980 г., активно работая по направлению визуальных адаптивных робототехнических систем, доцент И. Л. Ерош защитил докторскую диссертацию. В 1982 г. М. Б. Игнатъев получил Государственную премию СССР за участие в создании научно-популярного кинофильма «Человек и робот». Коллегия Минвуза СССР на основе работ кафедры приняла решение об организации в ЛИАП подготовки инженеров по специальности «Робототехнические системы» (0654). Установились связи по созданию и применению промышленных роботов с предприятиями Ленинграда, Москвы, Новосибирска и других городов.

За участие в работе по созданию автоматизированного широкопрокатного цеха механообработки на Днепропетровском электровозостроительном заводе в 1983 г. Е. И. Перовская удостоена премии Совета Министров СССР. По этому направлению Е. И. Перовская позже защитила докторскую диссертацию (защитено также 11 кандидатских диссертаций).

Кафедра явилась инициатором работ по созданию рекурсивных многопроцессорных машин высокой производительности и надежности. Большой вклад в развитие этого направления внес В. А. Торгашев. За участие в работах по созданию и внедрению в народное хозяйство высокопроизводительного многопроцессорного вычислительного комплекса, новой технологии создания математического обеспечения и программных средств в 1985 г. кафедра получила Почетный диплом ВЦСПС и ГКНТ. В 1986 г. за разработку и внедрение в народное хозяйство перспективной технологии создания программных средств для различных

ЭВМ сотрудник кафедры Л. Г. Осовецкий награжден премией Совета Министров СССР. В 1987 г. премии Совета Министров СССР удостоен В. В. Фильчаков за разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение для распределенной обработки информации.

Одним из важных научных направлений кафедры с момента ее основания является техническая диагностика вычислительных машин, алгоритмов и динамических систем. Научные и практические исследования различных аспектов технической диагностики в ЛИАП начались в начале 60-х годов на кафедре технической кибернетики и продолжались на кафедре вычислительных систем и сетей. Их основой является метод контроля и диагностики, получивший название метода избыточных переменных. Развивая и углубляя этот метод, в 1980 г. доцент Л. А. Мироновский защитил докторскую диссертацию. В области контроля и диагностики выполнено большое количество хозяйственных и госбюджетных научно-исследовательских работ, защищено 12 кандидатских диссертаций, получено около 50 авторских свидетельств на изобретения.

На кафедре традиционно ведутся исследования в области искусственного интеллекта. Сформировано новое научное направление — артоника, которое связано с использованием структур изобразительного искусства, архитектуры при создании сложных информационно-вычислительных систем, экспертных систем, систем автоматизации человеческой деятельности, гибких управляющих структур и т. п. В 2002 г. при кафедре организован Международный институт кибернетики и артоники.

В 1998 г. сформировано направление «Архитектура виртуальных миров». К 300-летию Санкт-Петербурга разработан проект «Виртуальные миры университетов Петербурга». За разработку новых информационных технологий — создание комплекса инновационных разработок «Образовательные виртуальные миры Петербурга» — в 2005 г. профессор М. Б. Игнатъев, доценты А. В. Никитин и Н. Н. Решетникова вместе с коллегами были награждены премией Президента России в области образования (Указ №79 от 25.01.2005г).

На протяжении 20 лет сотрудниками кафедры ведутся научные и практические исследования в области теории разрядных вычислений. Развив и существенно дополнив основные разделы теории разрядных вычислений и проектирования специализированных процессоров для систем обработ-



ки информации, в 2001 г. доцент М. Б. Сергеев защитил докторскую диссертацию.

Традиционными для кафедры являются и другие научные направления, связанные с имитационным моделированием города как сложной системы для подготовки управленческих решений; теорией построения сенсорных систем интеллектуальных роботов для экстремальных условий; исследованием систем виртуальной реальности. Развиваются научные направления, связанные с разработкой концепций построения бортового оборудования летательных аппаратов; архитектур, структур и системного программного обеспечения параллельных вычислительных систем.

В 2002 г. кафедру возглавил доктор технических наук М. Б. Сергеев. С этого момента одним из новых научных направлений, развиваемых совместно с творческим коллективом специалистов университета, является теория глобально распределенных информационно-управляющих систем и сетей на основе необслуживаемых модулей встраиваемого класса. В рамках этого направления проводится ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а в 2004 г. ассистент А. А. Востриков защитил кандидатскую диссертацию.

Кафедра непрерывно на протяжении 25 лет проводит ежегодные конференции по школьной информатике и проблемам устойчивого развития, через которые прошли свыше 15 000 школьников и студентов — основные кадры специалистов по информатике в регионе.

Большое внимание традиционно уделяется использованию результатов научных исследований в учебной работе, а также привлечению к научной работе студентов, которые неоднократно награждались грамотами международных школ-семинаров и конференций. За последние пять лет четыре студенческие работы, представленные на Всероссийский открытый конкурс по разделу «Приборостроение», награждены медалями Министерства образования РФ «За лучшую научную студенческую работу».

За прошедшие 35 лет кафедра вычислительных систем и сетей стала известной в стране и за рубежом научно-педагогической школой, подготовив-

шей за это время свыше 4 000 инженеров в области компьютерной техники и информационных технологий, а также свыше 150 кандидатов и 20 докторов наук. Хорошей традицией стала подготовка научных кадров для различных городов страны. География мест работы бывших аспирантов весьма разнообразна: Таганрог, Владивосток, Омск, Пенза, Иркутск, Новороссийск, Рыбинск и др.

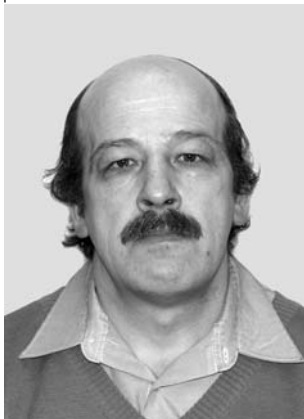
Много лет трудятся на кафедре, отдавая силы подготовке специалистов профессора М. Б. Игнатьев, Л. А. Мироновский, И. Л. Ерош, А. В. Гордеев, В. В. Михайлов, Г. И. Пенигин, доценты В. В. Балберин, Н. А. Балонин, Н. Н. Бровин, Л. Н. Бариков, В. Н. Елизаров, Н. М. Иванов, Ю. Д. Крылов, Н. В. Кучин, В. П. Попов, В. М. Прохоров, Л. В. Плющева, Н. Н. Решетникова, Н. В. Соловьев, В. И. Петров, А. В. Никитин, А. Ю. Молчанов.

Большая работа по оснащению учебных лабораторий и поддержанию их на высоком уровне выполняется много лет начальником ВЛ-44 Л. А. Алексеевым, заведующей лабораторией В. М. Федоровой, мастером В. Е. Кузнецовой, техником И. Н. Мамонтовой, ведущим инженером Г. А. Финноженом, инженерами В. Н. Курбатовым, Л. Н. Бурштын, А. П. Соловьевым, И. А. Кондаковой, техником Пескиной Т. С. и другими сотрудниками.

Новейшие направления научных исследований, возможность трудиться и повышать свою квалификацию рядом с известными учеными, участвовать в опытно-конструкторских работах по созданию современных информационно-управляющих систем в интересах государства привлекают на кафедру талантливую молодежь, совмещающую исследования с педагогической нагрузкой. Именно с такими молодыми кадрами как старшие преподаватели А. А. Востриков, Д. С. Декхамбаев, А. Ю. Козловский, ассистенты А. Б. Бубликов, А. С. Селезнев, А. О. Мухаметова, О. В. Мухина и развитием самых современных компьютерных сетевых технологий связывает кафедра вычислительных систем и сетей свое будущее.

*Доктор техн. наук, профессор М. Б. Сергеев  
Доктор техн. наук, профессор М. Б. Игнатьев*

**АНДРЕЕВ**  
Евгений  
Николаевич



Старший научный сотрудник ФГУП «НИИ Электромаш». В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Электрические машины». Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — электромеханика, сверхпроводниковые магнитные системы, криогенное оборудование.

**ВАНДЮК**  
Наталья  
Юрьевна



Научный сотрудник Института химии силикатов РАН. В 1997 году окончила Санкт-Петербургский государственный технический университет. В 2005 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — электромеханика, методы преобразования энергии, сверхпроводимость.

**ВЕДЕРНИКОВ**  
Юрий  
Вадимович



Доцент, старший преподаватель кафедры систем управления ракет Михайловской военной артиллерийской академии. В 1992 году окончил Саратовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. А. И. Лизюкова. В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 56 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, теория принятия решений, исследование операций, инновационные технологии управления, векторная оптимизация сложных технических систем, принятие решений в условиях неопределенности и риска, интервальный анализ.

**ВОЛКОВ**  
Дмитрий  
Александрович



Аспирант кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Является автором шести научных публикаций. Область научных интересов — электромеханика и сверхпроводимость.

**КОРОТКОВ**  
Дмитрий  
Александрович



Аспирант кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Является автором семи научных публикаций. Область научных интересов — электромеханика и сверхпроводимость.

**КРАВЦОВ**  
Александр  
Михайлович



Инженер лаборатории кафедры систем управления ракет Михайловской военной артиллерийской академии, соискатель ученой степени кандидата технических наук. В 2002 году окончил Саратовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. А. И. Лизюкова. Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — оптимизация сложных интегрированных систем управления.

**КУНГУРЦЕВ**  
Вадим  
Викторович



Преподаватель кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, лауреат гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых — кандидатов наук и их научных руководителей. В 1996 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского. В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 35 научных публикаций. Область научных интересов — протоколы и технологии информационного обмена в радиотехнических комплексах управления, сбора и передачи информации.

**МАЛЬЦЕВ**  
Георгий  
Николаевич



Профессор, начальник кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, заслуженный деятель науки Российской Федерации, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. В 1980 году окончил Ленинградский инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского. В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах, космические радиотехнические комплексы управления, сбора и передачи информации.

**ПЛАТОНОВА**  
Мария  
Юрьевна



Доцент кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1981 году окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Электрические машины». В 1997 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 47 научных публикаций. Область научных интересов — методы преобразования энергии, сверхпроводимость, математическое моделирование.

**МАТРОСОВ**  
Валерий  
Витальевич



Начальник отделения научно-вычислительного отдела Михайловской военной артиллерийской академии, соискатель ученой степени кандидата технических наук. В 2001 году окончил Саратовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. А. И. Лизюкова. Является автором 34 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, информационное обеспечение процессов принятия решений, информационные технологии в управлении.

**НЕСТЕРЕНКО**  
Владимир  
Дмитриевич



Начальник отдела новых технологий Генеральной дирекции ОАО «Северо-Западный Телеком». В 1976 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Сети, узлы связи и распределения информации». Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — разработка концепций и проектов сетей передачи данных, сети следующего поколения (NGN), централизованные системы управления сети NGN.

**САФРОНОВ**  
Валерий  
Васильевич



Профессор, главный научный сотрудник ОАО «КБ Электроприбор» (г. Саратов), действительный член Академии военных наук, заместитель председателя Поволжского отделения Академии военных наук по научной работе. Награжден знаком «Изобретатель СССР». В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных и учебно-методических публикаций. Область научных интересов — методы целочисленного программирования, методы теории принятия решений.

**СЕРГЕЕВ**  
Михаил  
Борисович



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации. В 1980 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, 13 запатентованных изобретений. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления.

**СОЛОВЬЕВ**  
Николай  
Владимирович



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения. В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения». Является автором более 20 научных публикаций, 4 запатентованных изобретений. Область научных интересов — распознавание образов, компьютерная обработка и анализ изображений, техническое зрение роботов.

**ТИХОНОВ**  
Эдуард  
Прокофьевич



Доцент кафедры биомедицинской электроники и охраны среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, член-корреспондент Метрологической академии. В 1962 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. Является автором более 160 научных публикаций, в том числе более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов — кибернетика, информатика, моделирование, информационно-измерительные системы, биомедицинская инженерия.

**УМЕРЕНКОВ**  
Сергей  
Александрович



Научный сотрудник научно-исследовательской группы Михайловской военной артиллерийской академии, соискатель ученой степени кандидата технических наук. В 1997 году окончил Саратовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск им. А. И. Лизюкова. Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — оптимизация сложных интегрированных систем управления.

**ЧЕРНОВ**  
Владимир  
Георгиевич



Профессор кафедры управления и информатики в технических и экономических системах Владимирского государственного университета. В 1966 году окончил Рязанский радиотехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1971 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 80 научных публикаций, трех монографий, 15 запатентованных изобретений. Область научных интересов — системы и методы поддержки принятия решений для слабоструктурированных задач, приложения аппарата нечетких множеств в исследованиях экономических процессов.

**ЧУБРАЕВА**  
Лидия  
Игоревна



Профессор, заведующая кафедрой информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, член-корреспондент РАН, академик Академии электротехнических наук РФ, член международных организаций IECRE, ISA, IEEE. В 1970 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1992 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций, четырех монографий, 15 изобретений. Область научных интересов — электромеханика, нетрадиционная электромеханика, прикладная сверхпроводимость.

УДК 621.865.8

Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации

*Sergeev M. B., Soloviev N. V., Stadnik A. I.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 2–7.

Приведен обзор методов повышения контрастности растровых изображений с целью увеличения визуальной различимости фрагментов, которые могут найти применение в системах цифровой обработки видеoinформации. Рассмотрены методы, основанные на преобразовании шкалы яркости, и адаптивные методы.

Список лит.: 5 назв.

УДК 681.314+681.51.011

Стохастический, пространственный аналого-цифровой преобразователь и его связь с нейронными структурами

*Tikhonov E. P.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 8–18.

Предложена структура стохастического пространственного аналого-цифрового преобразователя и исследован алгоритм его функционирования. В результате исследования усредняющих свойств алгоритма установлена связь между принципом функционирования искусственного нейрона и стохастическим пространственным аналого-цифровым преобразователем.

Список лит.: 5 назв.

УДК 681.327.8

Концепция построения архитектуры моделей процессов управления инфокоммуникационными сетями (Часть 2)

*Nesterenko V. D.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 19–24.

Предложена архитектура инфокоммуникационной сети как объекта управления, основанная на модели мультисреды, охватывающей среды взаимодействия, генерации, распространения инфокоммуникационных сетей и позволяющая провести структуризацию моделей и алгоритмов их адаптивного управления.

Список лит.: 3 назв.

UDK 621.865.8

Methods to increase raster image contrast for systems of digital video processing

*Sergeev M. B., Soloviev N. V., Stadnik A. I.* IUS, 2007. N 1. P. 2–7.

We give a review of the methods to sharpen the contrast of raster images that can be used in the systems of digital video processing with the goal of increasing the visual discernibility of certain fragments. Methods based on the transformation of the brightness scale and adaptive methods are considered.

Pefs: 5 titles.

UDK 681.314+681.51.011

A stochastic spatial analog-to-digital converter and its relation with neural structures

*Tikhonov E. P.* IUS, 2007. N 1. P. 8–18.

In this work we propose a structure of a stochastic spatial analog-to-digital converter and study the algorithm of its functioning. The investigation of the averaging properties of the algorithm leads to a relation between the principle of functioning of the artificial neuron and the stochastic spatial analog-to-digital changer.

Pefs: 5 titles.

UDK 681.327.8

On the architecture of control processes for infocommunication networks (Part 2)

*Nesterenko V. D.* IUS, 2007. N 1. P. 19–24.

The paper proposes an architecture for the infocommunication network as an object of control which is based on a model of composed media including the media of interaction, generation and interaction of infocommunication systems that allows the structurisation of both the models and the algorithms of their adaptive control.

Pefs: 3 titles.

УДК 621.314.2

Математическое и физическое моделирование процессов в сверхпроводниковых трансформаторах  
*Андреев Е. Н., Вандюк Н. Ю., Волков Д. А., Коротков Д. А., Платонова М. Ю., Чубраева Л. И.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 25–32.

В статье дан обзор современного состояния и перспектив развития трансформаторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости. Рассмотрены особенности разработки трехфазного трансформатора броневое типа с обмотками из ленточного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и магнитопроводом из ленточной нанокристаллической стали. Представлены результаты математического моделирования электромагнитных полей трансформатора, проанализированы способы ограничения токов короткого замыкания.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.396.946

Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи

*Мальцев Г. Н.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 33–39.

Дается характеристика современных спутниковых систем связи и основных направлений развития их фиксированной и подвижной служб. Основное внимание уделено тенденции «приближения» абонентов подвижной спутниковой связи к спутниковым каналам, реализация которой неразрывно связана с внедрением в спутниковую связь сетевых информационных технологий. Приводятся примеры использования сетевых информационных технологий в современных высокоорбитальных и низкоорбитальных системах спутниковой связи общего пользования.

Список лит.: 10 назв.

УДК 007:004.3

Методика оптимизации структуры сложных технических систем в условиях риска

*Сафронов В. В., Ведерников Ю. В., Матросов В. В., Умеренков С. А., Кравцов А. М.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 40–45.

Рассматривается оптимизация сложной технической системы на начальных стадиях ее жизненного цикла в условиях риска. Задача сводится к построению упорядоченного множества (подмножества) Парето. Предлагается метод решения, основанный на комплексном применении методов теории принятия решений, ветвей и границ, интервального анализа.

Список лит.: 13 назв.

УДК 621.314.2

Mathematical and physical modelling of processes in superconductor transformers.

*Andreev E. N., Vandyuk N. Yu., Volkov D. A., Korotkov D. A., Platonova M. Yu., Chubraeva L. I.* IUS, 2007. N 1. P. 25–32.

A review the modern state and future development of the high-temperature superconductor transformers is given. We consider the three-phase shell-type transformer with windings of high-temperature superconductor tape (HTS) and a core of tape-type nanocrystalline steel. The results of mathematical modelling of electromagnetic fields of the transformer are presented and methods of short-circuit currents limitation are analyzed.

Pefs: 6 titles.

УДК 621.396.946

Network information technologies in modern satellite communication systems

*Maltsev G. N.* IUS, 2007. N 1. P. 33–39.

We describe modern satellite communication systems and principal directions of development of their fix and mobile services. Main attention is payed to the tendency of “approaching” of the customers towards the satellite links related to the introduction of network information technologies in satellite communication. We give examples of application of the network information technologies in modern low earth orbit and high earth orbit general purpose satellite communication systems.

Pefs: 10 titles.

УДК 007:004.3

Optimization of complex technical systems in the conditions of risk

*Safronov V. V., Vedernikov Yu. V., Matrosov V. V., Umerenkov S. A., Kravtsov A. M.* IUS, 2007. N 1. P. 40–45.

We study the optimization of a complex technical system at an early stage of its life cycle in the conditions of risk. The problem is reduced to the construction of an ordered Pareto set (subset). We propose a solution based on a complex application of methods of system analysis, the branch and bound method, the decision making theory and interval analysis.

Pefs: 13 titles.

УДК 519.81

Решение задач многокритериального альтернативного выбора на основе геометрической проекции нечетких множеств.

*Чернов В. Г.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 46–51.

Рассматриваются ограничения, которые имеют место при решении задач многокритериального выбора альтернатив на основе правил нечеткого условного вывода, когда для свертки условий критериального соответствия используется операция min. Предлагается новый метод решения задач многокритериального выбора альтернатив, основанный на операции геометрической проекции нечетких множеств.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.396.96

Устойчивость протоколов информационного обмена в космических сетях связи и управления

*Кунгурцев В. В.* Информационно-управляющие системы, 2007. № 1. С. 52–54.

Проведен сравнительный анализ помехоустойчивости и скорости передачи информации в протоколах информационного обмена с автоматическим переспросом на канальном и транспортном уровнях информационного взаимодействия космических сетей связи и управления.

Список лит.: 6 назв.

УДК 519.81

Solving problems of multicriterial choice on the basis of geometrical projection of fuzzy sets

*Chernov V. G.* IUS, 2007. N 1. P. 46–51.

In the article the author examines the limitations that take place in the process of multicriterial choice between alternatives on the basis of fuzzy conditional conclusion rules when min-operation procedure is used for convolution of the conditions of criterial accordance. A new method of decision of the problem of multicriterial alternative choice based on the operation of geometrical projection of fuzzy sets is proposed.

Pefs: 6 titles.

УДК 621.396.96

The stability of information exchange protocols in control and communication space satellite systems

*Kungurtsev V. V.* IUS, 2007. N 1. P. 52–54.

An analysis of the noise stability and transfer speed of automatic repeat request protocols is given. These protocols may be used at data-link level and at transport level of communication and management space network systems. In the analysis, the author compares the performance and error-rate for using protocols at these two levels.

Pefs: 6 titles.





*30-летие кафедры вычислительных систем и сетей ГУАП. 2002 год*



*Встреча с космонавтом  
А. А. Леоновым.  
Слева направо:  
А. А. Леонов, В. И. Прохоров,  
Е. И. Перовская, М. Б. Игнатъев*

*Сотрудники кафедры  
на отдыхе: (слева направо)  
В. Б. Смирнов,  
А. А. Мироновский,  
Н. М. Иванов, С. В. Горбачев*



*Работа на аналоговой ЭВМ:  
инженер Финожонок Г. А.  
(сидит) и аспирантка  
кафедры. 1979 год*

