

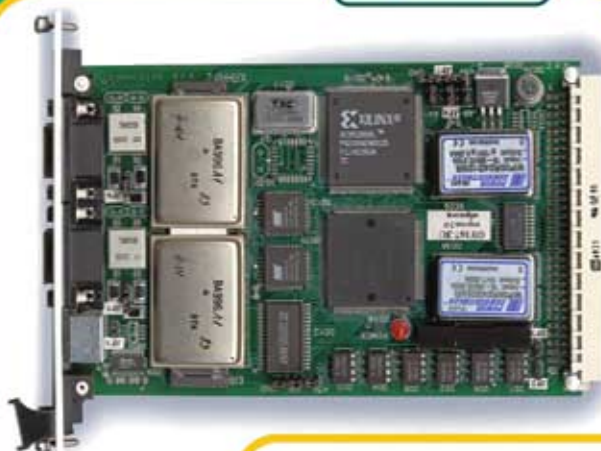
ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



CAN-200PC

C167-3U



CAN-505PC104



CAN-505-6U

1/2002

Оводенко Анатолий Аркадьевич



Доктор технических наук,
профессор, заслуженный
деяТЕЛЬ науки Российской
Федерации

Уважаемый читатель!

Вы получили первый номер федерального научного журнала «Информационно-управляющие системы».

Тематическая направленность нового журнала охватывает широкий круг вопросов фундаментального и прикладного характера по проблемам развития современных информационных технологий. В журнале предполагается публикация научных статей проблемного характера, обзорных и аналитических, проведение дискуссий по стратегическим вопросам развития информационных технологий, включая вопросы построения информационно-управляющих систем, системного анализа и обработки информации, моделирования систем и процессов, совершенствования информационных каналов и сред. Мы надеемся, что новое издание будет способствовать раскрытию творческого потенциала отечественной науки, в том числе вузовской, а также содействовать улучшению качества подготовки специалистов высшей квалификации.

Приглашаем ученых и инженеров к творческому сотрудничеству с журналом. Здесь будут приветствоваться конструктивные авторские публикации о новых научных, технических и технологических решениях и результатах их внедрения в производство.

Мы всегда рады разнообразным предложениям о совместной работе. Готовы поместить на страницах журнала информационные и рекламные материалы российских и зарубежных предприятий и фирм, работающих в области информационных технологий.

Ждем ваших статей и отзывов.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'А. Оводенко', written over a faint background of a circuit board.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель и издатель:

ФГУП «Издательство «Политехника»»

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
А. Г. Елисеенко,
В. Н. Козлов,
доктор технических наук, профессор
В. 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

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
доктор технических наук, профессор
В. Ф. Мелехин,
доктор технических наук, профессор
А. В. Смирнов,
доктор технических наук, профессор
В. А. Фетисов,
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: О. А. Рубинова

Корректоры: Т. Н. Гринчук, Н. В. Соловьева

Дизайн: М. Л. Черненко

Компьютерная верстка: М. В. Авилон,

А. М. Сергеев, Ю. А. Окунева

Ответственный секретарь: А. М. Сергеев

Адрес редакции: 191011, Санкт-Петербург,

Инженерная ул., д. 6

Тел./факс: (812) 312-53-90

E-mail: asklab@aanet.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 в любом отделении связи по каталогу агентства "Роспечать". Индекс 15385.

Банковские реквизиты издательства:

Получатель: ИНН 7825331278, ФГУП «Издательство «Политехника»»,
Р/с 40503810819000001855 в Куйбышевском филиале
ОАО «Банк Санкт-Петербург» в г. Санкт-Петербурге,
К/с 30101810900000000790, БИК 044030790, ОКОНХ 87100,
ОКПО 02425324

© Издательство «Политехника», 2002

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Бураков М. В., Коновалов А. С. Нейронечеткие системы управления 2

Осипов Л. А., Полякова Т. Г. Синтез нелинейных систем управления методом ортогональных проекций 8

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Астапкович А. М., Востриков А. А., Сергеев М. Б., Чудиновский Ю. Г. Информационно-управляющие системы на основе Internet 12

Катенин В. А., Катенин А. В. Новые возможности комплексного использования спутниковых и ГИС-технологий при навигационно-гидрографическом обеспечении 18

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Балонин Н. А., Мироновский Л. А. Компьютерные модели линейных операторов динамической системы 24

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Гуцалов Н. В. Экспериментальная оценка быстродействия версий ОС Linux 30

Хвоц С. Т., Луковкин А. В., Лютов А. Г. Применение шины CAN-Bus в распределенных системах сбора и обработки информации в реальном масштабе времени 35

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Ерош И. Л. Защита информационных потоков в системах распределенного контроля и управления 40

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Жаринов О. О., Шепета А. П. Методика обнаружения микропотенциалов ЭКГ 48

Бегун П. И., Сухов В. К. Проблемы информационного обеспечения малоинвазивных интервенционных рентгено-хирургических операций на кровеносных сосудах 52

Суворов Н. Б. Информационная составляющая в биоуправлении функциональным состоянием человека 57

РЕЦЕНЗИИ

Сергеев М. Б. "Микропроцессорные системы": современно и своевременно 65

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

66

АННОТАЦИИ

70

ЛР № 010292 от 18.08.98.

Сдано в набор 02.08.2002. Подписано в печать 09.09.2002. Формат 60×90/8.

Бумага офсетная. Гарнитура Pragmatica. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 10,3. Тираж 1000 экз. Заказ 624.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Политехника-сервис».

191011, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

Оригинал-макет изготовлен в ФГУП «Издательство «Политехника».

191011, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

НЕЙРОНЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

М. В. Бураков,

канд. техн. наук, доцент

А. С. Коновалов,

д-р техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)

Рассматриваются механизмы нейронечеткой технологии разработки интеллектуальных систем управления сложными объектами. Этот комплексный подход предполагает использование имитационного моделирования для извлечения знаний о процессе управления, нечетких технологий для представления и накопления знаний, нейросетевых механизмов для реализации закона управления, а также генетического алгоритма для настройки регулятора.

Введение

Нейронечеткие регуляторы (ННР) используют нечеткие правила и нейронный механизм реализации этих правил. Основное достоинство такого подхода заключается в том, что функционирование нейронной сети (НС) получает семантическую интерпретацию, а нечеткие правила реализуются в виде, допускающем обучение и параллельную обработку. Исследования ННР ведутся с середины 80-х годов прошлого века ([1-4] и др.).

ННР могут использоваться практически в тех же областях, что и «обычные» нечеткие регуляторы и НС, а именно — в системах распознавания, прогнозирования, диагностики и управления [5, 6]. Однако процесс конструирования ННР отличается тем, что он ориентирован на извлечение неизвестных знаний из данных (*data mining*), что необходимо для реализации фазы структурного обучения регулятора, предшествующей фазе параметрического обучения. Эта важная особенность может сделать ННР эффективным инструментом при работе с имитационными моделями (ИМ) сложных объектов.

Проблема конструирования регуляторов для сложных объектов с помощью ИМ рассмотрена в работах [7, 8]. Основная задача здесь заключается в переходе от ИМ к модели управления объектом путем выделения конечного набора управляющих правил из большого массива экспериментальной ин-

формации. Повсеместное использование компьютерного моделирования позволяет утверждать, что применение ННР на этом направлении является одним из важнейших и весьма перспективным.

Нечеткие контроллеры и моделирование

Нечеткие регуляторы, или нечеткие логические контроллеры (НЛК), являются наиболее ярким приложением теории нечетких множеств Л.Заде [9]. Базовое понятие этой теории предполагает, что любой элемент множества $x \in X$ может соответствовать сразу нескольким нечетким подмножествам A, B, \dots, Z с разной степенью принадлежности $\mu_A(x), \mu_B(x), \dots, \mu_Z(x)$, принимающей значения в диапазоне $[0, 1]$. Это позволяет описывать качественные понятия, вводя в рассмотрение лингвистические переменные (ЛП).

В НЛК используются обычно ЛП «ошибка управления» (ε^*), «производная ошибки управления» ($(d\varepsilon(t)/dt)^*$) и «сигнал управления» (u^*). Эти ЛП принимают значения на множестве термов: «отрицательное большое» (ОБ), «положительное малое» (ПМ), «нулевое» (Н) и т. п. Каждый из термов является нечетким множеством. Механизмы работы НЛК детально описаны в обширной литературе (например, [10]). Здесь лишь подчеркнем, что нечеткие правила связывают наблюдаемую ситуацию и управление, которое должно в этой ситуации использоваться:

правило 1: если ($\varepsilon^* = \text{«Н»}$) и ($(d\varepsilon(t)/dt)^* = \text{«ОМ»}$) то ($u^* = \text{«ПМ»}$);

правило 2: если ($\varepsilon^* = \text{«ОБ»}$) и ($(d\varepsilon(t)/dt)^* = \text{«ПМ»}$) то ($u^* = \text{«Н»}$);

.....

правило N: если ($\varepsilon^* = \text{«ПМ»}$) и ($(d\varepsilon(t)/dt)^* = \text{«ПС»}$) то ($u^* = \text{«ОМ»}$).

Обычно правила НЛК формулируются с помощью человека-эксперта. Но этого часто бывает недостаточно для заполнения всей базы знаний. Здесь кроется главная трудность использования НЛК. Другая проблема заключается в отсутствии математического доказательства устойчивости НЛК. Эти проблемы могут ограничивать использование НЛК в некоторых областях и приложениях. Но, с другой стороны, условия устойчивости обычно доказываются для упрощенной (линейной) модели системы. Убедиться в устойчивости системы управления сложным объектом можно либо после проведения натуральных экспериментов, либо после серии вычислительных экспериментов с использованием адекватной (нелинейной) математической модели объекта.

НЛК присущи такие признанные достоинства, как малая чувствительность к внешним и параметрическим возмущениям в силу естественной адаптивности нечетких правил «в малом» и гибкость в силу того, что закон управления формируется из отдельных правил, так что каждое новое правило может дополнить описание закона управления в новой ситуации. Эти особенности открывают возможность использования компьютерного моделирования для формулирования правил управления объектом.

Несмотря на впечатляющую мощь современной вычислительной техники, использование ИМ для синтеза управления в реальном времени во многих случаях невозможно по ряду причин.

- Управляющее решение синтезируется после выполнения множества прогонов модели с варьируемыми параметрами. При этом нельзя гарантировать не только оптимальность полученного результата, но и саму возможность его получения за отведенное для принятия решения время.

- Для обеспечения адекватности модели объекту нужно решать проблему идентификации в реальном времени. В общем случае настройка модели также требует выполнения прогонов с изменяемыми параметрами.

Таким образом, можно констатировать, что обычно ИМ может лишь качественно соответствовать сложному объекту и не может использоваться в реальном времени. Однако при соблюдении качественного соответствия ИМ может использоваться в режиме *off line* для обучения интеллектуального регулятора. Аппаратом для обработки качественной информации служит теория нечетких множеств.

Методика формулирования нечетких правил по результатам компьютерного моделирования предполагает два этапа работы [3, 4].

На первом этапе многократно ставится задача управления при различных условиях. С помощью поисковых процедур синтезируется множество эталонных траекторий. Фиксируя вход и выход модели при движении по эталонной траектории в разные моменты времени, можно получить множество обучающих пар $\langle X, Y \rangle$, где X — вектор входа модели (управление), Y — вектор выхода модели.

На втором этапе обучающие пары обрабатываются с целью формирования нечетких правил управления. Для этого нужно преобразовать обучающие пары в нечеткую форму. Здесь возможны два варианта:

1. Заранее описываются ЛП таким образом, что их термы равномерно распределяются по соответствующим базовым шкалам входных и выходных переменных.

2. Каждое «четкое» значение входа и выхода модели преобразуется в нечеткую форму, становясь центральной точкой функции принадлежности терма ЛП, в которой $\mu_A(x) = 1$.

Соответственно, можно предложить два алгоритма построения нечетких правил, один из которых основан на обработке значений принадлежности элементов обучающих пар к термам ЛП, а второй — на векторной классификации с помощью вспомогательной сети Кохонена.

Полученный итоговый набор нечетких правил является предварительным, с его помощью решается задача оценки структуры НС прямого распространения, параметры которой подстраиваются на следующем этапе работы.

Выбор структуры нейронечеткой системы

Формирование нечетких правил управления. В работах [7, 11] была сформулирована простая методика для генерации нечетких правил из вход—выходных данных, получаемых при моделировании в режиме *off line*. Похожая методика независимо предложена в работе [12].

Рассмотрим для простоты изложения систему с двумя входами x_1 и x_2 и одним выходом y . Пусть имеется множество обучающих данных, полученных при движении объекта по эталонным траекториям:

$$(x_1^1, x_2^1, y^1), (x_1^2, x_2^2, y^2), \dots, (x_1^n, x_2^n, y^n).$$

Для получения нечетких правил выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Входное и выходное пространство разделяются на нечеткие области — термы ЛП. Число термов каждой входной и выходной ЛП фиксировано, и они равномерно распределены в области определения каждой ЛП.

Для функций принадлежности термов вводится условие полноты ϵ [13] при $\epsilon = 0,5$ или $\epsilon = 1$ (рис. 1). Это условие означает, что для заданного значения x всегда существует терм T_i , такой что $\mu_{T_i}(x) \geq \epsilon$. За счет этого условия нечеткая система выводов обеспечивает плавный переход от одного лингвистического значения к другому.

Шаг 2. Генерируются нечеткие правила. Сначала определяется степень принадлежности входных данных к отдельным термам ЛП. Например, пусть

$$\begin{aligned} \mu_{PM}(x_1^1) &= 0,8; \\ \mu_{PC}(x_2^1) &= 0,2; \\ \mu_H(y^1) &= 0,6, \end{aligned}$$

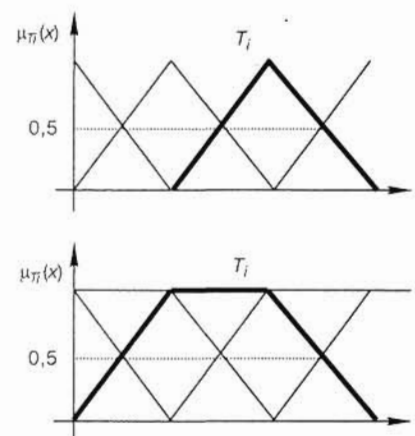
где $\mu_{PM}(x_1^1)$ — степень принадлежности входного значения x_1 к терму с названием «ПМ» соответствующей ЛП.

Таким образом, получается совокупность троек вида:

$$(0,8; 0,2; 0,6), (0,7; 0,5; 0,1) \dots$$

Эта совокупность троек степеней принадлежности описывает все возможные варианты правил для каждой тройки входных данных.

Затем выбирается тройка с максимальным значением принадлежности по двум входным и



■ Рис. 1. Описание термов лингвистических переменных

одной выходной переменной, которая порождает правило. Например, правило с номером 1:

$$(x_1^1, x_2^1, y^1) \Rightarrow (\mu_{\text{ПМ}}(x_1) = 0,8; \mu_{\text{ОС}}(x_2) = 0,6; \mu_{\text{ОБ}}(y) = 0,9) \Rightarrow$$

Правило 1: если $x_1 = \text{ПМ}$ и $x_2 = \text{ОС}$, то $y = \text{ОБ}$.

Шаг 3. Присвоение коэффициента определенности (КО) каждому правилу. Это позволяет выполнить сжатие базы правил, т. е. решить следующие задачи.

- во-первых, разрешить конфликты, когда одни и те же послылки в разных правилах порождают разные заключения;
- во-вторых, сократить общее число правил, так как учитываться могут только правила с максимальным КО.

Каждое правило активизируется с учетом своего КО, для вычисления которого можно использовать одну из двух формул (при приведенных выше данных):

$$\text{КО} = \mu_{\text{ПМ}}(x_1) \cdot \mu_{\text{ОС}}(x_2) \cdot \mu_{\text{ОБ}}(y) = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,9 = 0,432;$$

$$\text{КО} = \min(\mu_{\text{ПМ}}(x_1) \cdot \mu_{\text{ОС}}(x_2) \cdot \mu_{\text{ОБ}}(y)) = \min(0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,9) = 0,6.$$

Таким образом, если два или больше правил имеют одинаковые послылки и заключение, то используется правило, у которого больше КО.

Очевидно, этот метод может быть распространен и на системы со многими входами и многими выходами.

Использование сетей Кохонена. Для выделения нечетких правил из данных также можно использовать сети Кохонена — эффективный инструмент векторной классификации [4].

Будем считать, что U, V и W — нечеткие подмножества конечных множеств X, Y и Z мощностью соответственно n_x, n_y и n_z . Пусть имеется q наборов данных моделирования, описываемых тройками $(A_i^*, B_i^* \text{ и } C_i^*)$, принимающими значения на U, V и W .

Сеть Кохонена [14] имеет входной и выходной слой (рис. 2). Входной слой должен содержать $n_x + n_y + n_z$ входов, они соответствуют каждому элементу множеств X, Y и Z . Выходной слой должен содержать $n < q$ нейронов (точное число нейронов определяется по окончании обучения).

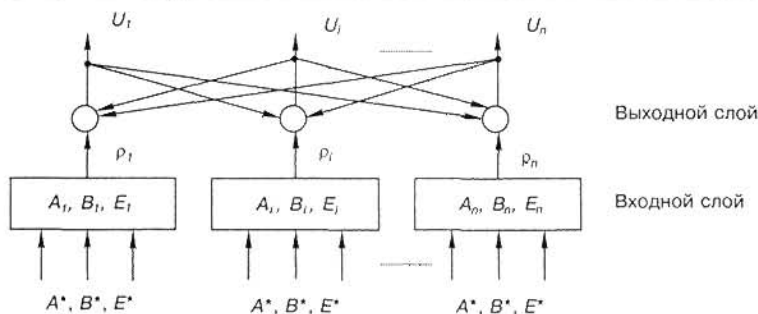
Каждый вход соединен со всеми выходами. Начальные значения весов присваиваются случайно. Введем обозначения: a_{ij}, b_{ij}, e_{ij} — значение веса между входом x_j, y_j, z_j соответственно и выходом i ; A_i, B_i, E_i — векторы, составленные из a_{ij}, b_{ij}, e_{ij} .

Пусть имеются входные наблюдения $(A^*, B^* \text{ и } C^*)$. Для каждого выходного нейрона необходимо вычислить три значения сходства:

- 1) $\rho_i^a = S((A^*(x_1), a_{i1}), (A^*(x_2), a_{i2}), \dots, (A^*(x_{n_x}), a_{inx}))$;
- 2) $\rho_i^b = S((B^*(y_1), b_{i1}), (B^*(y_2), b_{i2}), \dots, (B^*(y_{n_y}), b_{iny}))$;
- 3) $\rho_i^e = S((E^*(z_1), e_{i1}), (E^*(z_2), e_{i2}), \dots, (E^*(z_{n_z}), e_{inz}))$.

Возможная формула для измерения сходства:

$$S((\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), \dots, (\alpha_n, \beta_n)) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\alpha_i - \beta_i|.$$



■ Рис. 2. Сеть Кохонена в режиме кластеризации

На следующем шаге для вычисления окончательного выходного сигнала нейрона вводится переменная:

$$\rho_i = \min[\rho_i^a, \rho_i^b, \rho_i^e].$$

В выходном слое действует механизм латерального возбуждения-торможения (см. рис. 2). В результате соревнования происходит возбуждение или не возбуждение отдельных нейронов. Если нейрон i побеждает в соревновании и возбуждается, то он (и его ближайшие соседи) модифицируется в направлении входного вектора к (A^*, B^*, C^*) . Изменение весов нейрона i выполняется по формулам:

$$A_i' = A_i + \alpha(A^* - A_i);$$

$$B_i' = B_i + \alpha(B^* - B_i);$$

$$E_i' = E_i + \alpha(E^* - E_i).$$

Нейроны, близкие к i , также подстраиваются, но в меньшей степени. Так веса победивших нейронов приближаются к входным значениям.

Как показано в [14], в результате повторения этого процесса со всеми обучающими данными обеспечивается их кластеризация весами нейронов A_i, B_i и E_i в соответствии с обучающими данными. Один кластер относится к потенциальному правилу, которое можно вставить в базу правил. Каждый кластер представляется тройкой (A, B, E) , которая формирует основу правила:

если $(V$ есть $A)$ и $(U$ есть $B)$ то $(W$ есть $E)$

Веса связей описывают функции принадлежности термов ЛП, относящиеся к послылкам и заключениям продукционных правил. Таким образом, можно считать, что здесь все правила имеют КО = 1.

Архитектура нейронечеткого регулятора

Архитектура HyFIS (Hybrid neural Fuzzy Inference System) представляет собой многослойную сеть прямого распространения [15]. Топология HyFIS показана на рис. 3.

Нейроны входного слоя получают входные состояния, а нейроны выходного слоя вырабатывают управляющие решения. Промежуточные слои описывают функции принадлежности и правила, что позволяет получить яс-

ное представление о механизме работы такой сети.

Нейроны слоя 1 просто передают входные («четкие») сигналы в последующий слой. Каждый нейрон слоя 1 связан только с теми нейронами слоя 2, которые описывают соответствующие термы ЛП.

Нейроны слоя 2 описывают термы входных ЛП. Для входного значения вычисляются функции принадлежности к термам соответствующей ЛП. Изначально веса связей между 1-м и 2-м слоем единичные, и функции принадлежности распределены равномерно в пространстве весов. Если существуют какие-то экспертные знания, то их можно использовать при инициализации.

Нейроны слоя 2 используют гауссовские функции принадлежности, два параметра которых — центр (c) и ширина (σ) — настраиваются при обучении:

$$y_j^2 = \mu_{T_j}(x_i) = e^{-((x_i - c_j)^2 / \sigma^2)}$$

На рис. 3 ЛП описываются с помощью термов «большой» (Б), «средний» (С), «маленький» (М). Во многих случаях нужно учитывать знак входной переменной, тогда используются термы «положительный большой» (ПБ), «отрицательный средний» (ОС) и т. д.

Выходом нейронов второго слоя являются функции принадлежности входного значения к термам ЛП.

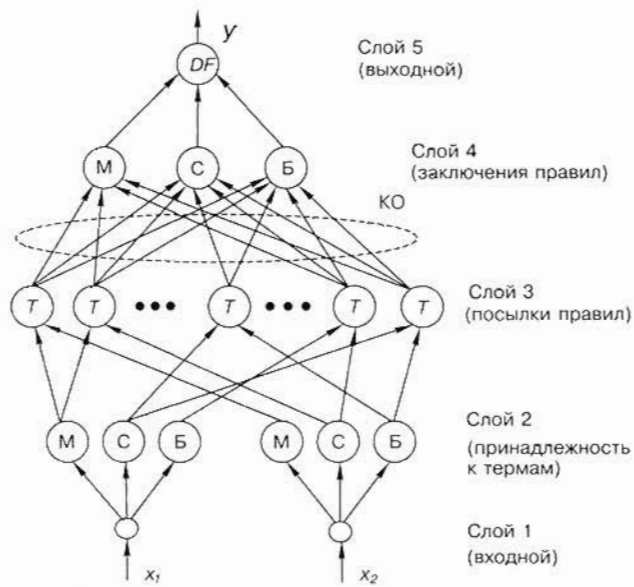
Каждый нейрон слоя 3 описывает посылки нечетких правил. Веса связей полагаются единичными. Нейрон этого слоя выполняет операцию AND (или вычисляет другую T-норму). Совокупность нейронов этого слоя формирует нечеткую базу правил. Функционирование каждого нейрона слоя 3 можно описать так:

$$y_j^3 = \min_{i \in I_j} (y_i^2),$$

где I_j — множество нейронов слоя 2, связанных с j -м нейроном слоя 3, y_i^2 — выход нейрона i слоя 2.

Веса связей между слоями 3 и 4 описывают КО правила.

Нейроны слоя 4 описывают возможные заключения правил. Каждый нейрон реализует функцию OR, учитывая совместное действие правил с одним и тем же термом заключения. Так описывается область восприятия выходной переменной. Уровень активизации нейрона слоя 4 описывает степень



■ Рис. 3. Нейронная сеть HyFIS

соответствия его функции принадлежности всем нечетким правилам вместе. Функционирование нейрона слоя 4 можно описать так:

$$y_k^4 = \max_{j \in I_k} (y_j^3 w_{kj}),$$

где I_k — множество нейронов слоя 3, связанных с k -м нейроном слоя 4, y_k^4 — выход нейрона k слоя 4.

Связи w_{kj} между слоями 3 и 4 действуют как механизм вывода, позволяющий избежать состязания правил. Каждое правило активизируется с некоторой степенью, представленной квадратом веса связи.

Слой 5. Здесь вырабатывается выходная (выходные) переменные системы, т. е. выполняется операция дефаззификации (DF) — вычисления точного выходного значения. Для этого может применяться метод центра тяжести или центра области (ЦО). Схема дефаззификации ЦО предполагает расчет выходного сигнала по формуле:

$$y_i^5 = \frac{\sum_{k \in I_i} y_k^4 \sigma_{ik} c_{ik}}{\sum_{k \in I_i} y_k^4 \sigma_k},$$

где I_i — множество нейронов слоя 4, связанных с k -м нейроном слоя 5; σ_{ik} и c_{ik} — ширина и центральная точка функции принадлежности k -го нейрона слоя 4.

Веса связей нейронов слоев 4 и 5 единичные. Обучаются только веса между слоями 3 и 4.

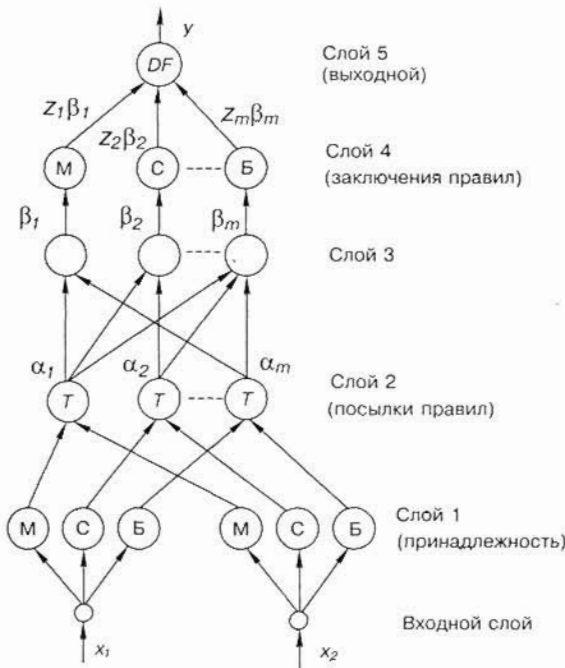
Таким образом, архитектуру HyFIS выгодно использовать при процедуре выделения нечетких правил.

Архитектура ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) описана в работе [16]. Структура ANFIS представлена на рис. 4.

Функционирование ANFIS несколько отличается от HyFIS. Рассмотрим работу ANFIS подробнее.

- Нейроны входного слоя и слоя 1 работают аналогично HyFIS.
- Слой 2 реализует нечеткую T-норму, на его выходе появляется величина α_i , являющаяся результатом применения нечеткой операции AND по отношению к посылкам соответствующего правила.
- Нейроны слоя 3 вычисляют значения:

$$\beta_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m}$$



■ Рис. 4. Структура сети ANFIS

• В слое 4 выполняется операция вычисления величины:

$$\beta_i z_i = \beta_i F_i^{-1}(\alpha_i),$$

где F – функция принадлежности, описывающая терм управления z_i .

• Слой 5 выполняет операцию дефаззификации:

$$z_0 = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_m z_m.$$

Настройка сети ANFIS также предполагает корректировку функций принадлежности заключений нечетких правил F_i . Очевидно, что эту структуру выгодно использовать при процедуре выделения нечетких правил на основании имитационного моделирования.

Параметрическая настройка регулятора

В процессе параметрической настройки регулятора требуется минимизировать ошибку управления по всем обучающим парам, а также проверить работу регулятора в тех ситуациях, которые не входили в обучающую выборку. При работе с нелинейными ИМ для этого необходимо использовать генетический алгоритм (ГА). ГА основан на фундаментальных представлениях о механизме эволюции как процессе выживания наиболее приспособленных [17].

При использовании ГА настраиваемые параметры регулятора (КО правил или параметры функций принадлежности) кодируются двоичными цепочками конечной длины — хромосомами. Совокупность хромосом образует популяцию — множество точек многомерного пространства, в котором происходит поиск решения. Каждая хромосома оцени-

вается путем моделирования переходного процесса (рис. 5).

При управлении динамическим процессом общая ошибка регулирования $\varepsilon(t)$ должна подсчитываться на достаточно большом количестве точек переходного процесса (N), тогда пригодность хромосомы можно оценить по формуле:

$$P = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \varepsilon(t_i)}$$

На основании этих оценок «хорошие» хромосомы популяции размножаются с помощью генетического оператора копирования. Остальные генетические операторы — скрещивания и мутации — позволяют исследовать все пространство поиска решения [18, 19].

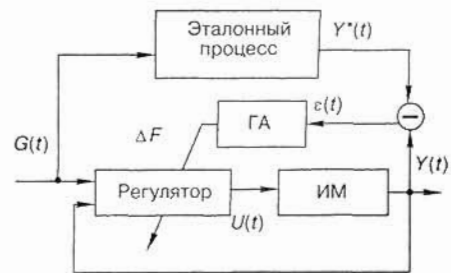
Успех параметрической настройки зависит от того, насколько верно была выбрана структура регулятора. В сложных случаях процесс обучения может включать несколько шагов, с чередованием структурной и параметрической настройки регулятора.

Практические приложения

Описанная методика может быть весьма эффективна в задачах управления сложными динамическими объектами. Рассмотрим два примера.

1. Задача управления подводным исследователем буксируемым комплексом (БК) [20, 21]. БК представляет собой систему судно—трос—подводный аппарат (ПА). Траектория движения ПА определяющим образом зависит от динамики судна и троса длиной несколько километров. Нелинейная ИМ БК позволяет получить лишь относительно малое количество прогонов в ускоренном времени. Но в режиме *off line* может быть накоплено большое количество данных моделирования. В результате структурирования этой информации выделяется ограниченное число нечетких управляющих правил, параметры которых корректируются с учетом оперативной информации [20, 21].

2. Задача управления посадкой самолета вертикального взлета и посадки [22]. Используя нелинейную ИМ объекта управления, можно с помощью поисковых процедур синтезировать в режиме *off line* большое количество удовлетворительных траекторий движения объекта. После выполнения кластеризации пространства входов и выходов получается ограниченный набор нечетких правил,



■ Рис. 5. Настройка регулятора с помощью ГА

задающий структуру управляющей НС, параметры которой потом подвергаются коррекции. Для обеспечения адаптации в реальном времени возможно взаимодействие конкурирующих структур [22].

Заключение

И система нечетких правил, и искусственная НС являются универсальными аппроксиматорами — с их помощью можно описать любую нелинейную функцию. Однако только соединение этих двух подходов в рамках ННР позволяет одновременно использовать способности НС к обучению и удобства представления и анализа нечетких продукционных правил. Конструирование ННР включает два этапа, на каждом из которых необходимо использование ИМ объекта.

На первом этапе происходит структурный синтез регулятора — определение количества продук-

ционных правил, достаточного для описания закона управления. Как было показано в статье, здесь возможны два подхода: либо предварительное описание термов ЛП, либо поиск этого описания в результате кластеризации. Соответственно, при первом варианте выгодно использовать архитектуру *HyFIS*, а при втором варианте — архитектуру *ANFIS*.

На втором этапе происходит параметрическая (точная) настройка — уточнение тех или иных параметров НС, реализующей нечеткую продукционную систему. Для архитектуры *HyFIS* — это коэффициенты определенности правил, а для архитектуры *ANFIS* — параметры функций принадлежности. Здесь выгодно использовать ГА — мощный инструмент поиска глобального экстремума целевой функции.

Описанная методика может использоваться при разработке систем управления многими реальными сложными объектами.

Литература

1. **Gupta M. M., Rao D. H.** On the principles of fuzzy neural networks // *Fuzzy Sets and Systems*. — 1984. — Vol. 61. — P. 1–18.
2. **Kosko B.** *Neural network and fuzzy and fuzzy systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
3. **Keller J. M., Yager R. R., & Tahani H.** Neural network implementation of fuzzy logic // *Fuzzy sets and systems*. — 1992. — № 45. — P. 1–12.
4. **Ronald R. Yager.** Modeling and Formulating Fuzzy Knowledge Bases Using Neural Networks // *Neural Networks*. — 1994. — Vol. 7. — № 8. — P. 1273–1283.
5. **Ayoubi M., Isermann R.** Neuro-fuzzy systems for diagnosis // *Fuzzy sets and systems*. — 1997. — № 89. — P. 289–307.
6. **Jang J. S. R., Sun C. T., Mizutani E.** *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice-Hall International, 1997. — 613 p.
7. **Бураков М. В., Попов О. С.** Совместное использование имитационного моделирования и экспертных процедур для управления динамическими объектами // «Известия ВУЗов. Приборостроение». — 1994. — № 5–6. — С. 11–13.
8. **Бураков М. В., Коновалов А. С., Попов О. С.** Адаптивное управление сложными объектами // *Оборонная техника*. — 1998. — № 6–7. — С. 56–61.
9. **Mamdani E. H.** Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. — *IEEE Proc.*, 1974. — V. 121. — № 12. — P. 1585–1588.
10. **Бураков М. В., Попов О. С.** Интеллектуальные системы управления. Учебное пособие. — СПб.: ГААП, 1997. — 108 с.
11. **Бураков М. В., Попов О. С.** Формирование базы знаний управляющей экспертной системы. Рук. деп. в ВИНТИ 19.05.93. — № 1329–В93. — 21 с.
12. **Wang I. X., Mendel J. M.** Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics* — 1992. — 22(6). — P. 1414–1427.
13. **Lee C. C.** Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller — part 1 and 2. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*. — 1990. — 20(2). — P. 404–435.
14. **Kohonen T.** *Self-organization and associative memory*. Berlin, Springer-Verlag, 1984.
15. **Kim J., Kasabov N.** HyFIS: adaptive neuro-fuzzy inference systems and their application to nonlinear dynamical systems // *Neural networks*, 12(1999). — P. 1301–1319.
16. **Jang J. S. R.** ANFIS: Adaptive network based fuzzy inference systems. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*. 23(03): 665–685. May 1993.
17. **Goldberg D. E.** *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
18. **Бураков М. В.** Синтез нейронного регулятора // *Изв. Академии наук. Теория и системы управления*. — 1999. — № 3. — С. 140–145.
19. **Burakov M. V., Kononov A. S.** Peculiarities of Genetic Algorithm Usage when Synthesizing Neural and Fuzzy Regulators // *Advanced Computer Systems*. Editors J. Soldek, J. Pejas. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. P. 139–148. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, Boston/ Dordrecht/ London, 2002.
20. **Burakov M. V.** Synthesis Of The Fuzzy Controller // *Proceeding of the first Inter. Conf. on Computer's Methods in Control Systems «CMCS' 97»*, Szczecin, Poland, December 11–12, 1997. — P. 77–82.
21. **Попов О. С., Бураков М. В.** Principles of Construction and Structure of an Automated Control System by an Underwater Towed Complex for Ocean Researchers // *Proc. of the Second Int. Conf. on Marine Technology «ODRA 97»*, Szczecin, Poland, 13–15 may 1997. — P. 465–472.
22. **Burakov M., Kononov A.** Development of dynamic object's neural controller by means of decomposition // *Int. Conf. Of Advanced Computer systems «ACS'2000»*, 23–25 October 2000, Szczecin, Poland. — P. 307–311.

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЙ

Л. А. Осипов,

д-р. техн. наук, профессор

Т. Г. Полякова,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)

Рассматривается метод синтеза параметров нелинейных систем управления по заданным динамическим характеристикам, рассчитанный на применение ЭВМ. Метод, однако, может быть использован для расчетов вручную. Параметры системы определяются в результате обращения прямого вариационного метода (метода ортогональных проекций) на решение задачи синтеза.

Задача синтеза решается в следующей постановке. Задана структура системы и известна часть ее параметров, а остальные параметры, относящиеся к одному или нескольким звеньям системы, подлежат определению из условия приближенного обеспечения заданных показателей качества переходного процесса (быстродействия — T_n , перерегулирования — D_0 и колебательности — μ_0). При этом, безусловно, должна обеспечиваться устойчивость и грубость системы Δ^0 по варьируемым параметрам σ_k ($k = 1, 2, \dots, m$).

Задача синтеза решается при технических ограничениях, наложенных на значения варьируемых параметров

$$\sigma_k^- \leq \sigma_k \leq \sigma_k^+, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где σ_k^- — минимально допустимые значения варьируемых параметров; σ_k^+ — максимально допустимые значения варьируемых параметров.

Ограничение на грубость системы по варьируемому параметрам имеет вид

$$\Delta = \frac{\delta\sigma_k}{\sigma_k} \leq \Delta^0, \quad (2)$$

где Δ^0 — заданное значение грубости системы; $\delta\sigma_k$ — вариации параметров, в пределах которых обеспечивается абсолютная устойчивость системы.

Рассмотрим систему с одним нелинейным элементом, движение которой описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$Q(\sigma_k, p)x(t) + R(\sigma_k, p)y(t) = S(\sigma_k, p)g(t), \quad (3)$$

где $Q(\sigma_k, p) = \sum_{i=0}^n a_i(\sigma_k)p^i$, $R(\sigma_k, p) = \sum_{j=0}^u b_j(\sigma_k)p^j$,

$S(\sigma_k, p) = \sum_{v=0}^v e_v(\sigma_k)p^v$ — полиномы оператора дифференцирования p с вещественными постоянными коэффициентами степеней n, u, v соответственно; $y = F(x, px)$ — нелинейная функция; $g(t) = H1(t)$ — внешнее воздействие.

Синтез непрерывных нелинейных систем управления методом ортогональных проекций рассмотрен в [1]. Согласно общей схеме решения задачи синтеза методом ортогональных проекций

необходимо задаться желаемым процессом, удовлетворяющим заданным показателям качества. Приближение к нему реального процесса, протекающего в системе с синтезированными параметрами, должно осуществляться с минимальной ошибкой.

Желаемый процесс в [1], [2] задается в виде решения однородного дифференциального уравнения второго порядка. Однако такое представление переходного процесса, протекающего в системе, является упрощенным и снижает точность определения варьируемых параметров. Поэтому целесообразно задавать переходный процесс статической нелинейной системы, уравнение движения которой записано относительно координаты ошибки, в виде решения дифференциального уравнения порядка ϑ :

$$x^0(t) = \left[H_0 + \sum_{s=1}^{\vartheta} (C_{s1}e^{-(\alpha_s - j\beta_s)t} + C_{s2}e^{-(\alpha_s + j\beta_s)t}) \right] 1(t), \quad (4)$$

где коэффициенты C_{s1} и C_{s2} , в зависимости от требований, предъявляемых к синтезируемой системе, вычисляются по выражениям, приведенным в [3].

Для астатической системы желаемый процесс будет иметь вид

$$x^0(t) = \sum_{s=1}^{\vartheta} (C_{s1}e^{-(\alpha_s - j\beta_s)t} + C_{s2}e^{-(\alpha_s + j\beta_s)t}) 1(t). \quad (5)$$

Система из m непрерывно дифференцируемых линейно независимых координатных функций выбирается в виде ряда экспонент:

$$e^{-\rho_1 t}, e^{-\rho_2 t}, \dots, e^{-\rho_q t}, \dots, e^{-\rho_m t}. \quad (6)$$

Коэффициенты затухания представляют собой геометрическую прогрессию со знаменателем $h = 2$, $\rho_q = \rho_1 h^{q-1} = \rho_1 2^{q-1}$, причем коэффициент затухания ρ_1 этого ряда целесообразно принять равным $\rho_1 \approx \alpha \approx k/T_n$.

Желаемый процесс (5) подставляется в уравнение движения системы (3) и образуется невязка

$$\psi(\sigma_k, t) = Q(\sigma_k, D)x^0(t) + R(\sigma_k, D)F[x^0(t)] - S(\sigma_k, D)g(e), \quad (7)$$

где D — оператор обобщенного дифференцирования.

Для описания характеристик нелинейных элементов системы целесообразно использовать кусочно-линейную аппроксимацию. Любой кусочно-линейный элемент на интервалах между моментами переключения t_i может быть описан выражением

$$F_i[x(t)] = a_i x(t) + b_i, \quad i = 1, 2, \dots, \eta + 1, \quad (8)$$

где η — число переключений, a_i, b_i — коэффициенты, зависящие от вида и параметров нелинейности.

Такое представление нелинейных элементов позволяет проводить синтез импульсных систем управления с любыми как однозначными, так и неоднозначными нелинейными элементами.

Таким образом, можно записать аналитическое выражение для выходной координаты нелинейного элемента в виде обобщенной функции

$$F[x(t)] = F_{+0}(t)1(t) + \sum_{i=1}^{\eta} [F_{+i}(t) - F_{-i}(t)]1(t - t_i), \quad (9)$$

где t_i — моменты переключения нелинейностей; $F_{-i}(t)$ и $F_{+i}(t)$ — аналитические выражения нелинейной функции в момент времени $t = +0$; η — число переключений нелинейной функции, зависящее от характеристики нелинейного элемента $F(x)$ и переходного процесса $x(t)$.

Производная j -го порядка обобщенной функции (9) выражается зависимостью

$$\begin{aligned} D^j \{F[x(t)]\} &= F_{+0}^{(j)}(t)1(t) + \\ &+ F_{+0}^{(j-1)}(0)\delta(t) + \dots + F_{+0}^{(j-1)}\delta^{(j-1)}(t) + \\ &+ \sum_{i=1}^{\eta} [F_{+i}^{(j)}(t) - F_{-i}^{(j)}(t)]1(t - t_i) + \\ &+ \sum_{i=1}^{\eta} \sum_{w=0}^{j-1} R_w \delta^{(j-w-1)}(t - t_i), \end{aligned} \quad (10)$$

где $F_{+0}(0), \dots, F_{+0}^{(j-1)}(0)$ — значения нелинейной функции и ее производных до $(j - 1)$ -го порядка включительно в момент времени $t = 0$; $R_w = F_{+i}^{(w)}(t_i) - F_{-i}^{(w)}(t_i)$ и $F_{+i}^{(w)}(t), F_{-i}^{(w)}(t)$ — значения производных порядка w от $F_{+i}(t)$ и $F_{-i}(t)$ в момент времени $t = t_i$ справа и слева соответственно; $\delta(t), \delta^{(v)}(t)$ ($v = 1, 2, \dots$) — дельта-функция и ее производные порядка v .

После подстановки в (7) выражений (5), (9) и (10) ортогональность невязки координатным функциям (6) приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=0}^n a_i(\sigma_k) A_{qi} + \sum_{j=0}^u b_j(\sigma_k) B_{qj} - \sum_{v=0}^v e_v(\sigma_k) C_{qv} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} A_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{x^0(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad i = \overline{0, n}; \\ B_{qj} &= \int_0^{\infty} D^j \{F[x^0(t)]\} e^{-\rho_q t} dt, \quad j = \overline{0, u}; \end{aligned}$$

$$C_{qv} = \int_0^{\infty} D^v \{H1(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \quad v = \overline{0, v}. \quad (12)$$

Так как задача синтеза решается при ограничениях на значения искоемых параметров σ_k , устойчивость и грубость системы, то для определения параметров, удовлетворяющих заданным ограничениям и обеспечивающих наибольшее приближение к желаемому процессу (5), минимизируется целевая функция

$$\begin{aligned} J = \sum_{q=1}^m \left\{ \int_0^{\infty} \psi(\sigma_k, t) e^{-\rho_q t} dt \right\}^2 &= \sum_{q=1}^m \left\{ \sum_{i=0}^n a_i(\sigma_k) A_{qi} + \right. \\ &\left. + \sum_{j=0}^u b_j(\sigma_k) B_{qj} + \sum_{v=0}^v e_v(\sigma_k) C_{qv} \right\}^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Параметры σ_k определяются из условия минимизации функционала (13) при ограничениях, наложенных на значения варьируемых параметров системы σ_k (1), (2) и устойчивость синтезируемой системы управления. Для обеспечения условия устойчивости в качестве ограничений используется алгебраическое представление частотного критерия В. М. Попова, который позволяет значительно упростить объем вычислений за счет исключения перебора по частоте ω [2].

Для вычисления целевой функции (13) необходимо получить выражения для вычисления интегралов A_{qi}, B_{qj}, C_{qv} . Интегралы (12) вычисляются в соответствии с правилами действий над обобщенными функциями [4].

Вычисление интегралов B_{qj} в соответствии с выражениями (8) и (9) нелинейная функция будет иметь вид

$$\begin{aligned} F[x^0(t)] &= \left[a_1 \sum_{s=1}^{\hat{\nu}} (C_{s1} e^{-(\alpha_s - j\beta_s)t} + \right. \\ &\left. + C_{s2} e^{-(\alpha_s + j\beta_s)t}) + b_1 \right] 1(t) + \\ &+ \sum_{i=1}^{\eta} \left\{ (a_{i+1} - a_i) \sum_{s=1}^{\hat{\nu}} (C_{s1} e^{-(\alpha_s - j\beta_s)t} + \right. \\ &\left. + C_{s2} e^{-(\alpha_s + j\beta_s)t}) + (b_{i+1} - b_i) \right\} 1(t - t_i). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив (14) в выражение (12) и вычислив B_{q0} , получим

$$B_{q0} = \int_0^{\infty} F[x^0(t)] e^{-\rho_q t} dt = B_q / \rho_q, \quad q = \overline{1, m}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} B_q &= a_1 \sum_{s=1}^{\hat{\nu}} \frac{[(\alpha_s + \rho_q) \cos \varphi_{s0} + \beta_s \sin \varphi_{s0}]}{(\alpha_s + \rho_q)^2 + \beta_s^2} \rho_q + \\ &+ b_1 + \sum_{i=1}^{\eta} e^{-\rho_q t_i} [(a_{i+1} - a_i) \times \end{aligned}$$

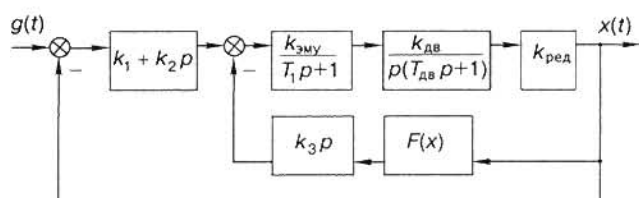


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой системы

$$\times \sum_{s=1}^{\vartheta} \frac{x_s^0(t_j)(\alpha_s + \rho_q) + \beta_s e^{-\alpha_s t_j} (\sin(\beta_s t_j - \varphi_{s0}))}{(\alpha_s + \rho_q)^2 + \beta_s^2} \rho_q + (b_{i+1} - b_i)]. \quad (16)$$

Используя метод математической индукции, вычислим остальные интегралы B_{qj} :

$$B_{qj} = B_{qp} j^{-1}, \quad j = \overline{0, u}, \quad (17)$$

где B_q вычисляется по выражению (16).

Аналогично вычисляются интегралы A_{qi} :

$$A_{qi} = A_{qp} i^{-1}, \quad i = \overline{0, 1, n}, \quad (18)$$

где

$$A_q = \sum_{s=1}^{\vartheta} \frac{[(\alpha_s + \rho_q) \cos \varphi_{s0} + \beta_s \sin \varphi_{s0}]}{(\alpha_s + \rho_q)^2 + \beta_s^2} \rho_q. \quad (19)$$

Вычисление интегралов C_{qv} приведено в [1].

Полученные рекуррентные соотношения для вычисления интегралов A_{qi} и B_{qj} позволяют значительно упростить процесс вычислений при решении задачи синтеза и свести все вычисления к выполнению лишь простых математических операций, единообразных для нелинейных систем высоких порядков различных классов. В отличие от рекуррентных соотношений A_{qi} и B_{qj} , полученных в [1], соотношения (17) и (18) являются общими для кусочно-линейных элементов как однозначных, так и неоднозначных, при процессах любой сложности на их входах.

Структурная схема нелинейной САУ приведена на рис. 1.

Дифференциальное уравнение движения системы, записанное относительно выходной координаты, имеет вид

$$[T_1 T_{дв} p^3 + (T_1 + T_{дв}) p^2 + (1 + k_3 k_2) p + k_3 k_1] x + k_3 k_3 p F(x) = (k_3 k_1 + k_3 k_2 p) g(t),$$

где $k_3 = k_{эм} k_{дв} k_{ред}$.

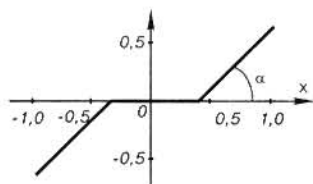


Рис. 2. Характеристика нелинейного элемента

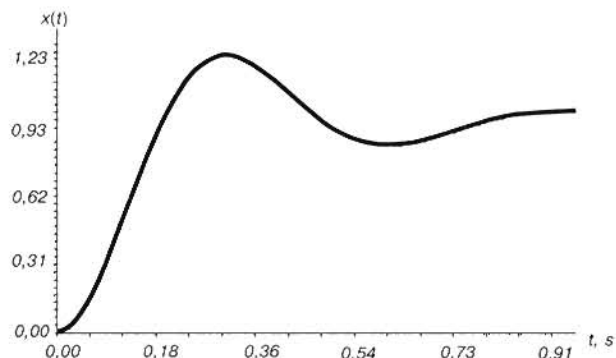


Рис. 3. График переходного процесса системы с синтезированными параметрами

Заданы значения параметров системы $T_{дв} = 0,5$ с, $T_1 = 0,165$ с, $k_3 = 240$.

С учетом численных значений параметров системы дифференциальное уравнение движения (1) принимает вид

$$[0,0825 p^3 + 0,665 p^2 + (1 + 240 k_2) p + 240 k_1] x + 240 k_3 p F(x) = (240 k_1 + 240 k_2 p) g(t).$$

Характеристика нелинейного элемента $F(x)$ типа «зона нечувствительности без насыщения» изображена на рис. 2. и имеет следующие значения параметров: $b = 0,4$, $k = \operatorname{tg} \alpha = 1,0$, $k_f = 1,0$. Требуется определить положительные значения параметров нелинейной системы k_1, k_2, k_3 таким образом, чтобы удовлетворялись следующие требования:

1) при скачкообразном внешнем воздействии $g(t) = 1(t)$ время переходного процесса в системе должно составлять $T_n \approx 1,0$ с, а перерегулирование $D_m \approx 20\%$;

2) обеспечивалась абсолютная устойчивость и грубость по варьируемым параметрам k_1, k_2, k_3 не менее $\Delta^0 = 15\%$.

В результате решения задачи на ЭВМ получены следующие значения искоемых параметров $k_1 = 0,0345$, $k_2 = 0,0366$ с, $k_3 = 0,0023$, обеспечивающие в САУ устойчивый переходной процесс, удовлетворяющий требуемым показателям качества. На рис. 3. приведен процесс в системе с синтезированными параметрами, имеющий перерегулирование $D_m = 23\%$ и время переходного процесса $T_n = 1$ с.

Литература

1. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А. А. Воронова, И. А. Огурка. — М.: Наука, 1984.
2. Алгоритмы динамического синтеза нелинейных автоматических систем / Под ред. А. А. Воронова. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Осипов Л. А., Полякова Т. Г. Численный метод синтеза непрерывных нелинейных САУ / ГААП. СПб. 1997. Деп. в ВИНТИ 15.07.97, № 2408-В97.
4. Розенфельд А. С., Яхинсон Б. И. Переходные процессы и обобщенные функции. — М.: Наука, 1996.

УВАЖАЕМЫЕ ГОСПОДА!

Законодательное Собрание и Администрация Санкт-Петербурга, Правительство Ленинградской области, Министерство промышленности, науки и технологий РФ, Министерство РФ по связи и информатизации, Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН, Санкт-Петербургский Научный центр РАН приглашают Вас принять участие в работе **юбилейной** VIII Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика-2002 (РИ-2002)», проводимой под эгидой ЮНЕСКО в период **с 26 по 28 ноября 2002 года** в рамках «Недели информационных технологий в Санкт-Петербурге».

Программой Конференции «РИ-2002» предусмотрено посещение XI Международной специализированной выставки «ИНВЕКОМ» и ряда специализированных выставок в области информационных технологий, организуемых выставочным объединением «Рестэк».

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ВКЛЮЧАЕТ СЛЕДУЮЩИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Региональная политика информатизации.
2. Теоретические проблемы информатизации.
3. Междисциплинарные исследования в информатике.
4. Телекоммуникационные сети и технологии.
5. Информационная безопасность.
6. Правовые проблемы информатизации.
7. Инновационная политика в сфере информатизации.
8. Информационно-аналитическое обеспечение органов государственной власти.
9. Информационное обеспечение финансово-кредитной сферы и бизнеса.
10. Средства массовой информации.
11. Информационные технологии в производстве.
12. Информационные технологии в агросфере.
13. Информационные технологии на транспорте.
14. Информационные технологии в научных исследованиях.
15. Информационные технологии в образовании.
16. Информационные технологии в здравоохранении.
17. Информационные технологии в экологии.
18. Информационные технологии в издательской деятельности и полиграфии.
19. Информационные технологии в исследовании океана.
20. Круглый стол: Региональная целевая программа «Электронный Санкт-Петербург (2002–2006 годы)».

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ

Для участия в работе Конференции необходимо выслать в адрес Оргкомитета:

1. Заявку предприятия (организации) на участие в работе VIII Санкт-Петербургской Международной Конференции «РИ-2002».

2. Тезисы доклада на русском или английском языке объемом не более одной страницы формата А4 без формул, рисунков и ссылок на литературу.

При оформлении тезисов следует придерживаться следующей схемы расположения текста:

Фамилия И. О. (строчные буквы)
Страна, город, организация (строчные буквы)
НАЗВАНИЕ ДОКЛАДА (прописные буквы)
<Текст тезисов доклада>

3. Электронный вариант тезисов доклада на дискете (предварительно переданный по электронной почте: lai@iias.spb.su или spiiiran@iias.spb.su) должен быть подготовлен в виде файла с расширением «.rtf» в редакторе «Word» с использованием нормального шрифта «Arial» размера 12 через один интервал без шрифтовых выделений, переносов в словах и разбивки на страницы.

4. Копию платежного поручения предприятия (организации) с банковской отметкой о перечислении организационного целевого взноса Санкт-Петербургскому Обществу информатики, вычислительной техники, систем связи и управления (СПОИСУ).

Заявки предприятий (организаций) на участие в Конференции «РИ-2002» принимаются до 20 ноября 2002 года включительно. Тезисы, поступившие в Оргкомитет до **25 октября 2002 г.**, будут опубликованы до начала Конференции.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС

Для участия в работе Конференции необходимо перечислить организационный целевой взнос в рублях, соответствующий 30 у. е. (по курсу ЦБ РФ на момент платежа), который будет расходоваться на подготовку и проведение Конференции, издание Программы Конференции, тезисов докладов и других информационных материалов.

В платежном поручении следует указать:

Получатель: СПОИСУ, ИНН 7813148260.

Р/с 40703810627000003078 в Приморском филиале ОАО «Банк Санкт-Петербург», к/с 30101810900000000790, БИК 044030790. КПП 781301001.

Назначение платежа: Организационный целевой взнос предприятия в фонд Конференции «РИ-2002» согласно информационному письму № Р-01/2002 (представитель — ФИО). НДС не облагается.

АДРЕС И КОНТАКТНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ

Заявки предприятий (организаций) на участие в работе Конференции и тезисы докладов следует направлять по адресу:

199178, Санкт-Петербург, В. О., 14-я линия, д. 39. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Оргкомитет VIII Санкт-Петербургской Международной Конференции «Региональная информатика-2002 (РИ-2002)».

Контактные телефоны: (812) 328-19-19, 328-33-11

Факс: (812) 328-44-50

e-mail: lai@iias.spb.su spiiiran@iias.spb.su

<http://www.spiiras.nw.ru/conf.htm>

УДК 681.32.5

ИНФОРМАЦИОННО – УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ INTERNET

А. М. Астапкович,

канд. техн. наук, доцент

А. А. Востриков,

аспирант

М. Б. Сергеев,

д-р техн. наук, профессор

Ю. Г. Чудиновский,

аспирант

Рассматриваются тенденции развития новой области компьютерной науки «встраиваемого Internet». Обозначены проблемы, решение которых позволит в ближайшем будущем всерьез говорить о массовом использовании Internet для реализации взаимодействий типа «человек—устройство» и «устройство—устройство» для передачи команд управления и информации различной природы. Приводятся данные и сформулированные на их основе обобщенные выводы по результатам экспериментов обмена командной, видео- и аудиоинформацией в коммуникациях типа «устройство—устройство».

Введение

Глобальная сеть Internet является коммуникационной средой, созданной человеком. Термин «коммуникационная среда» (среда передачи данных, информации) используется в настоящее время в нескольких значениях. Наиболее распространенные из них следующие:

— среда для передачи некоторой неоднородности — единицы информации — в пространстве. Имея искусственное происхождение, для физического переноса информации Internet использует прочие естественные среды, в основном электропроводящие и эфир (характеристики сети Internet в сравнении с естественными коммуникационными средами приведены в табл. 1);

— средство обмена информацией внутри человеческого общества. В настоящее время эта сеть чрезвычайно широко применяется для распространения рекламы, новостей и прочей информации в различной форме (текст, аудио и видео).

Скорость развития Internet превышает скорость развития такого средства массовой информации, как телевидение, примерно в три раза и имеет еще более яркие перспективы, связанные с очередной революцией в области микропроцессорной техники. Ее результатом стало появление дешевых микроконтроллеров с колоссальными возможностями, давшее толчок новому этапу развития сети Internet — использованию ее для коммуникаций типа «человек—устройство» и «устройство—устройство». Это, судя по всему, в ближайшее время при-

■ Таблица 1. Сравнение характеристик Internet и естественных коммуникационных сред

Среда	Характеристика				
	Доступность, распространенность	Дальность передачи	Скорость передачи информации	Задержка распространения	Подверженность внешним воздействиям
Эфир	Не ограничена	Не ограничена	Практически не ограничена	Определяется скоростью света	Высокая
Электропроводящие материалы	Определяется структурой	Практически не ограничена	Практически не ограничена	Определяется скоростью света	Средняя
Воздушная среда	В пределах воздушного пространства Земли	До сотен метров	До сотен Кбит/с	Определяется скоростью 343 м/с при 20 °С и нормальном давлении	Высокая
Сеть Internet	Определяется структурой	В пределах созданной инфраструктуры сети*	От сотен до миллиарда бит/с	От микросекунд до десятков минут	Низкая

* В настоящее время — земное и околоземное пространство. В 2001 г. в IETF были представлены предварительные документы, описывающие структуру межпланетного Internet (IPN — InterPlaNetaryInternet). Основным идеологом проекта является «отец» Internet, один из разработчиков протокола TCP/IP Винтон Серф. Полевые испытания могут быть проведены во время марсианской миссии NASA в 2003 г.

ведет к лавинообразному увеличению количества узлов Internet, связанному с использованием сети для информационного взаимодействия между устройствами.

Следует отметить, что изначально сеть Internet предназначалась для обеспечения коммуникаций в условиях военного времени при наличии существенных повреждений сети. В силу этого основным критерием при выборе целого ряда решений являлось обеспечение высокой надежности доставки сообщений.

В настоящее время сеть Internet, используемая фактически не по своему прямому назначению, имеет две характерные тенденции развития. Первая относится к использованию Internet как основы для общемировой социальной информационной системы.

Вторая, которую в данной работе рассмотрим подробнее, предполагает использование Internet в качестве коммуникационной среды для создания глобальных распределенных информационно-управляющих систем. По причине новизны тематики до сих пор не существует рабочих групп, занимающихся серьезными исследованиями в данной области. Ввиду этого, компании, ведущие разработки сетевых информационно-управляющих систем, выполняют собственные независимые работы. Яркими примерами являются шведская фирма AXIS (www.axis.com) и американская фирма PelcoNet (www.pelconet.com).

Настоящая работа ставит целью изложить первые результаты исследования опытно-промышленных образцов Internet-устройств, предназначенных для создания глобальных информационно-управляющих систем нового поколения, а также очертить ряд характерных для данной области научных и практических проблем.

Встраиваемые Internet-системы управления

Перспектива использования Internet для коммуникаций между встраиваемыми устройствами систем управления привела к появлению такого понятия, как «встроенный Internet» [1]. Оно отражает сочетание несовместимых в недалеком прошлом понятий: встраиваемая система управления и сеть WAN-класса (World Area Network). Проектирование встраиваемых Internet-систем является очень молодой и чрезвычайно перспективной областью развития современной науки и инженерии. Это обусловлено распределенным характером производств современных транснациональных компаний, развитием дистанционных технологий (телемедицина, видеоконференции) [2], а также тенденция построения глобальных систем управления, контроля и диагностики (окружающая среда, погода, состояние ресурсов жизнеобеспечения и др.) [3, 4].

Следует отметить, что в настоящее время существуют лишь отдельные разработки, представляющие собой фактически маркетинговые образцы Internet-устройств встраиваемого класса. Вместе с тем идет интенсивное изучение возможностей применения встроенных Internet-систем управления в таких областях как:

— промышленные информационно-управляющие системы, включая возможную интеграцию ком-

понентов таких систем в существующие SCADA-системы;

- дистантные системы научных исследований на распределенных системах управления;
- системы удаленного видеонаблюдения за производственными процессами;
- охранные системы;
- бытовые устройства¹ и т. д.

В соответствии с данными, распространенными аналитической компанией Allied Business Intelligence (USA, N.Y.), емкость рынка только «домашних» сетевых устройств в 2001 г. выросла до 243 млн долларов, а к 2006 г. достигнет 2,4 млрд долларов.

Встроенные системы управления на базе Internet имеют ряд характерных особенностей по сравнению с системами, использующими в качестве коммуникационной среды специализированные LAN или CAN сети, а также системами, построенными на основе универсальных ЭВМ и персональных компьютеров. Эти различия, отраженные в табл. 2, позволяют сформулировать круг специфических проблем, связанных с разработкой:

- методов проектирования систем данного класса;

Таблица 2. Сравнение характеристик персонального компьютера и встроенной системы как узла Internet

Параметр	Узел на базе персонального компьютера или универсальной ЭВМ	Встроенная Internet-система
Потенциальное количество устройств, работающих в сети одновременно	Укладываются в адресное пространство IP-адресов	Практически не ограничено
Объем памяти данных	Практически не ограничен	Незначительный
Вычислительные возможности	Практически не ограничен	Ограничены применением дешевых RISC-процессоров
Обслуживание и настройка	Может быть обслужен и настроен на любом этапе жизни	В большинстве случаев настройка возможна только во время установки, работа в практически не обслуживаемом режиме
Специализация, назначение	Гибкое изменение заменой программного обеспечения	Жесткая специализация в рамках реализованной структуры
Условия работы	Помещения с поддержанием условий для нормальной жизнедеятельности людей	От офисных до промышленных помещений

¹ 16 марта 2001 г. на выставке «Домотехника» в Кologne (Германия) фирмы UbiCom Inc. (лидер в производстве процессоров для сетевых устройств) и Arcelik/Beiko (один из крупнейших производителей бытовой техники в Европе) продемонстрировали серию устройств, оснащенных сетевыми модулями для выхода в Internet. Среди них были холодильник, микроволновая печь, телевизор, стиральная и посудомоечная машины. Эта демонстрация показала, как подобные устройства могут использовать преимущества, связанные с возможностью коммуникации, в частности, друг с другом.

— протоколов взаимодействия Internet-устройств друг с другом, а также с другими узлами Internet с учетом необходимости передачи разнородной по своей природе информации;

— методов оптимизации информационных потоков и оценки пропускной способности сетевого канала;

— средств защиты информации от несанкционированного доступа, а также несанкционированного управления и изменения параметров функционирования;

— методов обеспечения надежности распределенных в глобальном пространстве информационно-управляющих систем.

Наиболее острой проблемой применительно к информационно-управляющим системам, по всей видимости, является выбор и унификация протоколов верхнего уровня для конкретных применений. В основном это относится к уровню представлений, который обеспечивает защиту информации от посягательств злоумышленников (хакеров, криминальных элементов, террористов и т. п.).

По мере роста числа встроенных Internet-систем, принадлежащих различным производителям, стало использоваться все больше протоколов надстроек над транспортным уровнем. Каждый из них ориентирован на конкретное разрабатываемое приложение и тип передаваемых данных. Отметим, что по ряду причин для устройств встроенного Internet протоколы до сетевого и транспортного уровней включительно, как правило, выбираются из ряда стандартных протоколов [8, 9].

На сетевом уровне протокол IP — основа самого Internet, поскольку именно он является первым (по уровню) независимым от среды передачи протоколом, который должен соблюдать любой узел или маршрутизатор Internet. Традиционные протоколы транспортного уровня TCP и UDP используются во всех службах Internet, и для их реализации на настоящий момент разработано огромное количество опробованных и отлаженных версий для различных платформ.

Протоколы физического уровня и уровня связи данных выбираются из известного набора, и на них не следует останавливаться отдельно. Их использование определяется наличием созданных к настоящему времени информационных инфраструктур (локальные сети, коммутируемые, выделенные и оптоволоконные линии и т. д.).

Для выбора или разработки протокола надтранспортного уровня необходимо учитывать, что ос-

новная часть трафика сети будет использована для коммуникации между устройствами, а не между устройством и человеком, использующим мощный персональный компьютер. Наконец, природа передаваемых данных (табл. 3) и принадлежность рассматриваемых устройств к классу встраиваемых систем предъявляют наиболее серьезные требования к свойствам протокола. Решение указанных и сопутствующих им проблем позволит в ближайшем будущем всерьез говорить о массовом использовании Internet для реализации взаимодействий типа «человек—устройство» и «устройство—устройство» для передачи команд управления и информации различной природы.

Web-устройства нового поколения

Приборы или устройства, управляемые посредством Internet, иногда называют web-устройствами (от широко употребляемого World Wide Web). Наибольшее распространение в настоящее время получают так называемые web-камеры, которые представляют собой ПЗС-матрицу и контроллер, позволяющий передавать видеопоток на персональный компьютер (ПК) через какой-либо стандартный высокоскоростной порт (чаще всего USB). В данном случае персональный компьютер выполняет две базовые функции: сжатие видеoinформации и передачу видеопотока через Internet потребителю. При современной производительности компьютеров набор функций, которыми может обладать такая сетевая видеосистема, чрезвычайно широк.

Однако у такого подхода к построению систем видеопередачи есть ряд существенных недостатков, основной из которых заключается в том, что каждая видеочасть должна подключаться к персональному компьютеру. Это приводит:

- к существенному увеличению стоимости каждого узла системы;
- практической невозможности использования системы в необслуживаемом режиме;
- использованию таких web-систем лишь в комфортной для эксплуатации среде.

Ситуация кардинально изменилась с появлением микропроцессоров, характеризующихся значительной величиной соотношения производительность/цена, обеспечивающих возможность реализации сетевого обеспечения в качестве функционального блока конечного устройства, а также специализированных чипов сжатия/разжатия информации на основе вейвлет-алгоритмов. Эта новая элементная база обеспечила возможность создания web-устройств нового поколения — автономных.

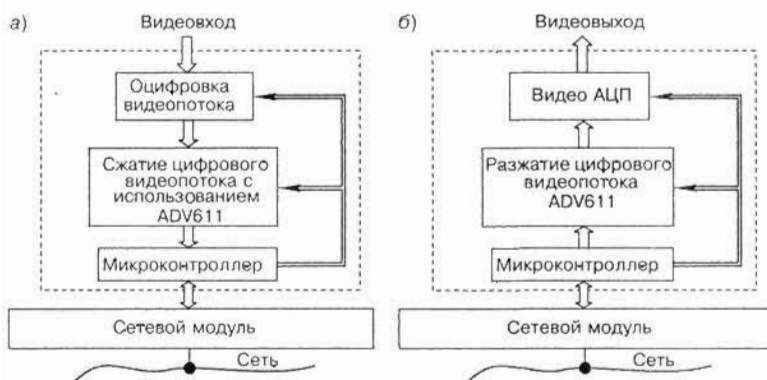
Для изучения возможностей устройств этого класса в ASK Lab СПбГУАП (www.asklab.ru) в 2001 г. было разработано семейство опытно-промышленных образцов устройств, использующих Internet в качестве коммуникационной среды: web-видеокамера, web-видеомонитор и web-устройство удаленного сбора информации и управления (плата ACB — Acquisition and Control Board).

На рис. 1, а показана функциональная схема web-видеокамеры. Для сжатия видеoinформации в ней применена микросхема ADV611 фирмы Analog Devices. Для отображения на экране компьютера сжатого потока видео, передаваемого камерой, был разработан программный видео-декодер для дан-

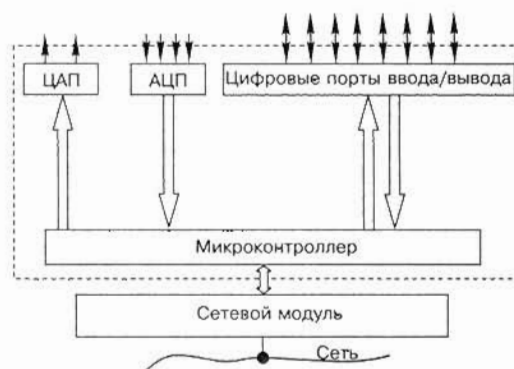
■ Таблица 3. Требования к параметрам передачи в зависимости от природы информации

Природа информации	Целостность	Сохранение порядка	Своевременность	Пропускная способность
Команды	—	+	+	Низкая
Файлы баз данных, растровой и векторной графики, текст, результаты отдельных измерений и т. п.	+	+	—	Низкая
Аудиоданные	—	+	*	Средняя
Видеоданные	*	+	*	Высокая

* Зависит от конкретного приложения, примененного метода сжатия и т. д.



■ Рис. 1. Функциональные схемы: а — web-видеокамеры; б — web-видеомонитора



■ Рис. 2. Функциональная схема web-устройства АСВ

ного алгоритма сжатия, а также специализированное программное обеспечение. С учетом массового использования web-видеокамер программное обеспечение разработано для работы под управлением операционных систем Windows 95/98/2000. Мультиэкранный режим (просмотр видеоизображения с нескольких камер одновременно) при использовании данных операционных систем реализуется естественным образом запуском требуемого количества копий приложения.

Важно отметить, что на основе рассматриваемой платформы может быть реализована система, не имеющая в своем составе персональных компьютеров. Потребителями и источниками информации внутри такой системы выступают устройства. Имеется в виду возможность передачи видеоизображения с web-видеокамеры непосредственно на web-видеомонитор, осуществляющий обратное преобразование видеоинформации — прием из сетевой среды видеопотока, его разжатие микросхемой ADV611 и генерацию стандартного низкочастотного видеосигнала. Функциональная схема web-видеомонитора изображена на рис. 1, б.

Одной из наиболее привлекательных возможностей устройств встроенного Internet является построение на их основе глобальных систем удаленного сбора и управления. Web-устройство АСВ представляет собой многоканальное устройство удаленного сбора и управления, функциональная схема которого приведена на рис. 2. Опытно-промышленный образец Web-АСВ, использованный для проведения экспериментов, имеет следующие внешние каналы: 4 канала АЦП (8 или 10 бит); 2 канала ЦАП (8 бит); 8 цифровых портов, настраиваемых независимо на ввод или вывод.

Описание проведенных экспериментов

Первые эксперименты с web-камерой в локальной сети были проделаны еще в январе 2001 г. [12]. При этом исследовалась камера на базе чипа ADV601. Летом 2001 г. были проведены эксперименты с этой же камерой и Web-АСВ при организации сети в Санкт-Петербурге. Эта серия экспериментов была завершена передачей видеоизображения из Санкт-Петербурга абоненту, проживающему в Вашингтоне и использовавшему модем 56 Кбит/с для подключения к Internet. При

этом имелась возможность дистанционного управления как положением камеры, так и бытовыми приборами, в качестве которых были использованы две лампы накаливания. Время реакции по управлению web-видеокамерой и включению/выключению ламп накаливания составило 0,2–0,3 с.

Также были проделаны эксперименты по передаче голосовых сообщений. Для этого с помощью Web-АСВ проводилась оцифровка сигнала с микрофона, подключаемого к ее аналоговому входу. Передаваемый цифровой поток не сжимался и передавался отдельно от видеопотока. Удовлетворительное качество передачи голосовых сообщений для технической связи было достигнуто уже при частоте дискретизации 2 КГц.

Следующая серия экспериментов, выполненная осенью 2001 г., заключалась в управлении из Вашингтона включением/выключением ламп накаливания, находящихся в Санкт-Петербурге, и контроле за выполнением управления из офиса в Нью-Йорке с помощью видеопотока с web-видеокамеры, установленной вместе с лампами в Санкт-Петербурге.

Учитывая тот факт, что для систем видеонаблюдения любого класса важна возможность передачи изображения в широком диапазоне освещенности наблюдаемого объекта или пространства, для эксперимента была выбрана видеокамера со стандартным видеосигналом на выходе, осуществляющая автоматическую регулировку коэффициента усиления в зависимости от общего уровня засветки светочувствительной матрицы. Это дало возможность получать изображения в уличных условиях при дневном свете, в сумерках и при отсутствии естественного освещения [12].

Цветная PAL-видеокамера, поставляющая стандартный видеосигнал для цифровой части web-видеокамеры, была помещена на платформу устройства управления положением камеры в горизонтальной плоскости. Через программное обеспечение верхнего уровня оператор из Нью-Йорка мог управлять:

- положением камеры в горизонтальной плоскости;
- характеристиками видеосигнала (яркость, контрастность, цветность);
- коэффициентом сжатия изображения и прочими параметрами.

При отсутствии искусственной подсветки в ночных условиях качество изображения значительно

ухудшается, поскольку начинают проявляться внутренние шумы усилителя видеосигнала, а соотношение освещенности объектов сильно отличается от субъективного восприятия реальной картины. Это в очередной раз показало, что регулировка параметров видеоизображения в таких условиях освещенности чрезвычайно важна.

При использовании web-видеокамеры наличие функции удаленного изменения значений этих параметров позволяет фактически организовать дистанционное обслуживание камеры, под которым подразумевается возможность подбора требуемых ее параметров в зависимости от реальной обстановки, складывающейся на объекте наблюдения. Конкретные значения параметров (яркость, контрастность, насыщенность цвета) зависят от текущих характеристик реального изображения, а также от «потребителя» воспроизводимого видеопотока (органы зрения человека, система распознавания образов, система наблюдения за движущимися объектами и т. д.).

Ниже описан ряд дополнительных экспериментов по изучению устойчивости передачи команд и цифровых сигналов с датчиков через локальную и глобальную IP-сети, который позволил сформулировать некоторые выводы и обозначил ряд задач первостепенной важности.

Передача команд и цифрового сигнала с датчиков через мало загруженную локальную IP-сеть производилась в режиме «запрос—ответ». При отсутствии ответа от получателя информации выполнялась повторная передача запроса. Реализация команд и передача информации с датчиков происходила с интервалами от сотен микросекунд до единиц миллисекунд. Как и следовало ожидать, при наличии надежных электрических контактов в местах подключения сетевых разъемов потерь пакетов в данной сетевой среде не наблюдалось.

При исследовании режимов с более плотной нагрузкой сети была использована передача сжатого видеопотока через локальную IP-сеть. Для этого эксперимента производилось раздельное сжатие кадров видеопотока по алгоритму биортогонального вейвлет-преобразования (9, 7) [5, 6, 7] аппаратно микросхемой ADV611. Сжатый видеопоток принимался высокопроизводительным персональным компьютером, декомпрессировался и отображался на экране дисплея.

Использование потокового режима показало плохой результат, поскольку косвенная регулировка интенсивности потока, в зависимости от состояния сети и приемника информации, в этом режиме невозможна. В связи с переполнением входного буфера приемника терялась значительная часть пакетов (приемник «не справлялся» с входным потоком), что приводило к нестабильности смены кадров в виде «рваного» воспроизведения.

В режиме «подтверждение после передачи массива» отдельные массивы представляли собой сжатые кадры изображения. В локальной сети данный режим дал хороший результат, поскольку по сравнению с потоковым методом позволяет косвенно регулировать трафик в сети, а по отношению к режиму «запрос-ответ» сокращает количество необходимых транзакций. Единственным недостатком при этом режиме является высокое требование к входному буферу приемника, который в предельном случае должен быть способен

накопить сжатый кадр изображения максимально-го размера (около 140 Кбайт).

В режиме «запрос—ответ» кадры изображения передавались и, соответственно, отображались равномерно. Трафик напрямую соответствовал состоянию сети и приемника. Отмечено незначительное уменьшение скорости отображения кадров по сравнению с режимом «подтверждение после передачи массива».

В силу большого прикладного значения были отдельно проведены эксперименты по изучению передачи аудио-потока через локальную IP-сеть. При передаче несжатого оцифрованного одноканального звукового потока в локальной сети с пропускной способностью 10 Мбит/с доля занятого этим потоком трафика составляет от 0,08 % (частота дискретизации 1 кГц, количество бит на отсчет — 8) до 7 % (частота дискретизации 44 кГц, количество бит на отсчет — 16). Интервал между пакетами, отправленными источником потока, составляет от 23 мс до 1 с при среднем размере пакета 1 Кбайт. С учетом этого, а также принимая во внимание низкий уровень потерь, для данного типа сетевой среды режим обмена существенно не влияет на качество воспроизводимого звука, что и подтвердил проведенный эксперимент. Однако следует оговориться, что при возрастании количества потерь и искажений информации в сети предпочтительным является использование режима «запрос—ответ», поскольку он увеличивает вероятность корректной передачи пакетов от источника к приемнику. Механизмом для этого служит повторная передача при обнаружении потери пакета во время передачи.

В рамках исследования поведения глобальных информационно-управляющих систем проводились эксперименты по передаче команд, цифрового сигнала с датчиков, а также сжатого видеопотока через Internet. Передача данных производилась в режиме «запрос—ответ». При отсутствии ответа от получателя информации выполнялась повторная передача запроса. Во время каждого проведения эксперимента наблюдался незначительный процент потерь пакетов, который напрямую не зависел от географической удаленности компонентов системы. Поскольку при работе в режиме «запрос—ответ» может быть потеряна любая из пары пакетов, то необходимо исключить из множества пакетов-команд те из них, результат действия которых зависит не только от кода команды, но и от текущего состояния устройства или его выходов. Вместо этого должны быть использованы пакеты-команды, переводящие устройство или его выходы в единственное детерминированное состояние.

Условия передачи сжатого видеопотока через Internet были аналогичны условиям передачи сжатого видеопотока через локальную IP-сеть. Система оказалась работоспособной только при использовании режима «запрос—ответ». В остальных режимах обмена, как правило, удавалось передать только первые 1–2 кадра. Далее приемник получал лишь фрагменты (отдельные пакеты), несущие часть информации об изображении, что при использовании вейвлет-сжатия означало потерю всего кадра. Полученный результат объясняется тем, что интенсивный поток переполняет буфер маршрутизатора, расположенного перед наиболее «медленным» коммуникационным участком. Перепол-

нение буфера маршрутизатора является нештатной ситуацией и, чаще всего, приводит к его очистке с потерей всей предварительно накопленной информации. В результате пакеты теряются целыми сериями, не достигая своего приемника.

Результаты передачи аудиопотока по Internet аналогичны результатам, описанным для сжатого видеопотока. Исключением является лишь то, что при частоте дискретизации до 2 кГц в большинстве случаев наблюдалась устойчивая передача аудиоинформации. Однако при такой частоте дискретизации качество воспроизводимого звука оставляет желать лучшего и не является приемлемым для большинства приложений. Кроме этого, следует отметить, что если для видеоинформации пропуск или задержка в воспроизведении отдельных кадров не является критичным нарушением качества, то для звука подобные нарушения приводят к серьезным проблемам восприятия.

С учетом проделанных экспериментов и высказанных соображений, выработан ряд рекомендаций для систем передачи звука через Internet, заключающихся в использовании:

- современных алгоритмов сжатия, позволяющих достичь приемлемого качества звука при высоких коэффициентах сжатия;
- режима обмена «запрос-ответ», с повторными передачами при обнаружении потери;
- накапливающего буфера у приемника информации, размер которого по длительности воспроизведения соответствующего звукового фрагмента должен быть не меньше максимальной задержки пакета в сети.

В ходе проведения экспериментов с устройствами встраиваемого класса, использующими для передачи целевой информации IP-сети, были сделаны два дополнительных наблюдения, которые являются общими для любого вида информации и могут оказать влияние на выбор надтранспортируемого протокола.

1. В протоколе UDP предусмотрена возможность передачи информации без использования контрольной суммы для определения достоверности и целостности принятой информации. Операция подсчета контрольных сумм, как правило, требует наличия значительных буферов оперативной памяти и, конечно, машинного времени процессора. Для встроеной системы управления это приводит к ухудшению основных ее параметров. При проведении экспериментов обнаруживались искажения пакетов при передаче, которые оставались «незамеченными» на уровнях ниже транспортного. Вследствие этого использование контрольных последовательностей является обязательным условием для устойчивого функционирования подобного рода систем.

2. В Internet, как и в любой другой коммуникационной среде, распространяется не только полезная информация, но и «информационный мусор» (помехи). В процессе экспериментов обнаружены факты получения на целевой IP-адрес и UDP-порт UDP-пакетов [9], не отправленных ни одним из компонентов системы. Попытка дешифрации таких

пакетов может приводить к сбоям в работе устройств и программного обеспечения верхнего уровня или вызывать выполнение ложных команд. Во избежание этого каждый пакет, пересылаемый внутри системы, должен содержать некоторую идентификационную информацию, позволяющую приемнику однозначно отличать «свои» пакеты от «чужих».

На основании сделанных выводов наиболее рациональным представляется использование контрольных последовательностей, выполняющих одновременно и функции идентификации пакетов. Конкретная схема вычисления контрольной последовательности определяется требованиями к вероятности пропуска факта нарушения целостности пакета и ограничениями по скорости и сложности вычислений (простые контрольные суммы, полиномиальные суммы и т. д.).

Заключение

Приведенные описания экспериментов и полученные результаты позволяют констатировать факт, что в настоящее время в России имеется опыт разработки современных Internet-устройств встраиваемого класса. Выполненные экспериментальные исследования опытно-промышленных образцов показывают реальную возможность создания глобальных информационно-управляющих систем с коммуникациями типа «устройство—устройство» для самых разнообразных целей.

Опыт показывает, что предметом дальнейших серьезных исследований в первую очередь должны стать реальные характеристики Internet как коммуникационной среды, а также связанные с ними системные проблемы. В частности, остро стоит вопрос экспериментальной оценки времени реакции, как вероятностной характеристики доставки сообщений в распределенной системе управления.

Вторая важная задача заключается в необходимости разработки эффективных методов защиты информации в Internet, являющейся открытой системой с потенциальной возможностью вмешательства злоумышленников в процесс управления. Специфику задачи определяет огромное число абонентов, измеряемое для некоторых приложений миллионами, а также необходимость шифрации/дешифрации видео- и аудиопотоков в реальном масштабе времени, что при пропускной способности 1 Мбит/с представляется совсем нетривиальной задачей.

Очевидно, отдельного рассмотрения уже в ближайшее время потребует проблема выбора одного из возможных альтернативных путей развития глобальных информационно-управляющих систем: либо использовать уже существующую сеть Internet в качестве единой коммуникационной среды для всех типов информационного обмена, либо создавать специализированные коммуникационные среды нового поколения для промышленного использования.

Литература

1. www.embedded.com/internet
2. www.telemed.ru
3. www.realtex.meteo.ru
4. www.vbank.ru/partners/telekom
5. **Воробьев В. И., Грибунин В. Г.** Теория и практика вейвлет-преобразования. — ВУС, 1999. — 208 с.
6. www.wavelet.org
7. www.bell-labs.com/who/wim/papers/papers.html
8. **Компьютерные сети.** Книга 1: High Performance Networking. Энциклопедия пользователя: Пер. с англ. / Марк А. Спортак и др. — Киев: ДиаСофт, 1998. — 432 с.
9. **Фейт Сидни** TCP/IP: Архитектура, протоколы, реализация (включая IP версии 6 и IP Security) / 2-е изд. — СПб: Лори, 2000. — 424 с.
10. **Kravotta Nicholas** Embedded TCP/IP: a smorgasbord of options // EDN. — 2001. — N 1. — P. 75–80.
11. **Mitaque Larry** Internet device interaction control // Internet appliance design. — N 01. — 2001. — P. 61–66.
12. **Опыт** использования информационно-управляющих сетевых систем для передачи видеоизображений / Астапкович А. М., Востриков А. А., Касаткин А. А. и др. / В кн.: Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. Семинары ASK Lab 2001 / Под общ. ред. М. Б. Сергеева. — СПб: Политехника, 2002. — С.180–197.

УДК 629.783.05:629.1.053

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ И ГИС–ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ НАВИГАЦИОННО–ГИДРОГРАФИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

В. А. Катенин,*д-р воен. наук, старший научный сотрудник***А. В. Катенин,***старший инженер**Государственный научно-исследовательский**навигационно-гидрографический институт Министерства Обороны**Российской Федерации (ГНИНГИ МО РФ)*

Рассматриваются преимущества комплексного использования спутниковых и ГИС-технологий в автоматизированных информационно-управляющих системах береговых подразделений Гидрографической службы и на морских подвижных объектах.

Статья предназначена для специалистов, занимающихся вопросами построения информационно-управляющих систем, сетевыми технологиями, системным анализом и обработкой информации.

Современный этап развития навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) морских подвижных объектов характеризуется значительным увеличением потоков разнородной информации, необходимой для принятия оптимальных управленческих решений, в том числе и в экстремальных ситуациях.

Для охвата всего объема информации она должна быть представлена в удобном и обозримом виде, позволяющем из всего множества данных выбирать только важные и необходимые. Кроме того, обоснованность управленческих решений во

многом зависит от применения для этих целей математических методов оптимизации, реализованных в виде машинных методик, что в целом дает возможность автоматизировать этот процесс и существенно повысить производительность труда.

Решение указанных проблем становится уже невозможным без привлечения автоматизированных информационно-управляющих систем (АИУС) с использованием геоинформационных технологий. Одним из основных средств геоинформатики являются географические информационные системы (ГИС), под которыми понимается совокупность ком-

пьютерного оборудования, программного обеспечения, географических данных и произвольного проектирования пользователем хода работ для накопления, хранения, видоизменения, обработки, анализа и визуализации всех форм информации [1].

Основой любой ГИС является цифровая карта. ГИС позволяет создавать карты в разных масштабах и проекциях с разнообразной окраской, определять пространственные связи между объектами карты. При этом ГИС позволяет создать любую нужную географическую картину, удовлетворяющую требованиям потребителя. Таким образом, главное назначение ГИС — оперативное представление пользователю достоверной и обработанной пространственно-распределенной информации, необходимой для решения управленческих задач, что делает ее незаменимым аналитическим инструментом в повседневных и экстремальных условиях.

Успешность функционирования ГИС во многом обусловлена соблюдением следующих основных требований, предъявляемых к ним. ГИС должна быть:

— *полной*, т. е. охватывать все стороны информационного, программного и технологического обеспечения, которые встречаются в процессе эксплуатации системы;

— *комплексной*, т. е. иметь возможность совместного анализа больших групп параметров в их взаимосвязи;

— *открытой*, т. е. обеспечивать легкость модификации и переназначивания с целью поддержания ее на уровне современности, что необходимо как для обеспечения эволюционности, так и для решения разнообразных задач;

— *защищенной*, т. е. обеспечивать защиту информации, предназначенной для различных уровней управления.

Дополнительные требования к ГИС приведены ниже. ГИС должна обеспечить решение следующих частных задач:

— создание и ведение баз пространственно-распределенных данных;

— создание и редактирование цифровых карт в различных проекциях и масштабах;

— отображение различных данных в виде карт, графиков, диаграмм и т. п.;

— анализ картированных данных;

— измерение геометрических характеристик природных объектов, расстояний от географических точек до районов с теми или иными условиями и т. д.;

— изменение масштабов отображения, форм и вида представления графической и картированной информации;

— привязка информации из баз данных к географическим объектам на цифровых картах;

— интерполяция и построение векторных и скалярных полей по информации из баз данных;

— выполнение запросов на многообразные выборки из баз данных; на отображение и пространственный анализ картированных данных (по параметрам, периодам времени, районам и т. д.);

— документирование информационной продукции;

— применение приложений для выполнения специальных видов обработки, хранения информации и др.

Одной из сложнейших проблем в ГИС-технологии является оперативный сбор и хранение исход-

ных данных, съемка которых представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс. В настоящее время наибольшее распространение в качестве основы для создания цифровых карт получили традиционные морские навигационные карты. Однако при их отсутствии или при необходимости получить оперативную информацию большого пространственного охвата представляется целесообразным использовать дистанционные средства. Особая роль здесь отводится спутниковой информации в ГИС, где результаты дистанционного зондирования поверхности Земли (океана) из космоса являются регулярно обновляемыми источниками данных, необходимых для формирования информационных слоев электронных карт в широком спектре масштабов (от 1:10 000 до 1:10 000 000). При этом информация от дистанционных средств зондирования позволяет не только оперативно оценивать, но главным образом производить обновление и корректуру используемых графических слоев. Также отметим, что в ГИС важны не только слои информации, но и точная привязка объектов на них к географической системе координат.

С учетом изложенного, для формирования графических слоев может быть полезной комплексная информация от следующих спутниковых систем:

— навигационных (ГЛОНАСС, GPS, ГЛОНАСС + GPS);

— освещения обстановки;

— океанографической;

— метеорологической;

— топогеодезической и др.

При этом для осуществления связи между морским подвижным объектом и пользователями различного уровня предусматривается использование спутников-ретрансляторов.

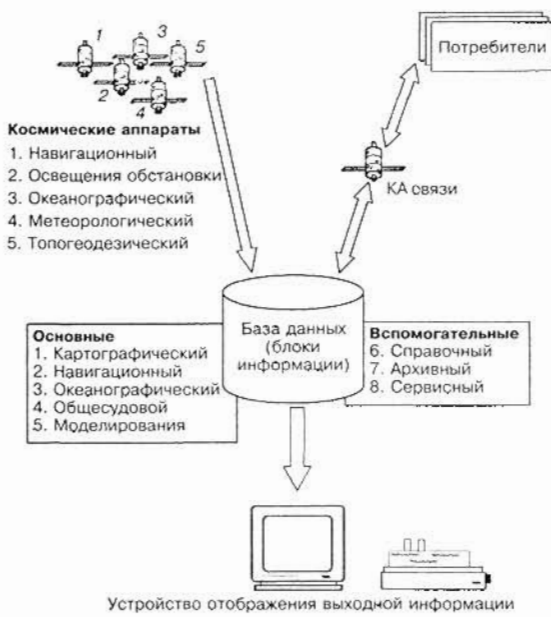
В последнее время в стране и за рубежом все больше внимания уделяется применению малых (массой до 500 кг) космических аппаратов (МКА) для решения задач аналогичного назначения. Основная идея применения МКА — сделать их обычным рабочим инструментом, пускаемым в дело по мере возникновения в этом необходимости. Это связано в первую очередь с необходимостью увеличения оперативности обновления данных путем наращивания орбитальной группировки спутников того или иного назначения. К положительным сторонам МКА также следует отнести:

— относительно большую живучесть за счет малой заметности, мобильности средств запуска и возможности оперативного восполнения или наращивания группировки;

— относительно низкую стоимость запуска МКА, в том числе и за счет размещения на одном ракетносителе нескольких МКА.

МКА с продолжительностью функционирования 3–6 месяцев могут быть быстро выведены на орбиту в случае возникновения кризисных ситуаций с помощью штатных средств запуска подвижного морского объекта. Подобные спутники нашли широкое коммерческое применение за рубежом. Большой интерес использование МКА вызывает у подразделений МЧС для обследования труднодоступных районов, подвзвгшихся воздействиям внешней среды, и их контролю.

Схема взаимодействия спутниковых систем с базами данных носителя и командованием различного уровня приведена на рис. 1.



■ Рис. 1. Схема информационного взаимодействия морского подвижного объекта со спутниками и пользователями различного уровня

Основными системами, обеспечивающими сбор данных для ГИС, являются спутники с дистанционными средствами зондирования, работающими в оптическом диапазоне. Для оперативности передачи спутниковой информации предлагаются качественно новые подходы, которые предусматривают применение векторного квантования изображений [2] или непосредственное преобразование изображений в цифровой вид на борту космического аппарата для дальнейшей передачи их потребителю.

Симбиоз комплексной спутниковой информации и ГИС-технологий открывает принципиально новые возможности в создании автоматизированных информационно-управляющих систем. Новая технология обладает следующими достоинствами, которые выводят ее в лидеры:

- комплексность информации;
- оперативность ее получения и представления в компактном виде;
- наглядность представления;
- анализ совокупной разнородной информации и выработка обоснованных управленческих решений;
- мобильность системы.

Рассмотрим возможность использования новой технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах (АИУС) в береговых подразделениях гидрографической службы (ГС) и на судах.

С учетом изложенного можно выделить следующие функции АИУС-ГС [3]:

- информационное обеспечение руководства ГС различного уровня;
- информационное взаимодействие с источниками и потребителями гидрографической информации;
- ведение специализированных баз данных, классифицированных по территориальному (с гео-

графической привязкой) и предметному признакам;

- организация интерфейса с абонентами системы;

- поддержка подсистем моделирования и прогноза на основе информации, циркулирующей в системе;

- создание и модификация топографо-геодезической основы и представления на ней мест дислоцирования частей и подразделений ГС, обеспечиваемых ими площадей суши и акваторий океана (моря);

- отображение информации баз данных, результатов моделирования, анализа и прогноза на картографической основе в графическом и символьном виде;

- пространственно-временной анализ информации;

- подготовка рекомендаций для принятия управленческих решений;

- автоматизированное формирование документов.

Исходя из функций, принципы построения АИУС-ГС определяются следующим образом:

- многоуровневое построение системы на базе локальных вычислительных сетей (ЛВС);

- информационное взаимодействие между ЛВС;

- разграничение функций ЛВС по видам задач, решаемых различными структурами и уровнями управления;

- наличие центральной ЛВС на уровне управления ГС (первого уровня), организующей информационное взаимодействие между элементами системы одного уровня, межуровневое взаимодействие, формирование единого информационного поля каждого уровня, а также информационное взаимодействие с внешними автоматизированными системами и абонентами;

- единство методологических, технологических и организационных принципов построения системы;

- открытость системы, обеспечивающая возможность ее структурного и функционального наращивания (открытая архитектура системы);

- модульный принцип построения системы;

- использование геоинформационной технологии в качестве интегрирующего ядра системы;

- построение системы на базе ПЭВМ типа IBM PC с возможностью поэтапного наращивания ее мощности за счет подключения более производительных вычислительных платформ, используя совместимость сетевого и специализированного программного обеспечения;

- максимальное использование коммерческих программно-технических средств;

- соблюдение международных стандартов в области информационно-вычислительных сетей и средств связи;

- поэтапное создание АИУС-ГС;

- распределенный сбор и первичная обработка исходной информации;

- унификация и стандартизация циркулирующей информации, методов ее учета и форм представления, а также базовых программных средств обработки;

- возможность конвертации информации;

- централизованное ведение классификаторов и кодификаторов информации;

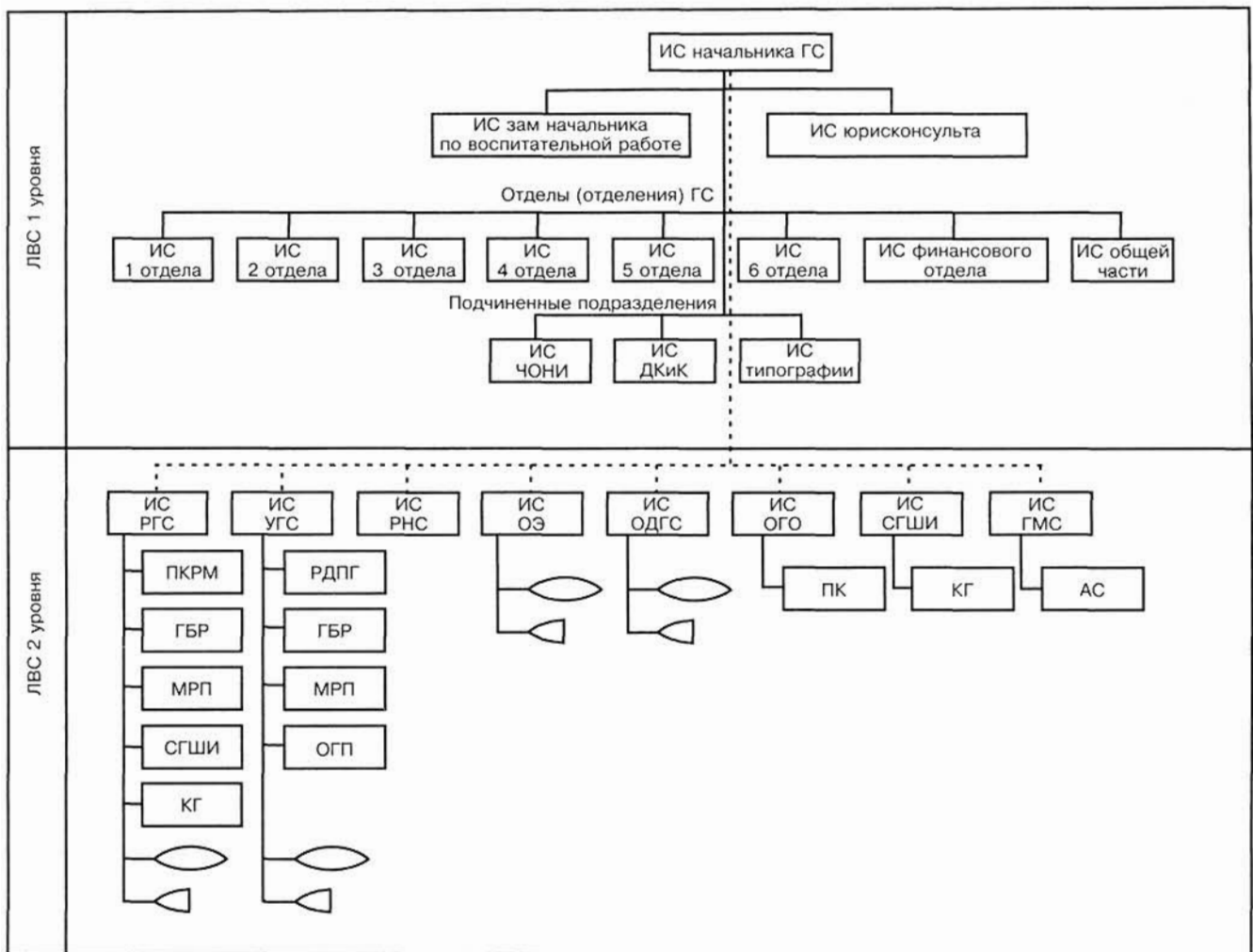
— разграничение реестродержателей;
 — многоуровневая защита информации;
 — регламентированное предоставление информации командованию, частям и подразделениям ГС.
 Структура создаваемой АИУС-ГС должна соответствовать структуре гидрографической службы (рис. 2). Здесь ИС — информационная система руководителя, построенная на основе ГИС-технологий.

Что же касается морских подвижных объектов, то рассмотрим возможность использования спутниковых и ГИС-технологий в автоматизированной информационно-управляющей системе судна (АИУС-С) [4]. Система предназначена для автоматизированной подготовки обоснованных управлен-

ческих решений по повседневной деятельности судов при решении свойственных им задач.

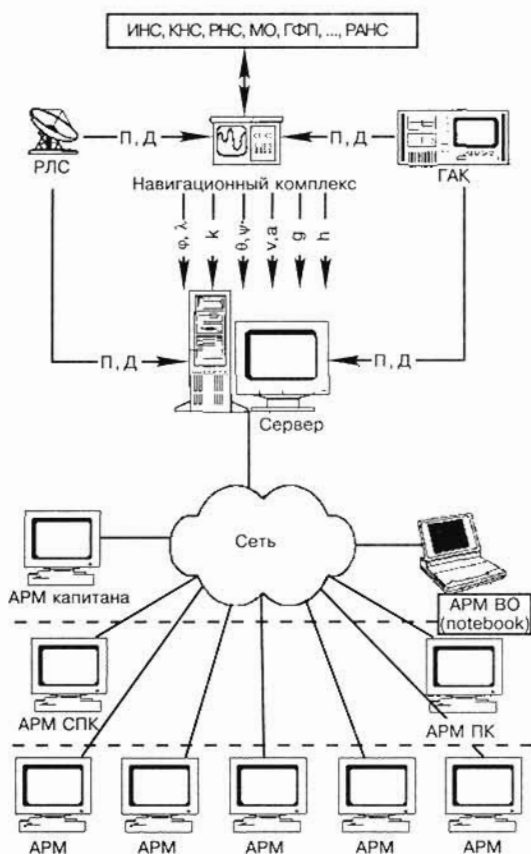
Структура АИУС-С, как и в первом случае, должна соответствовать штатной структуре судна (рис. 3).

При этом АИУС-С строится на базе ЛВС, которая обеспечивает информационную поддержку принятия управленческих решений в рамках компетенции различных звеньев командования судна, включая вахтенного на мостике. В такой системе должны быть предусмотрены алгоритмы ввода-вывода, фильтрации, анализа и корректуры данных, а также возможность наращивания числа рубрик, удаления ненужных и переименования имеющихся. Доступ к информации осуществляется по технологии «Клиент-сервер».



■ **Рис. 2.** Типовая схема организации гидрографической службы флота: ИС — информационная система; ГС — гидрографическая служба; РНС — радионавигационная система; ЧОНИ — часть оперативной навигационной информации; ДКиК депо карт и книг; РГС — район гидрографической службы; УГС — участок гидрографической службы; ОЭ — океанографическая экспедиция; ОДГС — отдельный дивизион гидрографических судов; ОГО — отдельный гидрографический отряд; СГШИ — склад гидрографическо-штурманского имущества; ГМС — гидрометеорологическая служба; ПКРМ — пункт контроля радионавигации маневренный; ГБР — гидрографическая база по ремонту и подготовке к постановке средств навигационного оборудования; МРП — маячно-ремонтная партия; КГ — корректорская группа; РДПГ — радиодальномерная партия гидрографическая; ОГП — отдельная гидрографическая партия; ПК — пункт контроля; АС — аэрологическая станция:

— — — — — связь с подразделениями, находящимися на территории ГС; - - - - - связь с частями и подразделениями ГС, находящимися на периферии



■ Рис. 3. Локально-вычислительная сеть судна: ИНС — инерциальная навигационная система; КНС — космическая навигационная система; РНС — радионавигационная система; МО — маяк-ответчики; ГФП — геофизический полигон; РАНС — радиоастронавигационная система; РЛС — радиолокационная станция; П, Д — пеленг и дистанция; АРМ — автоматизированное рабочее место; ВО — вахтенный офицер; СПК — старший помощник капитана; ПК — помощник капитана

Основным элементом любой АИУС является автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста. Типовое АРМ состоит из персонального компьютера с источником бесперебойного питания, программного обеспечения с базами данных и использует текущую информацию от различных датчиков.

Одной из проблем при создании АРМ конкретного пользователя (в нашем случае — штурмана) является разработка интерфейса. Среди существующих наиболее удобным для непрофессиональных (с точки зрения специалистов в области компьютерных технологий) пользователей является интерфейс типа иерархического меню, который предоставляет схему обработки информации по принципу «смотри и выбирай». Это значительно упрощает взаимодействие пользователя с компьютером, поскольку использование меню не требует изучения языка общения с системой.

Принцип построения интерфейса целесообразно осуществлять в соответствии с функциональными обязанностями штурмана. По нашему мнению, система должна оперировать с восемью груп-

пами данных, структурно объединенных в основные (картографический, навигационный, океанографический, тактический, моделирования) и вспомогательные (справочный, архивный, сервисный) блоки. Рассмотрим их более подробно.

1. Картографический блок. Предназначен для выработки электронных карт различных масштабов и проекций, являющихся ядром ГИС. Содержит рубрики (разделы):

- электронные карты;
- специальные карты;
- справочные карты;
- вспомогательные карты.

Блок позволяет:

— осуществлять выбор нужной карты, автоматическую ее загрузку и перемещение карты по экрану;

— управлять масштабом и нагрузкой карты (базовой, стандартной, полной);

— осуществлять просмотр карты на любой географический район с увеличением (уменьшением) изображения в целом или отдельной области;

— выбрать объект на карте и выдать по нему справку;

— выбрать нужные информационные слои (локальные места) и составить из них мозаику;

— произвести смену экранной палитры.

2. Навигационный блок. Предназначен для ведения навигационных прокладки и журнала (документирования обстоятельств плавания). Включает следующие рубрики:

— средства навигационного оборудования;

— навигационные расчеты;

— предварительная прокладка;

— исполнительная прокладка;

— автоматическое документирование текущих навигационных параметров и обстоятельств плавания;

— выработка сигналов предупреждений.

Блок позволяет:

— обосновать выбор и отобразить основной и резервный маршруты перехода корабля в назначенные районы действий; наложить на них слои географической, океанографической, справочной и др. информации;

— вести исполнительную прокладку, производить навигационные и тактические расчеты;

— формировать «мозаику» из различных информационных слоев или их фрагментов;

— вести оперативную обстановку на генеральных, путевых и частных картах с отображением своих сил и противника, средств навигационного оборудования, геомагнитного и гравитационного полей, а также другой необходимой информации;

— моделировать различные ситуации при нарастании степеней угрозы, развертывании корабля и в ходе ведения боевых действий; оценивать последствия от противодействия противника.

3. Блок океанографических данных. Предназначен для сбора, хранения, анализа данных о внешней среде в интересах обеспечения применения оружия, технических средств и безопасности плавания. Включает:

— гидрографические сведения;

— океанографические данные;

— метеорологические данные.

Блок позволяет:

— подготавливать исходные данные для машин-

ных методик блока моделирования по оценке воздействия внешней среды на эффективность выполнения задач корабля;

— прогнозировать состояние внешней среды и учесть ее влияние на безопасность и скрытность плавания подводной лодки;

— использовать информацию для предварительной оценки возможности применения радионавигационных средств и различных полей Земли в интересах подводной навигации;

— выдавать океанографическую информацию другим пользователям.

4. Общесудовой блок. Предназначен для:

— учета состояния судна (личного состава, наличия и состояния механизмов, груза, топлива, запасов пресной воды, ЗИПа и др.);

— планирования общесудовых мероприятий и работ и проведения общесудовых и других расчетов;

— учета требований руководящих документов по действиям судна в различных ситуациях и др.

Блок позволяет:

— создать оперативный-тактический фон, на котором будут разворачиваться события;

— выдавать полную информацию, необходимую для ведения карты обстановки;

— подготавливать исходные данные для проведения общесудовых расчетов в блоке моделирования по использованию своих технических средств и уклонения от встречных судов.

5. Блок моделирования. Предназначен для оперативного принятия обоснованных управленческих решений за счет автоматизации процесса и применения математических моделей, основанных на аппарате исследований операций, математической статистике, теории игр, имитационного моделирования и др.

Важным достоинством блока является то, что он позволяет производить оценки действий судна в динамике, а также в реальном времени или с использованием временного масштаба. Кроме того, блок позволяет моделировать различные экстремальные и повседневные ситуации для различных видов действий.

В состав вспомогательных входят следующие блоки:

6. Блок справочной информации. Предназначен для поддержки функционирования основных блоков информацией долгосрочного хранения, которая имеет вспомогательное значение. Содержит следующие рубрики:

- руководства для плавания;
- наставления и правила;
- справочные и вычислительные пособия;
- правовые вопросы;
- приказы и директивы.

Блок позволяет оперативно найти и использовать в различных целях нужную разноплановую информацию.

7. Архивный блок. Предназначен для архивации информационных ресурсов и их описаний, потерявших свою актуальность. Блок позволяет вести архив и предоставлять доступ к сохраненной информации для ее восстановления или осуществления выборки данных. В блоке могут содер-

жаться материалы, которые не входят в состав информационных ресурсов штурмана.

8. Блок сервисных функций. Предназначен для предоставления штурману различных услуг, в том числе электронной почты и автоматического секретаря. Поддерживает администрирование системы и реализует доступ к любым материалам, входящим в состав информационных ресурсов АИУС-С. Блок обеспечивает подключение и доступ к информационным ресурсам общего пользования или открытым ресурсам других пользователей, позволяет выполнить выборку собственных информационных ресурсов и их отправку по электронной почте.

В блоке предусмотрены рубрики, содержащие необходимые сведения и формы для составления заявок на ремонт и получение со складов технических средств, карт, ЗИПа, а также для их учета и списания. Отдельная рубрика включает вопросы делопроизводства.

Для осуществления ежемесячного, недельного и суточного планирования деятельности штурмана предусматривается использование специальной программы [5], которая позволяет отслеживать технические и организационные мероприятия и вести документооборот в электронном виде.

Учитывая вышеизложенное, нам представляется, что оснащение кораблей подобными системами с возможностью получения разнородной информации в реальном времени от спутниковых навигационных и других систем с одновременным использованием математических моделей для оценки эффективности действий носителя позволит осуществлять управление действиями корабля самым эффективным образом. По предварительным оценкам, производительность работы штурмана может вырасти на порядок и более. При этом резко повышается обоснованность принятых им решений и отпадает необходимость в выполнении рутинной работы по ручному оформлению карт, составлению пояснительных записок, ведению документов и переписки.

Литература

1. **Тихунов В. С.** Моделирование в картографии. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 405 с.
2. **Катенин А. В.** Применение векторного квантования изображений оптического диапазона в интересах глобальных морских коммуникационных систем. *Materialy na XI Miedzynarodowa Konferencje Naukowo-Techniczna.* — AMW: Gdynia, 1998. — S. 265–274.
3. **Анохин В. Н., Катенин В. А.** Перспективы использования геоинформационных систем в гидрографии. *Materialy na X Miedzynarodowa Konferencje Naukowo-Techniczna.* — AMW: Gdynia, 1996. — S. 105–104.
4. **Katenin V., Katenin A.** The complex use of the satellite and GIS-technologies in submarine navigation. — *Annual of Navigation.* — N 2000. — P. 69–79.
5. **Катенин А. В.** Программа для ЭВМ «Система поддержки организационного планирования и управленческой деятельности». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 980145 (РОСАПО), 06.03.1998.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАТОРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ¹

Н. А. Балонин,

канд. техн. наук, доцент

Л. А. Мироновский,

д-р техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)

Рассматриваются линейные операторы систем управления на ограниченном интервале времени и исследуются их свойства. Вводится классификация линейных операторов, обладающих разными типами симметрии, и указываются их экстремальные качества. Работа является логическим продолжением предыдущих работ авторов [1–6] и вводит в рассмотрение круг операторов, порождаемых линейной динамической системой. Показано, что операторы, ассоциированные с линейной динамической системой, могут обладать различными видами симметрии: обычная симметрия и кососимметрия (симметрия относительно главной диагонали), симметрия и кососимметрия относительно побочной диагонали, симметрия и кососимметрия относительно вертикальной и горизонтальной осей, ганкелева и теплицева симметрии, симметрия собственных функций и спектра.

Физическая постановка задачи поиска оптимальных входных воздействий

Задача компьютерного моделирования линейных операторов встречается во многих технических приложениях, где требуется отыскать форму оптимального, в том или ином смысле, сигнала. В частности, одна из задач теории управления состоит в том, чтобы обеспечить заданную норму выходного сигнала объекта, затратив минимальное количество энергии на управление. Двойственная формулировка состоит в том, чтобы при фиксированной норме входного сигнала управления получить максимальную энергию на выходе. Различные постановки этой задачи известны как задача Булгакова, задача о согласованной фильтрации, задача о раскачивании маятника и т. д. Во всех случаях принципиальны ограничения на длительность интервала управления. Форма оптимального входного сигнала будет зависеть как от вида системы, так и от длительности этого интервала.

Например, известно, что максимальная энергия на выходе идеального интегрирующего звена достигается при входном сигнале в виде четверти периода косинусоиды. В качестве более сложных примеров можно указать задачи о энергетически оптимальном разгоне двигателя, раскатке многозвенного маятника, задачу о выделении максимальной энергии на выходе электрической цепи, задачу о выведении ракеты на орбиту и др. Во всех

этих случаях предполагается, что энергия входного сигнала фиксирована. Решение этих задач имеет важное практическое значение, поскольку приводит к экономии затрат на управление. Вместе с тем, оказывается, что математическое решение этих задач связано с большими трудностями даже для сравнительно простых объектов, таких как двойной интегратор или колебательное звено, описывающее движение маятника.

Для разрешения имеющегося противоречия между важностью указанных задач и сложностью их решения естественно попытаться привлечь компьютерное моделирование. Однако это требует разработки соответствующей методики и устойчивых в вычислительном отношении алгоритмов, обладающих умеренной сложностью.

В основе предлагаемого подхода лежит флип-метод, развиваемый авторами на протяжении ряда лет [2–5]. Он позволяет, проведя ряд экспериментов с самим объектом или компьютерной моделью соответствующего оператора, найти с требуемой точностью оптимальный входной сигнал. Математическое обоснование подхода требует рассмотрения линейных операторов, ассоциированных с исследуемой динамической системой. Наиболее известным из них является оператор свертки. Он служит стандартным средством описания линейных динамических систем и характеризует отображение множества входных сигналов, воздействующих на систему на интервале времени $(0, T)$, в множество выходных сигналов, рассматриваемых на том же самом интервале. Такой оператор отвечает режиму работы систем в реальном времени, типичному для большинства задач теории автома-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-01-00011.

тического управления и теории электрических цепей [7].

Однако для ряда задач, например, в тех случаях, когда интервалы управления и наблюдения не совпадают, оказывается удобным использовать иные операторы, — ганкелев оператор, операторы управления, наблюдения и др. Можно утверждать, что круг линейных операторов, связанных с одним и тем же динамическим объектом, неограничен. Даже относительно небольшие изменения в условиях подачи и снятия сигнала сказываются на свойствах оператора линейной динамической системы.

Приведем в качестве примера ганкелев оператор. Ганкелев оператор играет важную роль в современной теории линейных систем управления, хотя его изучение началось не так давно. В отличие от оператора свертки, который отображает текущие входы системы в ее текущие выходы, ганкелев оператор Γ описывает отображение прошлых входов в будущие выходы. Он описывается интегральным соотношением

$$y(t) = \Gamma u(t) = \int_{-\infty}^0 Q(t-\tau)u(-\tau)d\tau, \quad t > 0.$$

Сигнал $y(t)$, определяемый этой формулой, можно интерпретировать как реакцию системы при $t > 0$ на сигнал $u(-t)$, подаваемый на вход системы на интервале времени $(-\infty, 0)$. На практике длительности сигналов $u(t)$, $y(t)$ берутся конечными и равными T , где T — время успокоения системы.

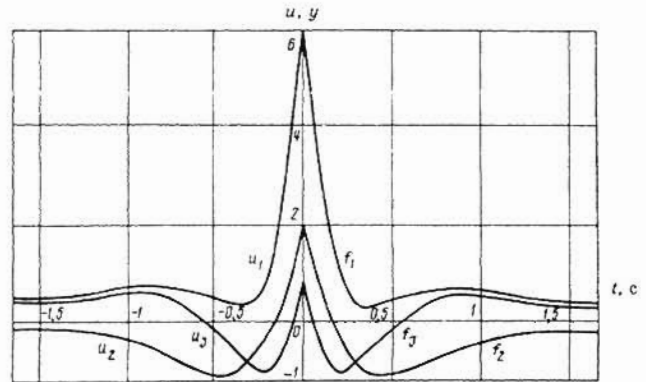
Записывая в запоминающее устройство различные сигналы $u(t)$ длительности T и подавая их на вход системы на интервале времени $(-T, 0)$, можно экспериментально наблюдать на выходе системы на интервале $(0, T)$ результат преобразования их с помощью ганкелева оператора в сигналы $y(t)$. Такой эксперимент можно производить не только с моделью исследуемого объекта, но и с реальным объектом, математическое описание которого неизвестно.

Наряду с оператором свертки и ганкелевым оператором в настоящей статье рассматривается еще ряд операторов, ассоциированных с линейными динамическими системами и представляющих интерес с точки зрения отыскания оптимальных входных сигналов. Такие системы, как правило, совпадают с собственными функциями или сингулярными функциями указанных операторов, поэтому важной задачей является исследование их свойств и разработка методов их отыскания.

Многие из этих функций имеют специальные свойства симметрии, которые облегчают их поиск. Например, сингулярные функции ганкелева оператора обладают своеобразной зеркальной симметрией. Это иллюстрирует рис. 1, на котором приведены ганкелевы функции системы, заданной передаточной функцией

$$Q(p) = \frac{39p^2 + 105p + 250}{(p+2)(p+5)^2}.$$

Значения ганкелевых чисел равны $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = -0,5$. Им соответствуют ганкелевы функции $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$, графики которых показаны на рисунке справа от оси ординат. Они представляют собой выходные сигналы модели, возбуждаемой при $t < 0$ сигналами u_1, u_2, u_3 , являющимися зеркальными



■ Рис. 1. Ганкелевы функции скалярной системы

ми отражениями функций f_1, f_2, f_3 относительно оси ординат. Масштаб графиков u_i уменьшен в λ_i (раз).

При этом возникают две задачи: разработка регулярных процедур получения таких операторов, а также методов их структурной и компьютерной реализации. Для решения первой задачи используется теория матричного представления непрерывных линейных операторов, а для решения второй — флип-метод в сочетании с теорией реализации сопряженных операторов.

Мультипликативное симметрирование линейных операторов

Наиболее глубокие результаты теории операторов получены для самосопряженных систем. Это объясняется тем, что они обладают высокой степенью симметрии, характеризуемой равенством $A = A^*$. Многие операторы, возникающие при исследовании линейных динамических систем, не являются симметричными в указанном классическом смысле. Типичным примером служит оператор свертки, а также операторы управления и наблюдения. Поэтому представляет интерес задача симметрирования этих операторов, т. е. перехода от них к симметричным или самосопряженным операторам, сохраняющим те или иные свойства исходных операторов.

Сначала остановимся на мультипликативном подходе к выделению симметричной части линейного оператора. Он опирается на хорошо известное полярное разложение операторов согласно формуле

$$A = H_1 O_1 = O_2 H_2, \quad (1)$$

где A — исходный оператор; O_1 и O_2 — ортогональные (изометрические) операторы; H_1 и H_2 — симметричные или самосопряженные операторы. Указанные операторы могут быть найдены из соотношений $H_1^2 = AA^*$; $H_2^2 = A^*A$; $O_1 = H_1^{-1}A$; $O_2 = AH_2^{-1}$. Симметричные операторы H_1 и H_2 наследуют ряд важных свойств оператора A , в частности, имеют те же сингулярные числа (и, следовательно, спектральные нормы), а их сингулярные функции связаны простой зависимостью. Заметим, что если не требовать положительной определенности матриц H_1, H_2 , то указанное разложение не единственно, т. е. существует много полярных разложений одного и того же оператора (по числу квадратных корней из самосопряженных операторов AA^* и A^*A).

Проиллюстрируем этот подход на примере оператора свертки S , с помощью которого линейный стационарный объект описывается формулой

$$y(t) = Su(t) = \int_0^t q(t - \tau)u(\tau)d\tau, \quad (2)$$

где S — оператор свертки; $q(t)$ — его импульсная весовая функция; $u(t), y(t) \in L_2(0, T)$ — входные и выходные скалярные сигналы, определенные на ограниченном интервале $t \in (0, T)$.

Анализ операторов системы упрощается после приведения уравнений динамического объекта к дискретной матричной форме $Y = QU$, где массивы $U = [u(t_0), u(t_1), \dots, u(t_N)]^T$ и $Y = [y(t_0), y(t_1), \dots, y(t_N)]^T$ содержат выборки входного и выходного сигналов, взятые с шагом h ; $t_0 = 0, t_N = T, h = T/N$. Ненулевые элементы матрицы Q пропорциональны отсчетам импульсной весовой функции $q(t)$

$$Q = h \begin{pmatrix} q(t_0) & 0 & \dots & 0 \\ q(t_1) & q(t_0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q(t_N) & q(t_{N-1}) & \dots & q(t_0) \end{pmatrix} = \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{matrix} \cdot \quad (3)$$

В таком случае оператор свертки представлен нижнетреугольной матрицей Q с одинаковыми элементами на каждой из диагоналей. Тем самым матрица Q является теплицевой и, следовательно, симметричной относительно побочной диагонали. Среди различных полярных разложений теплицевых матриц есть одно особенно простое. Структура его ясна из следующего утверждения.

Соответствующие представления для оператора свертки имеют вид $S = H_1 F = F H_2$, где F — оператор, осуществляющий перенумерацию отсчетов сигнала в обратном порядке; H_1 и H_2 — симметричные операторы ганкелева типа, матрицы их дискретного представления имеют вид

$$H_1 = \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{matrix}; \quad H_2 = \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{matrix}.$$

Технически реализацию указанных ганкелевых операторов можно осуществить, добавляя ко входу или к выходу динамической системы блок, реализующий оператор зеркального отображения функции во времени относительно середины временного интервала $(0, T)$. Этот оператор, осуществляющий переход к обратному времени, будем называть флип-оператором (от англ. flip — разворот) и обозначать буквой F .

Флип-оператор и сопряженный оператор

При переходе от оператора свертки к операторам H_1 и H_2 был использован флип-оператор F . Отметим некоторые его свойства. Ближайший матричный аналог флип-оператора, к которому он сводится при дискретизации процессов на входе и выходе системы, — это оператор, описываемый матрицей перестановок с единичными элементами на побочной диагонали. Правое (левое) умножение ее на произвольную матрицу приводит к зеркальному отражению последней относительно верти-

кальной (горизонтальной) оси, т. е. к своеобразному вертикальному или горизонтальному «транспонированию».

Флип-оператор обладает целым рядом специальных свойств: он симметричен $F = F^*$, ортогонален $F^* = F^{-1}$ и инволютивен $F^2 = E$, где E — тождественный оператор. Отсюда вытекает, что собственные числа флип-оператора вещественны и по модулю равны единице, т. е. его спектр сосредоточен в точках ± 1 . Множество собственных функций флип-оператора, отвечающих собственным числам $+1$, образовано всеми функциями, заданными на интервале $(0, T)$ и симметричными (четными) относительно середины этого интервала, а множество собственных функций, отвечающих собственным числам -1 , образовано всеми кососимметричными (нечетными) функциями. В конечномерном случае число четных собственных векторов равно числу нечетных или больше его на единицу.

Флип-оператор допускает экспоненциальное представление вида $F = e^{i\Phi}$, где симметричный оператор Φ определяется формулой $\Phi = \pi(E - F)/2$. Матрица дискретного представления оператора F имеет крестообразную структуру — все ее ненулевые элементы расположены на главной и побочной диагоналях. В силу изометричности флип-оператор не меняет энергии преобразуемых сигналов, а также их классических норм. Это качество позволяет образовывать с помощью флип-оператора F эквивалентные по норме комбинированные операторы типа FS, SF, FSF.

Заметим, что к операторам, изометрически эквивалентным исходному, относится и сопряженный оператор. В связи с этим возникает вопрос, не находится ли среди комбинированных операторов, изометрически эквивалентных оператору свертки S , сопряженный оператор S^* . В общем случае это не так. Однако для линейных стационарных динамических систем ответ оказывается положительным: использование двух флип-операторов (на входе и на выходе объекта) преобразует оператор свертки в сопряженный ему оператор, т. е. имеет место операторное равенство

$$S^* = FSF. \quad (4)$$

Отметим, что возможность такого простого представления оператора S^* обусловлена наличием внутренней симметрии, присущей оператору свертки линейной стационарной динамической системы. Эта симметрия носит теплицев характер и хорошо видна из структуры матрицы Q (3). В случае матриц обычная симметрия вводится с помощью операции транспонирования $A = A^T$. Если же это равенство выполняется с точностью до перестановки столбцов, то такая симметрия называется скрытой. В нашем случае матрица Q^T может быть получена из матрицы Q (3) перестановкой столбцов в обратном порядке («транспонированием» относительно вертикальной оси).

Приведенная на рис. 2 диаграмма характеризует набор комбинированных операторов, получаемых путем умножения оператора свертки на флип-оператор, и указывает тип их симметрии. Аналогичным образом могут быть получены комбинированные операторы и для других видов исходных операторов.

Из диаграммы и формулы (4) следует простой путь получения реакции сопряженного объекта на известное входное воздействие, при котором зна-

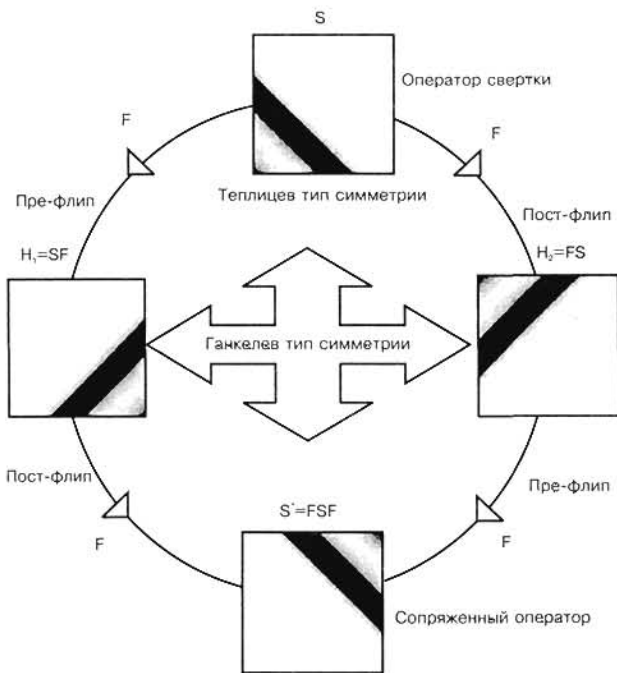


Рис. 2. Взаимосвязь комбинированных операторов

ние математического описания объекта, в принципе, не требуется. Его реализация в составе более сложного комбинированного оператора иллюстрируется схемой, показанной на рис. 3. Через v и w на ней обозначены входной и выходной сигналы сопряженного объекта, через u и y — соответствующие сигналы исходного объекта. В соответствии с ней можно строить вычислительные алгоритмы, учитывая опыт [8], и проводить реальные эксперименты с физическим объектом.

Аддитивное симметрирование линейных операторов

Альтернативный подход к выделению симметричной части произвольного линейного оператора основан на представлении его в виде суммы симметричной M и кососимметричной K частей. Применительно к оператору свертки указанное разложение имеет вид

$$S = M + K; \quad M = (S + S^*)/2; \quad K = (S - S^*)/2. \quad (5)$$

Перепишем последние равенства с учетом формул, приведенных на рис. 2:

$$M = (S + FSF)/2; \quad K = (S - FSF)/2. \quad (6)$$

Эти соотношения указывают путь практической реализации симметричной и кососимметричной частей оператора свертки. Структурная реализация оператора M поясняется рис. 3. Для структурной реализации оператора K сумматор на рис. 3 следует заменить вычитающим устройством. Отметим, что наряду с операторами M и K высокой степенью симметрии обладают операторы $FM = (FS + SF)/2$ и $FK = (FS - SF)/2$, последний из которых имеет структуру скобки Пуассона операторов F и S .

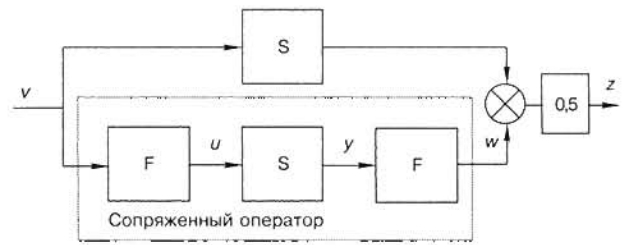


Рис. 3. Реализация комбинированного оператора M

Оператор M возникает, в частности, при исследовании оптимизационной задачи о минимальном искажении. В ней требуется найти сигнал $u(t)$, форма которого при прохождении через данную систему претерпевает наименьшие искажения. Можно показать, что искомый сигнал совпадает с главной собственной функцией оператора M [4].

Формула (6), описывающая традиционное разложение $S = M + K$, использует симметрию и кососимметрию составляющих относительно главной диагонали матриц дискретного представления операторов. Другие разложения можно получить, выделяя симметричные и кососимметричные части матриц относительно вертикальной и горизонтальной осей, а также относительно побочной диагонали.

$$S = M_1 + K_1; \quad S = M_2 + K_2; \quad S = M_3 + K_3. \quad (7)$$

Учитывая, что вертикальное и горизонтальное «транспонирование» оператора обеспечивается его умножением справа или слева на оператор F , можем записать:

$$M_1 = (S + SF)/2; \quad K_1 = (S - SF)/2; \\ M_2 = (S + SF)/2; \quad K_2 = (S - SF)/2. \quad (8)$$

Вследствие треугольной теплицевой структуры оператора свертки, третье из разложений (7) оказывается тривиальным $M_3 = S, K_3 = 0$, однако оно будет более содержательным для нестационарных систем.

Формулы (6) и (8) вводят в рассмотрение различные полусуммы и полуразности операторов S, FS, SF, FSF . Изложенный аддитивный подход к симметрированию оператора свертки порождает декомпозицию на основе диагональной симметрии (операторы M, K, FM, FK), а также — на основе вертикальной и горизонтальной симметрии (операторы M_1, M_2, K_1, K_2). Это дает семейство операторов с разными типами симметрии, отражающих различные свойства исходной системы.

Их перечень с указанием структуры — теплицева (T) или ганкелева (Γ), а также осей симметрии — горизонтальная (X), вертикальная (Y), главная диагональ (D_1), побочная диагональ (D_2) — приведен в таблице. Знаки «+» и «-» означают тип симметрии относительно соответствующей оси (симметричность или кососимметричность).

Таблица

Оператор	S	H ₁	Y ₂	S*	M	K	FM	FK	M ₁	K ₁	M ₂	K ₂
Структура	T	Г	Г	T	T	T	Г	Г	-	-	-	-
Ось симметрии	+D ₂	+D ₁	+D ₁	+D ₂	+D ₁	-D ₁	+D ₁	+D ₁	+Y	-Y	+X	-X

Структура матриц дискретного представления части этих операторов показана на рис. 4 (см. 3-ю страницу обложки). Рис. 4 демонстрирует наличие четырех типов симметрии операторных матриц — два диагональных, вертикальный и горизонтальный (они совпадают с четырьмя классическими осями симметрии квадрата). Операторы M и FM обладают двойной симметрией. Отметим, что операторы K_1 и K_2 , напротив, не имеют осей симметрии (но имеют оси кососимметрии).

Список полученных операторов может быть продолжен за счет их умножения на флип-оператор и линейного комбинирования. По существу здесь идет речь об алгебре операторов с двумя образующими. Это открывает единообразный путь для систематизации операторов, ассоциированных с динамической системой, их изучения и применения для решения прикладных задач. Аналогичным образом могут исследоваться и другие операторы, известные в теории управления, такие как операторы управления, наблюдения и ганкелев оператор.

Заключение

В работе описан и систематизирован ряд операторов, ассоциированных с линейной динамической системой, обладающих разными видами симметрии. Наряду с обычной рассмотрена симметрия ганкелева и теплицева типа, а также некоторые виды скрытой симметрии. Для построения симметричных операторов использован подход, основанный на симметрировании исходного оператора. При этом под симметрированием понимается выявление скрытой симметрии оператора либо выделение его симметричных компонент.







В статье применяется мультипликативная и аддитивная процедуры выделения симметричных частей линейных операторов. Первая из них использует представление оператора в виде суммы симметричной и кососимметричной составляющих, вторая опирается на полярное разложение. Показано, что для линейных динамических систем обе процедуры могут быть выполнены с помощью так называемого флип-оператора, осуществляющего переход к обратному времени. Этим обеспечивается простота их технической реализации. Комбинирование результатов обеих процедур позволяет получить на основе одного исходного оператора, например, оператора свертки, семейство линейных операторов, обладающих разными типами симмет-







рии. Они отражают разные аспекты исходной системы и могут оказаться полезными при решении различных задач оптимального управления, идентификации, диагностики.

Использование свойств симметрии линейных операторов динамической системы имеет прикладное значение, позволяя в ряде случаев упростить решение некоторых задач классической теории управления (исследование свойств оператора свертки, исследование изопериметрических задач), задач теории оценивания (оценка максимальной погрешности, как в задаче Булгакова) и задач теории идентификации (определение спектра и сингулярных функций, определение импульсной весовой характеристики динамической системы по ее сингулярным функциям). В качестве других примеров можно назвать задачи редукции, декомпозиции, расчет оптимального управления, отыскание оптимальных входных воздействий, определение операторных норм, решение двухточечных граничных задач.

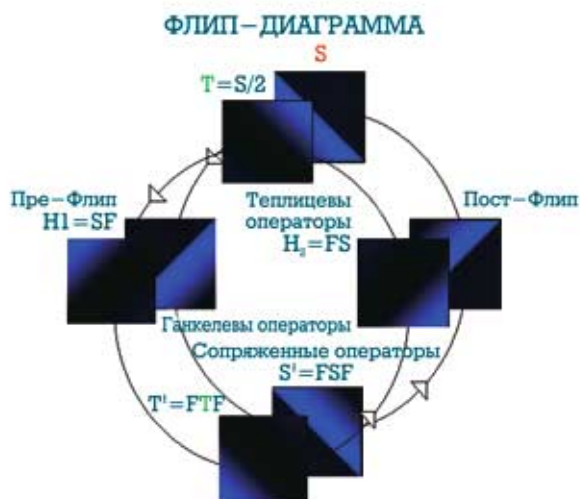
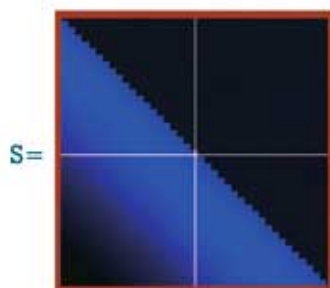
Литература

1. **Мироновский Л. А.** Ганкелев оператор и ганкелевы функции линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 9. — С. 73–86.
2. **Балонин Н. А., Мироновский Л. А.** Флип-метод определения сингулярных функций ганкелева оператора и оператора свертки // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 11. — С. 3–18.
3. **Балонин Н. А., Мироновский Л. А.** Компьютерное моделирование операторов линейных динамических систем. Proc. of 2th Int. Conference «Tools for Mathematical Modeling». — St-Petersburg, 1999. — P. 229–230.
4. **Балонин Н. А., Мироновский Л. А.** Линейные операторы динамической системы // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 11. — С. 57–68.
5. **Балонин Н. А., Мироновский Л. А.** Спектральные характеристики линейных систем на ограниченном интервале времени // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 6. — С. 3–8.
6. **Balonin N. A., Mironovsky L. A., Petrova X. Y.** Finding singular functions of the convolution operator // Proc. of Conference on Oscillations and Chaos. — S-Petersburg, 2000. — V. 3. — P. 414–417.
7. **Первозванский А. А.** Курс теории автоматического управления. — М.: Наука, 1976.
8. **Икрамов Х. Д.** Численное решение матричных уравнений. — М.: Наука, 1984.

$H_2 = FS$  ПОСТ-ФЛИП	$M_2 = (S + FS)/2$ 	$K_2 = (S - FS)/2$ 
$S' = FSF$  СОПРЯЖЕННЫЙ ОПЕРАТОР	$FM = (FS + SF)/2$ 	$FK = (FS - SF)/2$  СКОБКА ПУАССОНА

S  ОПЕРАТОР СВЕРТКИ	$M = (S + S')/2$  СИММЕТРИЧНАЯ ЧАСТЬ S	$K = (S - S')/2$  КОСОСИММЕТРИЧНАЯ ЧАСТЬ S
$H_1 = SF$  ПРЕ-ФЛИП	$M_1 = (S + SF)/2$ 	$K_1 = (S - SF)/2$ 

ОПЕРАТОР СВЕРТКИ И ЕГО ДЕКОМПОЗИЦИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИТЕХНИКА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ

Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д.

Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2002. — 592 с.: ил.

Книга содержит три части. Первая часть «Процессоры цифровой обработки сигналов» посвящена архитектуре и особенностям организации DSP. Во второй части «Алгоритмы цифровой обработки сигналов» рассматриваются основы теории дискретных систем, методы анализа эффектов квантования сигналов при реализации алгоритмов обработки на DSP, базовые алгоритмы ЦОС и их реализация на DSP. Третья часть «Инструментальные средства проектирования систем ЦОС» содержит описание программных и аппаратных средств, используемых для решения задач проектирования и входящих в стартовый комплекс разработчика систем ЦОС. В приложении приведена система команд семейств DSP5600x и DSP5630x.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся проектированием систем ЦОС, а также студентов соответствующих специальностей технических университетов.



Пухальский Г. И.

Проектирование микропроцессорных систем: Учебное пособие для вузов. — СПб.: Политехника, 2001. — 544 с.: ил.

Изложены принципы работы микропроцессоров 8080, 8085, 8086/8088 и арифметического сопроцессора 8087. Подробно описаны программные методы ввода-вывода с кэшированием и без кэширования, по прерыванию и по прямому доступу к памяти. Приведено описание и применение БИС RAM, EPROM и FIFO различных зарубежных фирм а также интерфейсных БИС, разработанных фирмой Intel для аппаратной поддержки вышеперечисленных микропроцессоров. Рассмотрены методы обнаружения и исправления ошибок в оперативных запоминающих устройствах и приведены примеры их практической реализации.



Сизиков В. С.

Математические методы обработки результатов измерений: Учебник для вузов. — СПб.: Политехника, 2001. — 240 с.: ил.

Изложен ряд обратных прикладных задач: томографии, реконструкции изображений, спектроскопии, диагностики плазмы, обработки сигналов, биофизики, механики, редукции измерений к идеальному измерительному устройству (антенне, радиолокатору и т. д.) Дано физическое и математическое описание задач. Изложены некоторые сведения из линейной алгебры, метод наименьших квадратов Гаусса, метод псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза, преобразования Фурье, Хартли и Лапласа, элементы теории обобщенных функций, корректность и некорректность по Адамару, интерполяция, сглаживание, аппроксимация, сплайн-функции, а также устойчивые методы решения уравнений.

Для студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников, специализирующихся по методам обработки результатов измерений.



Ляликов А. П.

Трактат об искусстве изобретать. — СПб.: Политехника, 2002. — 416 с.: ил.

В книге изложены основные аспекты — философский, исторический, психологический, системный и эвристический — важнейшей отрасли общечеловеческой культуры, которая является источником и основой бытия, личного и социального, — технического творчества.

Книга предназначена для широкого круга читателей: от учащихся и студентов до умудренных жизнью и размышлениями о ее сущности специалистов, собирающихся изобретать, уже изобретающих и даже совсем никогда и ничего не изобретавших.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЕРСИЙ ОС LINUX

Н. В. Гуцалов,

аспирант

Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации РАН (СПИИРАН)

Параметры быстродействия относятся к ряду наиболее важных характеристик операционных систем реального времени (ОСРВ). В статье рассматриваются методы экспериментальной оценки быстродействия ОСРВ, приводятся результаты применения этих методов для оценки быстродействия версий ОС Linux, ориентированных на поддержку приложений реального времени. Рассматриваются принципы организации и систематизации измерений. Рассмотрение ведется с учетом рекомендаций стандарта POSIX, относящихся к экспериментальной оценке быстродействия ОС.

Системы реального времени (СРВ) имеют жесткие ограничения сроков выполнения заданий, реализуемых аппаратно-программными комплексами [1]. Отсюда вытекают специфические требования, предъявляемые к операционным системам реального времени (ОСРВ). Стандарт POSIX [ISO/IEC 9945-1: 1996] определяет ключевое свойство ОСРВ как способность операционной системы предоставить необходимый уровень сервиса при условии ограниченного, в смысле конкретного значения, времени отклика.

Операционные системы общего назначения (ОСОН) и, в частности, ОСОН Linux изначально разрабатывались без учета требований, предъявляемых к СРВ. Вместе с тем, в последнее время предпринимаются усилия по адаптации ОСОН к условиям работы в системах реального времени. Особое внимание привлекает появление версий ОС Linux, ориентированных на использование в СРВ. Это обусловлено следующими факторами:

- ОСОН Linux является свободнораспространяемой, что существенно сказывается на стоимости конечных устройств при использовании в них модификаций ОС Linux, поддерживающих задачи РВ;
- коды ядра ОС Linux открыты для модификации, что существенно упрощает адаптацию системы к конкретным нуждам;
- модификации ОС Linux для поддержки задач РВ совмещают в себе свойства ОСОН и ОСРВ, т. е. наряду с обеспечением временных ограничений, предъявляемых к системе, предоставляют широкий спектр библиотек и приложений, которые доступны для использования как в ходе разработки, так и в действующей системе;
- ОС Linux соответствует стандарту POSIX, что позволяет разрабатывать высококомбинированные приложения.

Наиболее перспективным методом адаптации ОС Linux к требованиям СРВ является оснащение базовой версии ОС Linux дополнительным ядром реального времени. Разработка такой двухъядерной ОС выполнена, в частности, в Миланском по-

литехническом институте: специальное ядро реального времени RTAI (Real-Time Application Interface) интегрировано с ядром Linux [2].

Для определения возможностей использования ОС Linux в качестве ОСРВ необходимо располагать оценками значений параметров быстродействия ОС. Наиболее надежным способом оценки быстродействия ОСРВ является проведение измерительных экспериментов. Ниже изложены методы экспериментальной оценки быстродействия, применявшиеся автором для получения параметров быстродействия RTAI, приводятся результаты измерений, сравниваются параметры быстродействия RTAI с аналогичными параметрами базовой версии ОС Linux.

Основные параметры быстродействия ОСРВ

Параметры быстродействия ОСРВ можно разделить на две группы:

- 1) характеристики реактивности;
- 2) характеристики производительности.

Параметры первой группы характеризуют скорость реакции системы на внутренние и внешние события. Параметры второй группы характеризуют эффективность реализации сервисных функций ОСРВ.

Реактивность ОСРВ характеризуется длительностью интервалов задержки реакции системы на возникновение внешних и внутрисистемных событий [3]. Внешние события регистрируются внешними устройствами и приводят к генерации сигналов внешних прерываний. Внутренние события фиксируются программно и могут привести к изменению системных состояний выполняемых задач.

Задержкой обработки прерывания называется время между появлением сигнала прерывания t_s на входе контроллера прерываний процессора и моментом t_a начала исполнения обработчика события, вызвавшего это прерывание (рис. 1) [4]. Ин-

тервал задержки обработки прерывания содержит четыре составляющих:

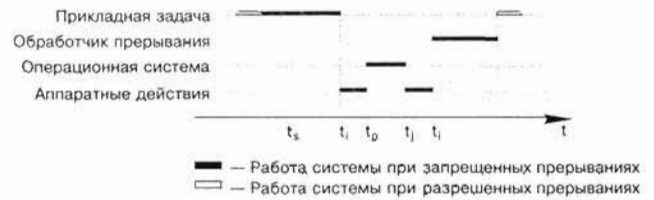
- 1) (t_s, t_i) — завершение действий ОС при запрещенных прерываниях;
- 2) (t_i, t_p) — аппаратные действия системы по сохранению контекста прерываемой программы и передаче управления обработчику прерывания;
- 3) (t_p, t_j) — регистрация прерывания и выполнение вспомогательных действий ОС;
- 4) (t_j, t_a) — аппаратные действия по передаче управления пользовательскому обработчику прерываний.

Составляющая (t_s, t_i) может отсутствовать в структуре задержки, если прерывание произошло во время работы системы при разблокированных прерываниях. Отметим однако, что величина максимальной задержки обработки прерывания в значительной мере зависит от максимальной возможной продолжительности интервала (t_s, t_i) .

Сохранение контекста процессора и передача управления аппаратно зарегистрированному обработчику прерываний реализованы на уровне микрокоманд процессора, поэтому продолжительность этих действий невелика и варьируется несущественно, но во время выполнения этих действий может иметь место промах в кэш. Практически все современные платформы имеют в своем составе несколько уровней кэш. Использование кэш значительно увеличивает среднее быстродействие системы, но когда в кэш возникает промах, время выполнения операции может быть значительно больше, чем в случае, когда кэш не используется. Это вызвано тем, что перед загрузкой в кэш требуемых данных необходимо сохранить в обычной памяти блок, вытесняемый из кэша. При этом, если в системе используется многоуровневый кэш, то в худшем случае может произойти цепочка промахов на всех уровнях кэш, что приведет к значительным задержкам. Для устранения этого эффекта применяются специальные приемы [5], например, часть кода ОС, используемая при обработке прерываний, блокируется в кэш-памяти. Но зависимость задержки от размера кода, заблокированного в кэш, достаточно сложная, а алгоритм выбора участков кода четко не регламентирован.

Регистрация прерывания операционной системой и передача управления пользовательскому обработчику прерываний имеет место в том случае, когда обработка прерываний производится операционной системой, и только после этого управление передается прикладному обработчику. Более подробно структура интервала задержки рассмотрена в [3].

Производительность системы характеризуется продолжительностью выполнения сервисных функций ОС. При подготовке измерений производительности системы целесообразно учитывать рекомендации стандарта POSIX, относящиеся к экспериментальной оценке ОС. В стандарте указано, что метрики, характеризующие быстродействие системы, должны содержать среднее значение и худший случай с условиями, в которых это значение получено. Набор условий определяется как использованная методология, аппаратная и программная конфигурация, параметры вызова, загрузка системы, начальные условия и другая информа-



■ Рис. 1. Структура интервала задержки обработки прерывания

ция, с помощью которой можно продублировать измерительный эксперимент. Для функций, время выполнения которых зависит от параметров вызова, необходимо указывать набор результатов с соответствующими параметрами вызова. Если значение может отклоняться от приведенного в документации, необходимо указывать условия, при которых будут наблюдаться эти отклонения.

В стандарте описываются метрики основных групп сервисов: обмен сигналами, синхронный ввод-вывод, асинхронный ввод-вывод, операции с семафорами, операции с мьютексами и условными переменными, доступ к виртуальной памяти процесса, заблокированной в ОЗУ, доступ к разделяемой памяти, планирование задач, часы и таймеры, передача сообщений, управление потоками, отмена потоков. Из этих групп сервисов особый интерес представляют операции с семафорами и планирование задач.

Операции с семафорами. В разделе содержится семь метрик: *освобождение семафора* (для условий: *нет ожидающих этого семафора, только низкоприоритетные задачи ожидают освобождения этого семафора, высокоприоритетная задача ожидает освобождения семафора*), *захват семафора* (для условий: *семафор свободен, семафор занят*) и *условный захват семафора* (для условий: *семафор свободен, семафор занят*).

Ниже приведены данные, характеризующие быстродействие ОС Linux, для трех типов параметров из рекомендованных стандартом: продолжительность захвата свободного семафора, продолжительность освобождения семафора при отсутствии ожидающих его освобождения, продолжительность захвата занятого семафора. Измерение продолжительности захвата занятого семафора в исследовании производится при различном количестве задач в очереди ожидания, что вызвано рекомендацией стандарта, относящейся к оценке производительности планировщика. В дополнении к рекомендованным метрикам указываются продолжительность создания и удаления семафора.

Планирование. Все метрики, характеризующие управление планированием, должны быть приведены для двух дисциплин планирования: SCHED_FIFO и SCHED_RR. При максимальном возможном количестве задач в системе больше 129 для однопроцессорной платформы измерительные эксперименты должны строиться для следующих количеств балластных процессов в дополнение к двум измерительным: 0, 1, 33, 65, 129. В качестве параметра производительности планировщика задач в исследовании используется время переключения контекста задачи.

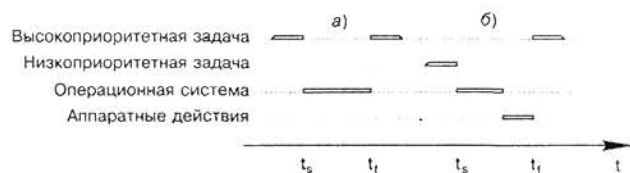
Методика измерений

Существует несколько способов организации измерений параметров быстродействия операционных систем. Часто для этих целей используется специальное оборудование, которое подключается к исследуемой платформе и протоколирует события, протекающие в системе, для последующей обработки. Основное преимущество данного способа состоит в том, что подобное оборудование является внешним по отношению к системе и не оказывает влияния на ее работу. К недостаткам использования специальной аппаратуры относятся высокая стоимость и трудоемкость освоения. Ниже рассматриваются программные методы измерений.

Производительность системы. Все сервисы ОС можно разделить на две большие группы: а) сервисы, выполнение которых не приводит к переключению контекста; б) сервисы, выполнение которых сопровождается переключением контекста. Способы измерения времени выполнения этих сервисов несколько отличаются друг от друга (рис. 2).

Метод измерения времени выполнения сервиса ОС состоит в следующем. Перед выполнением оцениваемого сервиса фиксируется момент времени t_s , а после завершения его выполнения — момент t_f . Тогда разность $(t_f - t_s)$ и будет определять время выполнения данного сервиса ОС. Отличие метода измерения состоит в том, что при оценке сервисов, не приводящих к переключению контекста, моменты начала и конца выполнения сервиса фиксируются одной измерительной задачей; в то время как при оценке сервисов, приводящих к переключению контекста, момент начала выполнения сервиса ОС фиксируется задачей, владеющей процессором к началу эксперимента, а момент окончания выполнения сервиса — задачей, получающей управление в результате его выполнения.

Так как в каждом отдельно взятом эксперименте условия проведения будут отличаться от других (состояние системы постоянно изменяется и воспроизвести его точно не представляется возможным), результаты различных экспериментов в общем случае будут отличаться друг от друга. Для получения достаточно объективной статистики необходимо провести серию экспериментов с тем, чтобы после проведения статистической обработки результатов получить представление о параметрах их распределения. Минимальное значение, полученное в ходе серии экспериментов, дает оценку времени выполнения сервиса в наиболее благоприятных условиях; среднее значение можно оценивать как наиболее вероятный случай, а максимальное время оценивает продолжительность выполнения сервиса в том случае, когда на результат оказывают влияние такие факторы, как поступ-



■ Рис. 2. Измерение времени выполнения сервисов ОС

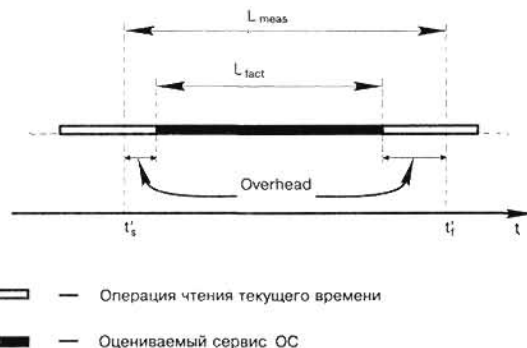
ление запроса на прерывание во время измерительного эксперимента, промах или цепочка промахов в кэш, конфликты доступа к памяти или шине, другие конфликты в системе. Максимальная продолжительность выполнения сервиса может определяться как каждым из этих факторов в отдельности, так и их сочетанием. При оценке производительности основной интерес представляет среднее значение как наиболее характерное.

Накладные расходы на регистрацию текущего времени. Рис. 2 соответствует случаю, когда измерительное приложение имеет возможность моментально получить значение текущего времени. В действительности операция получения текущего времени имеет определенную продолжительность (рис. 3).

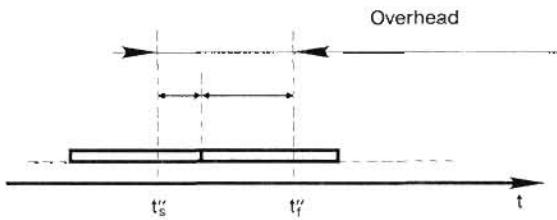
Полученное в ходе измерительного эксперимента значение разности $(t_f' - t_s')$ превышает действительное время выполнения сервиса ОС. Значение, возвращаемое функцией *дать_время*, соответствует неизвестной фазе операции чтения текущего времени. Поэтому в экспериментальных данных присутствует составляющая, равная сумме накладных расходов на регистрацию момента начала и конца эксперимента. Но необходимости вычислять эти накладные расходы по отдельности нет. Из рисунка видно, что сумма накладных расходов начала и конца эксперимента составляет продолжительность выполнения операции регистрации текущего времени. Для того чтобы оценить величину накладных расходов, достаточно провести следующий эксперимент (рис. 4).

Если двумя последовательными вызовами функции *дать_время* зафиксировать моменты времени t_s'' и t_f'' , их разность $(t_f'' - t_s'')$ будет составлять суммарные накладные расходы на регистрацию текущего времени. Так как при проведении эксперимента в этот интервал могут вмешиваться посторонние события, за оценку издержки измерений принимается минимум $\min\{t_f'' - t_s''\}$.

Оценка задержки реакции на внешние прерывания. Для оценки величины задержки обработки прерывания необходимо, чтобы были известны два момента времени: момент поступления запроса на обработку прерывания и момент активизации обработчика прерывания. Если момент активизации обработчика прерываний фиксируется первой операцией, выполняемой измерительным обработчиком, то истинный момент поступления запроса на обработку прерывания без применения специальных аппаратных средств точно зафик-



■ Рис. 3. Ошибка измерений



■ Рис. 4. Измерение издержки

сировать невозможно. Но этот момент можно предсказать с достаточно высокой точностью, если в качестве источника измерительных прерываний использовать независимый периодический таймер, обеспечивающий генерацию запросов прерывания с заданной частотой. Независимость измерительного таймера понимается в том смысле, что он не должен использоваться операционной системой во избежание нежелательной синхронизации действий операционной системы и измерительного приложения. Такой независимый таймер имеется в составе большинства аппаратных платформ, используемых в СРВ. Тогда измерительный эксперимент будет выглядеть так, как показано на рис. 5.

Специфическими являются моменты времени:

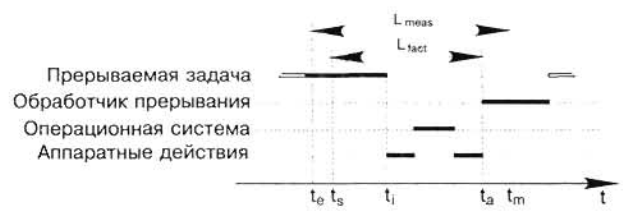
- t_e — ожидаемое время прихода запроса на прерывание;
- t_m — измеренное значение времени активизации обработчика.

Если запрос на прерывание поступает в момент, когда прерывания разрешены, отрезок (t_s t_i) является вырожденным.

Ошибкой измерений является сумма отрезков (t_e t_s) и (t_a t_m) с учетом знаков (прерывание может произойти как раньше предполагаемого момента времени, так и позже). Различие между истинным моментом t_a активизации обработчика прерываний и величиной t_m , полученной в результате измерения, обусловлено затратами на считывание времени. Разность $|t_s - t_e|$ обусловлена в том числе относительным дрейфом частот генератора измерительных прерываний и генератора тактов процессора. Если стабильность генераторов не хуже, чем 10^{-4} , то для того, чтобы эта разность не превышала десятой доли микросекунды, достаточно один раз в миллисекунду уточнять привязку фазы периодических измерительных прерываний к источнику измерительной информации. Вместе с тем, существует способ оценки максимальной задержки, не требующий таких уточнений. Этот способ наряду с другими особенностями измерений задержки обработки прерываний подробно описан в [3].

Значения параметров быстродействия версий ОС Linux

Описанные выше методы были применены для оценки быстродействия версий ОС Linux, ориентированных на поддержку задач реального времени, а также (для сравнения) оценки быстродействия базовой версии ОС Linux. В качестве ОС реального времени были выбраны разработки, опирающиеся на упоминавшиеся выше ядра реального времени RTAI. Эти разработки представляют собой совокупность ядра реального времени и «заплат-



■ Рис. 5. Измерение задержки обработки прерывания

ки» для ядра базовой версии ОС Linux. Модифицированное ядро базовой версии ОС Linux вместе с ядром реального времени составляет двухъядерную операционную систему [2]. Ядро Linux в такой системе работает как задача ядра РВ с наименьшим приоритетом — когда в подсистеме РВ нет других, готовых к исполнению задач, управление получает ядро Linux. Взаимодействие подсистем осуществляется посредством механизмов очереди сообщений и разделяемой памяти. Такая архитектура позволяет конструировать системы взаимодействующих задач, часть из которых, имеющая ограничения на сроки выполнения, работает в подсистеме РВ, а задачи, не имеющие ограничений на сроки выполнения и использующие сервисы ядра базовой версии ОС Linux, работают под управлением Linux.

Для сравнения взяты две версии данной системы: RTAI-22.2.4 и RTAI-24.1.8. Первая версия была разработана в 2000 г. и предназначалась для ядра Linux 2.2.16. Вторая (вышла полтора года спустя) предназначена для работы с ядром Linux 2.4.17. За это время архитектура системы была усовершенствована, и сравнение значений параметров быстродействия показывает, как эволюция архитектуры RTAI улучшила временные характеристики системы.

Условия проведения экспериментов. Измерения производились на персональном компьютере Compaq Deskpro EN на базе процессора Intel Pentium II 266 MHz под управлением операционной системы RedHat Linux 7.2 с ядрами 2.2.16 и 2.4.17 соответственно. В качестве источника информации о текущем времени использовался регистр TSC (Time Stamp Counter), который присутствует во всех процессорах Pentium и представляет собой счетчик тактов процессора. Источником измерительных прерываний является RTC (Real-Time Clock) — внешний по отношению к процессору таймер, настроенный на генерацию прерываний с частотой 8192 Гц. Для измерения задержки обработки прерываний использовалась техника измерений с неизвестной фазой измерительных прерываний, описанная выше. Измерения задержки обработки прерываний выполнялись для трех вариантов загрузки системы:

- 1) минимальная нагрузка (задача ядра реального времени, исполняющая пустой цикл, блокирует активность Linux);
- 2) драйверы Linux (поиском утилитой badblocks поврежденных секторов на флоппи-диске; измерительное приложение запускается спустя 5 с после начала работы badblocks);
- 3) задачи реального времени (200 активно взаимодействующих между собой задач ядра реального времени).

■ **Таблица 1.** Результаты измерения задержки обработки прерываний

Нагрузка	Ядро		
	RTAI-22.2.4	RTAI-24.1.8	Linux-2.2.15
Минимальная нагрузка	6,0	5,1	12,6
Драйверы Linux	16,5	9,7	481,5
Задачи реального времени	30,5	9,2	105,5

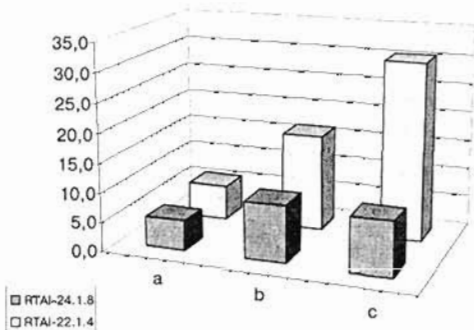
Для оценки параметров быстродействия рассматриваемых версий ОС использовались идентичные измерительные приложения.

Задержка обработки прерываний. В табл. 1 представлены значения задержек обработки прерываний для обеих версий RTAI с тремя видами нагрузок.

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, несмотря на то, что принцип взаимодействия ядра Linux с ядром реального времени остался без изменений, из-за модификации самого ядра Linux максимальная задержка при нагрузке Linux значительно снизилась. Во-вторых, максимальная задержка обработки прерывания при нагрузке в виде задач реального времени снизилась более чем в три раза. Это объясняется тем, что планировщик RTAI претерпел серьезную модификацию, что привело к значительному сокращению продолжительности промежутков работы системы при запрещенных прерываниях. В версии RTAI-22.2.4 планировщик реального времени хранил все задачи, независимо от их состояния, в едином неупорядоченном по приоритетам списке. Каждый раз при выборе задачи, которой должно быть передано управление, планировщик просматривал весь список задач. Поэтому время перепланирования тем больше, чем больше задач находится в системе. А так как перепланирование происходит при запрещенных прерываниях, подобная организация влияет не только на время переключения контекста (см. ниже), но и на задержку обработки прерываний.

Эффект от усовершенствования архитектуры планировщика задач реального времени наглядно представлен на рис. 6.

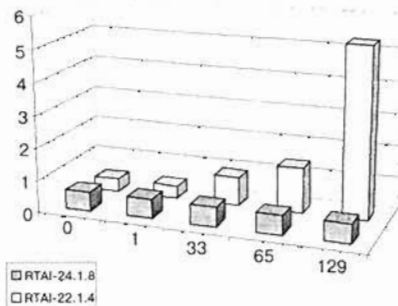
Переключение контекста. Особенности архитектуры планировщика непосредственно влияют на длительность переключения контекста задачи. По



■ **Рис. 6.** Максимальные значения задержки обработки прерываний

■ **Таблица 2.** Затраты процессорного времени на переключение контекста задачи

Количество балластных задач	Ядро		
	RTAI-22.2.4	RTAI-24.1.8	Linux-2.2.15
0	0,4	0,6	05,0
1	0,4	0,6	05,1
33	0,9	0,6	12,4
65	1,4	0,6	26,5
129	5,3	0,6	61,5



■ **Рис. 7.** Зависимость среднего времени переключения контекста от количества задач в системе

тем же причинам, что и в случае с обработкой прерываний, среднее время переключения контекста в версии RTAI-22.2.4 тем больше, чем больше задач находится в системе (табл. 2 и рис. 7).

Из таблицы и диаграммы видно, что в версии RTAI-24.1.8 зависимость времени переключения контекста от количества задач в системе устранена.

Семафорные операции. Затраты на выполнение семафорных операций для версий RTAI-22.2.4 и RTAI-24.1.8 приведены в табл. 3.

Полученные результаты закономерны: при том, что издержки на выполнение сервисов ОС, которые не вызывают переключения контекста, в оцениваемых версиях RTAI практически не различаются, издержки на исполнение функций ОС, приводящих к переключению контекста (к которым и относится захват занятого семафора, так как задача в этом случае блокируется в очереди ожидания

■ **Таблица 3.** Затраты процессорного времени на выполнение семафорных операций

Операция	Ядро			
	RTAI-22.2.4	RTAI-24.1.8	Linux-2.2.15	
Создание семафора	0,1	0,2	2,8	
Удаление семафора	0,2	0,2	2,4	
Захват свободного семафора	0,3	0,3	2,4	
Освобождение семафора (без ожидающих)	0,2	0,3	2,4	
Захват занятого семафора	Длина очереди	0	0,8	0,7
		1	0,9	0,7
		33	1,5	0,7
		65	1,9	0,7
		129	3,4	0,7

семафора), в версии RTAI-22.2.4 зависят от числа балластных задач.

Примечательно, что одно и то же свойство ОС (отсутствие упорядоченного списка готовых задач) проявляется в трех разных типах характеристик быстродействия системы.

Заключение

Применение описанных методов измерения параметров быстродействия ОС позволяет оценивать временные характеристики ОСРВ, которые предоставляют возможность проводить сравнительную оценку быстродействия различных модификаций ОС Linux с целью поддержки задач РВ. Как показано выше, построение двухъядерной ОСРВ на базе ОС Linux позволяет добиться значительного улучшения характеристик системы по сравнению с базовой версией ОС Linux. Заметим, однако, что базовая версия ОС Linux разрабатывалась для решения задач, не связанных с требованиями реального времени, поэтому ее сравнительно невысокое быстродействие не следует расценивать как показатель низкого качества системы. Вместе с тем, приведенные выше результаты показывают, что использование дополнительного ядра реального времени позволяет добиться значительного улучшения характеристик быстродействия ОС

для задач, которые не нуждаются в полном наборе сервисов, предоставляемых ядром Linux, но жестко ограничены по срокам выполнения. Сочетая в себе эти качества, модификации ОС Linux позволяют строить программные системы, требующие функциональности полноценной ОС, с одной стороны, и отвечающие требованиям реального времени, с другой. Такое сочетание открывает возможность использования ОС Linux в системах, которые ранее могли работать только под управлением специализированных ОСРВ.

Литература

1. **Kopetz H.** Real-Time Systems. Design Principles for Distributed Embedded Applications. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
2. **Cloutier P., Mantegazza P., Papacharalambous S., Soanes I., Hughes S.** DIAPM-RTAI position paper. (<http://www.rtai.org>).
3. **Никифоров В. В., Гуцалов Н. В.** Методы измерения реактивности систем реального времени // Программные продукты и системы. — 2001. — № 4.
4. **Straumann T.**, Open Source Real Time Operating Systems Overview. (<http://www.slac.stanford.edu/econf/C011127/WEB1001.pdf>).
5. **Dejan Bucar** Reducing Interrupt Latency using the Cache, Royal Institute of Technology. — Sweden. — 2001.

УДК 681.325.5

ПРИМЕНЕНИЕ ШИНЫ CAN-BUS В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

С. Т. Хвоц,

д-р техн. наук

А. В. Луковкин,

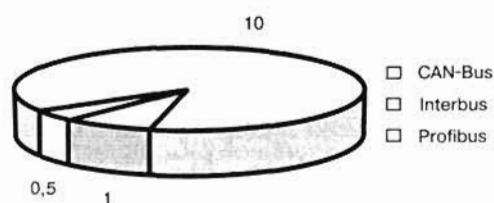
инженер

А. Г. Лютов,

инженер

ЗАО «Электронная компания «ЭЛКУС»

Рассматриваются характеристики типовых, серийно выпускаемых CAN-узлов для реализации систем реального времени, в том числе бортовых с распределенным энергоснабжением, а также встраиваемых. Рассматриваются и описываются аппаратные средства сопряжения интерфейса CAN с MIL-STD-1553B и другими специализированными шинами и магистралями информационно-управляющих систем.



■ Рис. 1. Соотношение количества проданных устройств со встроенными средствами подключения к сетевым протоколам в промышленной автоматике (млн шт.)

В настоящее время CAN-интерфейс широко применяется во многих информационно-управляющих системах, в том числе аэрокосмического профиля, требующих обеспечения сбора и обработки информации в реальном масштабе времени. Как показывает практика, в аэрокосмической области CAN-интерфейс (или CAN-Bus) чаще всего используется как связующее звено между центральной магистралью (обычно MIL-STD-1553B) и множеством вспомогательных датчиков, исполнительных механизмов и т. п., подключение которых к центральной магистрали не всегда целесообразно.

Протокол CAN, разработанный фирмой Bosch, изначально проектировался для нужд автомобильной промышленности. Однако с развитием электронной промышленности автомобиль стал представлять собой сложную систему, датчики и механизмы которой необходимо объединить в сеть, учитывая при этом, что сам автомобиль является источником различного рода серьезных помех и эксплуатируется в различных, порой крайне неблагоприятных для электроники погодных условиях. В результате в 1991 г. появилась CAN-спецификация фирмы Bosch, представленная на текущий момент последней версией 2.0.

Разработанный протокол оказался настолько удачным, что в настоящее время не только применяется в автомобильной отрасли, но и получил широкое распространение в информационно-управляющих системах промышленной автоматизации, в робототехнике, аэрокосмической и многих других отраслях. Представленное на рис. 1 соотношение количества проданных устройств со встроенными средствами подключения к сетевым протоколам в промышленной автоматике отражает популярность CAN-Bus, заключающуюся, в основном, в преимуществе его основных технических характеристик.

Основные характеристики CAN-Bus

На этапе проектирования выбор основных решений относительно организации информационно-управляющей системы во многом определяет конечные ее параметры. Ввиду предпочтений разработчиков, отдаваемых сетевому протоколу CAN-Bus и многообразию встраиваемых средств его поддержки, рассмотрим его основные характеристики.

Максимальная скорость передачи по CAN-Bus составляет 1 Мбит/с при длине линии до 40 м или 40 Кбит/с при длине линии 1000 м. При этом прак-

тически любой CAN-контроллер допускает программирование скорости обмена от 1 Мбит/с до 10 Кбит/с. График зависимости скорости обмена от длины линии передачи представлен на рис. 2, откуда следует, что для локальных (по геометрии) информационно-управляющих систем обеспечивается высокая постоянная скорость обмена данными.

Арбитраж в CAN-Bus организован таким образом, что не увеличивает время реакции системы на более приоритетные сообщения, что важно при построении систем реального времени.

Отсутствие ограничения в протоколе на количество CAN-узлов позволяет интегрировать в системы практически любое необходимое количество устройств, датчиков, исполнительных механизмов. Сообщения могут передаваться одному или одновременно нескольким узлам, настроенным на прием одних и тех же параметров. Адресная информация (номер параметра) содержится в сообщении и совмещена с его приоритетом. Количество байтов данных является настраиваемой величиной и изменяется в пределах от нуля до восьми.

В части реализации требований к надежности проектируемых на основе CAN-Bus информационно-управляющих систем, спецификацией на интерфейс предусмотрены:

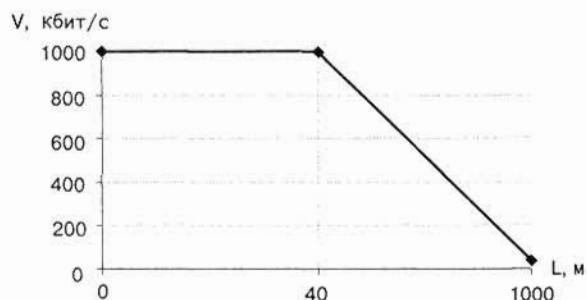
- динамическое отключение от шины отказавших узлов;
- признание сообщения ошибочным для всех узлов сети, которым оно адресовалось, если хотя бы один из них принял это сообщение с ошибкой;
- осуществление подавления синфазных помех дифференциальным приемопередатчиком.

Используются стандарты: ISO-DIS 11898 — для высокоскоростных и ISO-DIS 11519-1 — для низкоскоростных приложений.

При организации среды распространения сигналов рекомендуется делать шлейфы минимальной длины (обычно реализация отводов производится непосредственно на разъемах подключения абонентов).

На рис. 3 приведен пример организации сети с тремя наиболее типичными структурами CAN-узла:

- 1) микроконтроллер (со встроенным CAN-контроллером) + CAN-трансивер;
- 2) микроконтроллер (без встроенного CAN-контроллера) + внешний CAN-контроллер + CAN-трансивер;
- 3) CAN-контроллер + CAN-трансивер.



■ Рис. 2. График зависимости скорости обмена по CAN-Bus от длины линии передачи

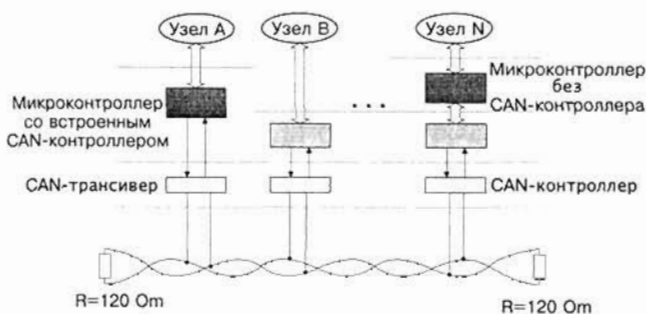
Первая и вторая структуры применяются в так называемых модулях с «интеллектом». Такие модули имеют в своем составе микроконтроллер, осуществляющий, например, сбор и предварительную обработку данных с датчиков и способный самостоятельно передать эти данные и результаты несложных вычислений по CAN-Bus. Третья структура используется для плат без «интеллекта», в которых обмен данными невозможен без управления CAN-контроллером извне.

Среда передачи данных в CAN-спецификации не определена. Понятно, что помехоустойчивость обмена по шине повышается при использовании терминального сопротивления R , выбираемого в зависимости от типа шины. Как видно из приведенной на рис. 4 диаграммы, наилучшая помехозащищенность достигается при использовании экранированной витой пары с волновым сопротивлением 120 Ом.

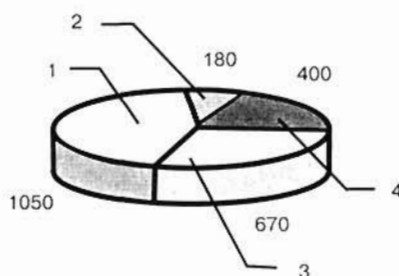
Популярность и широкое применение CAN-Bus привели к тому, что на сегодняшний день все ведущие мировые производители электронных компонентов для построения информационно-управляющих систем, а именно Intel, Philips, Siemens, Motorola и многие другие, уже выпускают широкий спектр микросхем для организации обмена данными по протоколу CAN. Спектр выпускаемой продукции действительно очень широк — от простейших CAN-контроллеров с одним буфером на передачу и двумя на прием до мощных 16-разрядных микроконтроллеров со встроенным (а иногда и не одним) CAN-контроллером.

Обзор продукции только одного из основных производителей, фирмы Infineon (Siemens), показывает, что сегодня разработчикам предлагается целый спектр микросхем для построения информационно-управляющих систем на основе протокола CAN. Это простейшие CAN-контроллеры SAE81C90 и SAE81C91, ориентированные на подключение к микроконтроллерам семейства C500 (8-разрядные) или C166 (16-разрядные) фирмы Infineon (хотя в простейшем случае наличие микроконтроллера не обязательно).

Микроконтроллеры семейства C500 (C505C, C505CA, C515C), являющиеся развитием семейства 8-разрядных микроконтроллеров MCS51 фирмы Intel, имеют встроенный CAN-контроллер, включающий 15 буферов для обмена данными. 14 буферов настраиваются на прием или передачу дан-



■ Рис. 3. Возможные способы организации сети на основе CAN-Bus



■ Рис. 4. Число искаженных кадров (на 20 000 переданных сообщений) при использовании различных сред передачи информации:

1 — неэкранированный параллельный кабель; 2 — экранированная витая пара; 3 — неэкранированная витая пара; 4 — параллельный экранированный кабель

ных, а один буфер работает только на прием данных.

Микроконтроллеры семейства C166 (C164C, C167CR, C167CS) — высокопроизводительные 16-разрядные RISC-микроконтроллеры — также оснащены модулями CAN-Bus. Наиболее мощный на сегодняшний день микроконтроллер этого семейства C167CS-LM имеет два встроенных CAN-контроллера, каждый из которых включает 15 буферов (14 для приема/передачи данных и один только для приема).

В настоящее время «Электронная компания «ЭЛКУС»», отечественный производитель электронного оборудования для построения информационно-управляющих систем различного назначения, производит несколько серий плат с рассматриваемым CAN-интерфейсом. Основные их параметры приведены в таблице.

Самые простые — платы серии CAN-200. Изделия этой серии не имеют «интеллекта» и предназначены для создания простейших CAN-узлов, которые используются для работы в системах без интенсивного обмена данными. Для построения более сложных систем предназначена серия плат CAN-505, которые уже содержат 8-разрядный микроконтроллер C505C фирмы Infineon, полностью совместимый с семейством микроконтроллеров MCS-51 фирмы Intel. Плата CAN-505PC104 является улучшенной модификацией плат CAN-505MP и CAN-505PC. Поэтому в приведенной таблице ее характеристики представлены отдельно.

Сопряжение интерфейсов CAN и MIL-STD-1553B

CAN-интерфейс чаще всего используется как связующее звено между центральной магистралью и множеством вспомогательных датчиков. В связи с этим возникает вопрос о сопряжении магистрали обмена по протоколу CAN с другими специализированными шинами и магистралями информационно-управляющих систем. В первую очередь возникает необходимость сопряжения интерфейса CAN с широко применяемым в нашей стране и за рубежом мультиплексным каналом MIL-STD-1553B (ГОСТ 26765.52-87).

Одной из последних разработок «Электронной компании «ЭЛКУС»» является модуль C167-3U, основ-

■ Таблица. Основные параметры CAN-плат производства ЗАО «ЭЛКУС»*

Характеристика	CAN-200PC CAN-200MP CAN-200PC104	CAN-505PC CAN-505MP	CAN-505-6U	CAN-505PC104	C167-3U
Число CAN-каналов	2	2	4	1	2
Максимальная скорость обмена по CAN	1 Mbit/s	1 Mbit/s	1 Mbit/s	1 Mbit/s	1 Mbit/s
Гальваническая развязка от шины CAN	+	+	+	+	+
Центральное вычислительное ядро	—	2 × C505CA	4 × C505CA	C505CA	C167CS-LM
CAN-контроллер	2 × 82C200	Встроенный	Встроенный	Встроенный	Встроенный
CAN-трансивер	2 × 82C250	2 × 82C250	4 × 82C250	82C250	2 × 82C250
Интерфейс RS232	—	—	+	+	+
Шина	ISA 8	ISA 8	VME	ISA 8	—
Число занимаемых портов ввода/вывода	32	8	64	4	—
Память программ	—	8Кб ПЗУ (EPROM) + 24Кб ОЗУ	32Кб ПЗУ (FLASH) + 32Кб ОЗУ или 64Кб ПЗУ (FLASH)	32Кб ПЗУ (FLASH) + 32Кб ОЗУ или 64Кб ПЗУ (FLASH)	256Кб ПЗУ (FLASH) + 256Кб ОЗУ
Память данных	—	32Кб ОЗУ	32Кб ОЗУ	32Кб ОЗУ	
Диапазон температур	-40 + +85 °С	-40 + +85 °С	-40 + +85 °С	-40 + +85 °С	-40 + +85 °С
Конструктив	PC, MicroPC, PC 104	PC, MicroPC	Евромеханика	PC104	Евромеханика 3U
Дополнительные характеристики	—	—	64-разрядный регистр разовых команд	—	MIL-STD-1553B (оконечное устройство), питание +27 В, RTC, АЦП

* Фото плат CAN-200PC, CAN-505PC104, CAN-505-6U, C167-3U представлены на обложке журнала.

ное назначение которого — сопряжение интерфейса CAN с указанным мультиплексным каналом.

На рис. 5 представлена упрощенная структурная схема преобразования CAN ↔ MIL-STD-1553B. Для примера показан случай с двумя CAN-каналами и одним мультиплексным каналом.

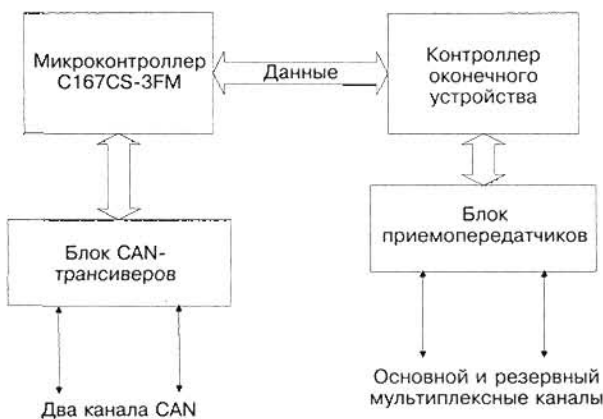
Контроллер оконечного устройства, предназначенный для подключения шины к микроконтроллеру или простейшим устройствам (регистрам и т. д.), разработан на основе микросхемы программиру-

емой логики фирмы XILINX. Непосредственно преобразование данных осуществляется программно 16-разрядным высокопроизводительным микроконтроллером. Дать какие-либо рекомендации по выбору алгоритма преобразования достаточно трудно, так как устоявшегося на сегодняшний день алгоритма преобразования нет, а его структура в значительной степени зависит от требований к конкретным проектируемым информационно-управляющим системам.

Питание модуля осуществляется от одного источника +27 В. Реализация поддержки удаленного включения/выключения питания модуля делает его идеальным для применения в различных бортовых системах с распределенной системой энергоснабжения.

Кроме приведенных в таблице отметим следующие характеристики модуля C167-3U:

- наличие гальванических развязок от шины CAN и интерфейса RS-232 (напряжение изоляции 1000 В) и от линии питания +27 В (напряжение изоляции — 1500 В);
- возможность программного изменения скорости передачи;
- возможность подключения согласующего сопротивления 120 Ом, в случае, если устройство расположено в конце линии;
- наличие стартового (Bootstrap loader) загрузчика, позволяющего загружать программу по интерфейсу RS-232 в память контроллера (ОЗУ или FLASH память);
- реализация функций оконечного устройства для резервированного мультиплексного канала по ГОСТ 26765.52-87.



■ Рис. 5. Структура устройства для сопряжения интерфейса CAN и мультиплексного канала MIL-STD-1553B

Указанные характеристики, а также наличие в составе модуля 16-разрядного высокопроизводительного RISC-микроконтроллера и возможность удаленного включения/выключения питания делают привлекательным его для применения в составе систем реального времени самого разнообразного назначения, в том числе и для встраиваемых приложений.

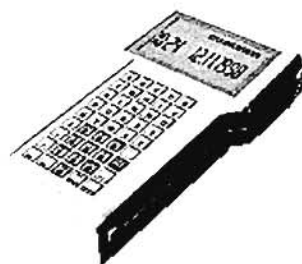
Вспомогательные средства контроля и отладки систем на основе CAN-Bus

В настоящее время (июнь 2002 г.) для поддержки разработок информационно-управляющих систем (для их контроля и отладки) на основе рассмотренных выше интерфейсных модулей предлагается переносной прибор, представленный на рис. 6.

Основные характеристики прибора следующие.

Прибор построен на базе 16-разрядного RISC-микроконтроллера C167CS-LM и имеет два канала обмена данными по протоколу CAN v2.0 (part B-active) с максимальной скоростью передачи данных 1 Мбит/с. Стартовый загрузчик позволяет загружать в память контроллера программу по интерфейсу RS-232. Память — 1 Мб – 256 Кб FLASH (организация 128К×16) и 768 Кб ОЗУ (3 банка по 128К×16). Имеются часы реального времени (RTC), выполненные на DS1305.

Гальванически прибор развязан с шиной CAN (напряжение изоляции 1000 В), с интерфейсом



■ Рис. 6. Внешний вид переносного прибора для контроля и отладки систем на основе CAN-Bus

RS-232 (напряжение изоляции 1000 В). Имеется возможность подключения согласующего сопротивления 120 Ом.

Прибором аппаратно выполняется мониторинг всех напряжений питания, которое может осуществляться как от аккумуляторов, так и от внешнего источника.

Управление прибором осуществляется с помощью 45-кнопочной мембранной клавиатуры, отображение информации осуществляется на LCD-дисплее разрешением 160×80 точек с возможностью подсветки.

Прибор выполнен в пыле- и влагозащитном корпусе Arteb-865 фирмы Vorla с габаритами 240×120×40 мм. Рабочий температурный диапазон: -10 °С ... +70 °С. Степень защиты — до IP65.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИТЕХНИКА» ВЫПУСКАЕТ В СВЕТ

Астапкович А. М.

МИКРООПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Книга посвящена проблеме разработки программного обеспечения для многоканальных систем управления реального времени, ориентированных на применение во встраиваемых приложениях. Отличительной особенностью этого класса систем управления является их закрытость от возможности изменения алгоритма управления в процессе эксплуатации системы и требование к возможности функционирования устройств в необслуживаемом режиме в течение длительных интервалов времени.

Монография содержит системный анализ ситуации, сложившейся в этой области, с целью выработки практически значимых рекомендаций для инженеров-разработчиков. Базовой направленностью монографии являлась разработка основ теории операционных систем реального времени, применительно к классу встраиваемых многоканальных систем программного управления реального времени, которые получили название микрооперационные системы. Анализ существующего положения дел проводится по нескольким направлениям, каждому из которых посвящена отдельная глава.

Книга адресована прикладным программистам и инженерам-разработчикам микропроцессорных систем программного управления, научным работникам соответствующего направления, а также менеджерам проектов в области электронного инжиниринга.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

И. Л. Ерош,

д-р техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)

Рассмотрена проблема защиты информации в распределенных системах контроля и управления. В этих задачах число объектов контроля и управления может составлять сотни тысяч единиц, а в перспективе — и миллионы. Отмечено, что классические криптосистемы в таких применениях обладают рядом недостатков из-за своей сложности и не обеспечивают реального масштаба времени. Обсуждается вопрос использования простых методов защиты, основанных на преобразовании управляющих, контролирующих и ответных сигналов с помощью булевых преобразований. Отмечается преимущество такого подхода в ряде перспективных приложений.

Историческая справка

В начале 70-х годов прошлого века среди программистов была популярна игра «Жизнь». В этой игре к элементам двоичной матрицы A размера $n \times n$ применялась некоторая функция F , с помощью которой строилась матрица B того же размера. Чаще всего в таких преобразованиях использовалась функция американского математика Конвея [1]. Функция Конвея задавалась следующим образом. Каждый элемент b_{ij} матрицы B являлся результатом применения функции Конвея к соответствующим элементам a_{ij} матрицы A и некоторым элементам из ближайшего окружения a_{ij} . Так, если $a_{ij} = 0$, то и $b_{ij} = 0$. Если же $a_{ij} = 1$, то $b_{ij} = 1$, если в ближайшем окружении a_{ij} ровно два или три элемента принимали значение 1, в противном случае $b_{ij} = 0$. Применение такого преобразования с функцией Конвея приводило к удивительным преобразованиям двоичных изображений: изображения смещались, вращались, расплались на несколько новых конфигураций, частично стирались и т. п. В одном из университетов Англии в качестве исходного изображения (матрицы A) было взято изображение, отдаленно напоминающее мордочку кота и названное «Чеширским котом» [1]. Применяя многократно преобразование с функцией Конвея к изображению «Чеширского кота», авторы получили ряд картин, которые можно было интерпретировать как пропадание изображения кота, — оно превращалось в изображение, похожее на «улыбку» (вспомните сказку Л. Кэрролла «Алиса в стране чудес» и то, как кот уходил, оставляя на некоторое время в комнате свою улыбку). При очередном применении преобразования с функцией Конвея «улыбка» превращалась в устойчивую конфигурацию «лапка». Дальнейшее применение преобразований с функцией Конвея уже не меняло изображение «лапки».

В эти же годы автор активно занимался автоматизацией технологических операций на различных производствах: фарфорофаянсовом заводе,

хлебозаводах, птицефабриках, приборостроительных производствах, автомобильных и тракторных производствах. На всех этих предприятиях при внедрении роботехнических комплексов с простейшим техническим зрением или осязанием требовалось решать задачи обработки двухградационных изображений с целью учета продукции на конвейерах, сортировки по размерам и форме, автоматического адресования, изменения программ обработки, в частности, окраски, сварки и т. п. Именно тогда родилась идея найти булеву функцию F , которая при применении к «лапке» строила бы изображение «улыбки» и через все промежуточные изображения восстанавливала бы изображение «Чеширского кота». Такая функция была найдена, но для ее построения автору пришлось минимизировать булевы функции примерно 100 аргументов (ручным способом). Обобщив результаты по булевым преобразованиям двухградационных изображений, автор сформулировал и доказал теорему о существовании булевых функций, обеспечивающих произвольные заданные преобразования дискретных двухградационных изображений [1].

В 2001 г. при написании учебного пособия по булевой алгебре и комбинационным схемам [2] автор применил тот же метод для преобразования двоичных последовательностей. Двоичная последовательность $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ строится из двоичной последовательности $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ следующим образом. Каждый элемент b_i является результатом применения некоторой булевой функции F к элементу a_i и некоторым элементам из «окружения» a_i (слева и справа).

Пример 1. Пусть $A = 1011$. Возьмем в качестве F следующую функцию:

$$F = \neg a_{i-1} * a_i \vee \neg a_{i+2},$$

т. е. каждый элемент b_i последовательности B получается как конъюнкция инвертированного элемента, стоящего слева от a_i , и элемента a_i и дизъюнкция к полученному значению инвертированного элемента, стоящего справа через элемент от

a_j . Удобно такую функцию записать в виде: $F = \lceil -1 * 0 \vee \rceil 2$. Результат применения такой функции к последовательности A дает последовательность $B = 1010$. Предполагается, что слева и справа от последовательности A стоят нули.

Теперь поставим задачу иначе. Пусть заданы две последовательности A и B одинаковой длины n . Нужно найти булеву функцию F , которая при применении к A строит B . В [2] обоснована процедура построения таблицы истинности такой функции. Первая строка содержит последовательность A , вторая — ту же последовательность A , сдвинутую влево на один разряд, третья — на два разряда и т. д. Всего в таблице истинности n строк. Каждой строке приписываются значения элементов последовательности B . Так, для рассмотренного выше примера получаем таблицу истинности:

-3	-2	-1	0	1	2	3	F
0	0	0	1	0	1	1	1
0	0	1	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	0	0	0	0

В качестве аргументов такой булевой функции берем элемент сдвинутый влево на 3 разряда (-3) от исходного (0), на 2 разряда влево (-2) и т. д. до элемента, сдвинутого от исходного на 3 разряда вправо (3). Всего для данного примера окажется 7 аргументов. В общем случае при длине последовательности n число аргументов равно $N = 2n - 1$. Функция N аргументов должна задаваться на 2^N наборах. Однако она задается всего на n наборах. На остальных наборах функция не определена. Число таких наборов равно $K = 2^N - n$. Следовательно, доопределить функцию можно 2^K способами. В примере при $n = 4$, $N = 7$ функция семи аргументов задавалась на четырех наборах, следовательно, на остальных $2^7 - 4 = 124$ наборах функция не определена и может быть доопределена 2^{124} способами. При грубой оценке $2^{10} > 10^3$ число способов доопределения функции превышает $16 * 10^{36}$. Следует заметить, что при любом способе доопределения последовательности $A = 1011$ функцией F будет преобразована в последовательность $B = 1010$. Из таблицы истинности легко увидеть, что функция $F = \lceil -1$ также преобразует заданную последовательность A в B .

В [2] доказана теорема о существовании булевых функций, преобразующих заданное множество последовательностей A_i в множество последовательностей B_j , и определены требования, которым должны удовлетворять последовательности A_i (они не должны быть связаны сдвигом). Неоднозначность доопределения функции F , которую можно оценить величиной 2^K ($K = 2^N - n$, $N = 2n - 1$), исключительно быстро растет с ростом длины n , что позволило автору надеяться на возможное использование булевых преобразований при решении задач защиты информации от несанкционированного доступа.

Возможные применения

В настоящее время ведутся широкие исследования в области создания информационно-управляющих комплексов для сбора информации и уп-

равления автоматическими роботами-разведчиками (дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами — ДПЛА) [3, 5]. Передача информации выполняется как по радиорелейным линиям, так и по локальным и глобальным сетям, включая Internet. В связи с этим важными проблемами становятся унификация и учет особенностей применения средств защиты информации от перехвата и незаконного использования в конкретных приложениях. Существующие симметричные и несимметричные криптографические системы позволяют решать часть задач защиты информации, однако при существенном увеличении числа управляемых объектов возникают сложности с присвоением проверяемых паролей, защитой сигналов управления от намеренного искажения. Так, в некоторых случаях «перехватчик» может осуществлять наблюдение за ДПЛА и пытаться сопоставить передаваемые команды управления и маневры аппарата. Для обеспечения непредсказуемости поведения ДПЛА в этих случаях целесообразно каждому сигналу управления сопоставлять большое число передаваемых команд, которые могут быть расшифрованы только средствами, находящимися в распоряжении ДПЛА.

Другой широкой областью применения средств защиты информации является использование Internet для управления разнообразной бытовой техникой [4]. Как и в предыдущем случае, возможны перехват и намеренное искажение как управляющих сигналов, так и сигналов состояния управляемых объектов.

В некоторой степени эти проблемы могут быть решены с помощью применения булевых преобразований передаваемых сигналов.

В работе [2] рассмотрена задача построения булевой функции F , которая преобразует любую двоичную n -разрядную последовательность A_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) множества последовательностей A в соответствующую последовательность B_j множества последовательностей B . Было показано, что если в множестве A нет последовательностей, связанных сдвигом, то такая функция всегда существует. Элементы последовательности B_j получались булевым преобразованием элементов последовательности A_i . В этой работе предлагается процедура, позволяющая находить такую функцию F , которая сводится к минимизации слабоопределенных булевых функций большого числа аргументов. В качестве примера использования этой односторонней функции приводится задача с избыточными паролями. Задача ставится следующим образом. Некоторое число пользователей (например, s) имеют по v паролей каждый и случайным образом подписывают свои сообщения одним из своих паролей. На приемном конце производится обработка всех подписей одной и той же функцией F , что позволяет идентифицировать пользователя. Перехватчик вводится в заблуждение тем, что сообщения подписываются различными паролями. Другим примером может служить задача управления объектами, в которой число команд, подлежащих шифрованию, может превышать несколько десятков миллионов. В связи с этим оказалось необходимо уточнить некоторые понятия и процедуры.

При преобразованиях множества двоичных комбинаций часто выбираются комбинации, не связанные сдвигом. Например, 10111001000 и 00101110010 —

последовательности, связанные сдвигом. Обе эти последовательности имеют одинаковый вес по Хэммингу $r = 5$ и совпадают при сдвиге второй последовательности на два разряда влево.

В общем случае две последовательности $A_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ и $A_j(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn})$ называют **связанными** сдвигом, если они имеют одинаковый вес по Хэммингу, т. е. $|A_i| = |A_j| = r$ и в функции взаимной корреляции имеют отсчет, равный r . Простая программная реализация позволяет из множества двоичных кодов длины n отобрать коды, не связанные сдвигом и использовать только их в качестве кодовых комбинаций, а именно,

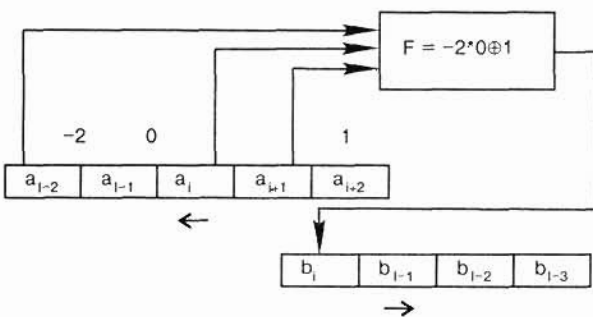
$$B(\tau) = \sum_{\tau=0}^{n-1} \sum_{k=1}^n a_{i, k} a_{j, k+\tau}$$

Если при каком-то значении τ_0 $B(\tau_0) = r$, то последовательности A_i и A_j связаны сдвигом. Пусть при общей длине кода, равной n , число таких кодов равно $R(n)$. Тогда число кодов не связанных сдвигом, определяется разностью $2^n - R(n)$.

Для минимизации слабоопределенных булевых функций большого числа аргументов может быть использована процедура отбрасывания неинформативных аргументов, например, следующая. Исходное число аргументов в соответствии с процедурой, описанной в [2], равняется $2n - 1$. В таблице, построенной путем сдвига k исходных последовательностей A_i и приписывания им значений k последовательностей B_j , нет двух одинаковых строк. Следовательно, не может возникнуть ситуации, при которой одинаковым наборам аргументов должны соответствовать разные значения функции, т. е. на nk наборах функция была определена. Однако на остальных $N = 2^{2n-1} - nk$ наборах функция не определена, и ее можно доопределить 2^N способами. В результате минимизации нужно отобрать такие s аргументов, на которых наборы, где функция равна 1, отличались бы от наборов, на которых функция равна 0. Простой алгоритм перебора с отбрасыванием неинформативных аргументов позволяет проводить минимизацию при больших значениях n и k (в проведенных экспериментах до $n = k = 32$, однако, значения n и k могут быть легко увеличены без изменения процедуры минимизации).

Пример 2. Пусть заданы два множества последовательностей A и B :

$$A_1 = 101110010110110010110011 \rightarrow \\ \rightarrow B_1 = 100010111100100100011101,$$



■ Рис. 1. Аппаратная реализация булевого преобразования двоичных последовательностей

$$A_2 = 111010001101010100011101 \rightarrow \\ \rightarrow B_2 = 011110010100111001010101, \\ A_3 = 100111010001101111100100 \rightarrow \\ \rightarrow B_3 = 110001110111110010001001.$$

Легко видеть, что последовательности A_i не связаны сдвигом, поэтому существует булева функция F , которая из любой последовательности A_i строит соответствующую ей последовательность B_j . Вычисление этой функции оказалось достаточно простой задачей. Была разработана программа минимизации булевых слабоопределенных функций с числом аргументов 32. При необходимости число аргументов функции можно существенно увеличить. Функция имеет вид:

$$F = \bar{1} * \bar{0} * \bar{2} \vee -1 * 0 * \bar{3} \vee -2 * -1 * 3 \vee \\ \vee -1 * 0 * \bar{1} * 4 \vee 1 * \bar{2} * 3 * 4 \vee \bar{1} * \bar{0} * \bar{3} \vee \\ \vee \bar{0} * \bar{1} * 2 * 6 \vee -3 * -2 * \bar{1} * \bar{2} \vee \bar{0} * \bar{2} * \bar{3} * 5 \vee \\ \vee -1 * 0 * \bar{1} * \bar{3} \vee -1 * \bar{0} * \bar{1} * 2 * 3 \vee \bar{1} * \bar{1} * \bar{2} * 3 \vee \\ \vee -2 * \bar{1} * \bar{0} * \bar{1} * 4 \vee -4 * \bar{1} * -1 * 2 \vee \bar{1} * \bar{0} * 4 \vee \\ \vee \bar{2} * \bar{0} * 1 * \bar{2} \vee 0 * \bar{1} * 2 * \bar{3} * \bar{4} \vee \bar{1} * -5 * \bar{4} * 0 * \bar{2} * 3 \vee \\ \vee -2 * 0 * 1 * \bar{2} * 3 \vee \bar{0} * 1 * 4 \vee 0 * \bar{1} * 2 * 5 \vee \\ \vee \bar{1} * -3 * -1 * 0 * \bar{1} \vee 0 * \bar{1} * 3 * 4, \quad (1)$$

где 0 — элемент без сдвига, -1 — элемент со сдвигом влево на один разряд, -2 — на два разряда и т. д., 1 — элемент со сдвигом вправо на один разряд и т. п. Например, если $A = 101101$, $F = \bar{1} * 0 * 2 \vee 1$. Требуется определить последовательность B . Первый разряд последовательности определяем как инверсию первого разряда последовательности A ($\bar{1} = 0$), логически умноженной на третий разряд (1) к результату логически прибавляем второй разряд (0), т. е. результат будет равен 0. Общий результат преобразования будет равен $B = 011010$.

Известно, что булевы операции выполняются исключительно быстро как аппаратными, так и программными средствами, поэтому реализация функции F двенадцати (и много большего числа) аргументов сложности не представляет.

Общая схема аппаратной реализации булевого преобразования показана на рис. 1.

На схеме для примера взята функция $F = -2 * 0 \oplus 1$.

Для паролей нецелесообразно использовать сигналы с малым числом единиц или с малым числом нулей. Лучше всего, если число 1 и 0 будет примерно равно, в этом случае кодовая последовательность может оказаться близкой к случайной. Кроме того, выбираемые пароли не должны быть связаны сдвигом, чтобы могли обрабатываться одной булевой функцией F . Определим число таких сигналов для выбранной длины пароля n . В [2] найдено число кодов длины n веса q , не связанных сдвигом. Оно равно

$$S(n, q) = P(n - q, q - 1) = \frac{q-1}{n-1} C, \quad (2)$$

где $P(a, b)$ — число перестановок из a объектов одного вида — единиц и b объектов другого — нулей.

При четном $n = 2k$ из соотношения (2) получим число кодов, вес которых равен половине их длины: $S(2k, k) = P(k, k - 1) = (2k - 1)! / k!(k - 1)!$.



Рис. 2. Схема передачи изображений летательного аппарата на станцию обеспечения полета

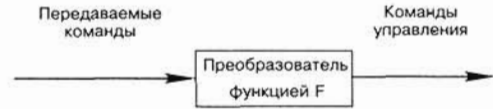


Рис. 3. Схема скрытой передачи сигналов управления

Подсчитаем число комбинаций длины $n = 2k$, не связанных сдвигом, если число единиц равно половине длины кода или отличается от половины на 1 (+ или -):

$$S(2k, k-1) + S(2k, k) + S(2k, k+1) = \binom{k-2}{2k-1} + \binom{k-1}{2k-1} + \binom{k}{2k-1} = \binom{k-1}{2k-1} (3k+1)/2k = \binom{n/2-1}{n} (3n+2)/2n, \quad (3)$$

где $S(2k, k-1)$ — число кодов, не связанных сдвигом, веса $k-1$; $S(2k, k)$ — число кодов, не связанных сдвигом, веса k ; $S(2k, k+1)$ — число кодов, не связанных сдвигом, веса $k+1$, при этом все коды имеют длину $2k$.

Используя формулу Стирлинга: $n! = (2\pi n)^{1/2} n^n e^{-n}$ при $n \rightarrow \infty$, получим, что число комбинаций, не связанных сдвигом, веса 15, 16 и 17 при $n = 32$ равно примерно $868 \cdot 10^6$, т. е. составляет около 20% от общего числа двоичных комбинаций длины $n = 32$ (которое равно примерно $4300 \cdot 10^6$).

Рассмотрим несколько типовых задач шифрования информации при передаче по открытому каналу (допускающему возможность перехвата).

1. Передача изображений от дистанционно пилотируемого летательного аппарата на станцию обеспечения полета.

Схема такой передачи приведена на рис. 2. Яркость точки преобразуется функцией F_1 таким образом, чтобы изображение было полностью искажено. На приемном конце производится восстановление истинной яркости с помощью функции F_2 . Эта же задача может быть решена и с помощью других способов преобразования. Преимущество использования булевых функций состоит в том, что все кодовые комбинации преобразуются одной функцией, причем реализация преобразования производится в реальном масштабе времени (практически без задержки). Для преобра-

зования кода яркости в коды, не связанные сдвигом, достаточно добавить 1 в старшем либо младшем разряде кода яркости. После чего с помощью функции F_1 можно преобразовать эти коды таким образом, чтобы изображение было полностью искажено. На приемном конце с помощью функции F_2 можно восстановить истинные яркости изображения.

Пример 3. Рассмотрим простой случай, когда число градаций яркости равно 8. Пусть яркости кодируются двоичными последовательностями от 000 до 111. Результат их преобразования функциями F_1 и F_2 приведен в табл. 1.

Функция F_1 имеет вид:

$$F_1 = \neg 2 * \neg 1 * \neg 1 \vee 0 * 1 * 2 \vee \neg 2 * 0 * 1 \vee \neg 3 * \neg 1 * 0 \vee 3 \vee \neg 1 * 2 \vee \neg 2 * 1 * \neg 2 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 \vee \neg 1 * \neg 0 * 1 \vee \neg 3 * \neg 0 * \neg 1 * \neg 2. \quad (3)$$

Функция F_2 может быть представлена в виде:

$$F_2 = \neg 3 * \neg 2 * 0 \vee \neg 3 * \neg 2 * \neg 0 * \neg 1 \vee \neg 2 * \neg 1 * \neg 0 \vee \neg 3 * \neg 1 * \neg 0 * \neg 1 \vee \neg 1 * \neg 0 * 1 * \neg 2 \vee \neg 3 * \neg 1 * 0 \vee \neg 0 * \neg 1 * 2 \vee \neg 2 * \neg 1 * 1 \vee \neg 1 * 0 * 2 \vee \neg 1 * \neg 1 * 2. \quad (4)$$

В реальных системах число градаций яркости обычно равно 2^8 , что может быть легко реализовано с помощью приведенной процедуры.

2. Скрытая передача сигналов управления на автономные объекты.

Схема такой передачи приведена на рис. 3. Передаваемые команды выбираются так, чтобы после преобразования функцией F получить требуемые сигналы управления. Например, пусть имеется таблица соответствия передаваемых команд и команд управления (табл. 2).

Булева функция для такого преобразования имеет вид:

$$F = \neg 0 * \neg 1 * \neg 2 \vee \neg 3 * \neg 1 * \neg 1 * \neg 2 \vee \neg 1 * 2 * 3 \vee \neg 0 * 1 * 2 * 4 \vee \neg 4 * \neg 1 * \neg 1 * \neg 2 * \neg 3 \vee \neg 3 * \neg 1 * \neg 1 * \neg 2 * \neg 3 \vee$$

Таблица 1

Исходные коды яркости	Преобразование в коды, не связанные сдвигом	Результат преобразования функций F_1	Результат восстановления яркости функций F_2
000	1000	1110	0000
001	1001	1011	0001
010	1010	1100	0010
011	1011	1000	0011
100	1100	1010	0100
101	1101	1001	0101
110	1110	1111	0110
111	1111	1101	0111

Таблица 2

Команды, передаваемые по открытому каналу	Команды управления оборудованием
10100011	01110011
01111010	11010001
11101001	10110010
10010111	10101100
00111010	10111001
11001011	10110101
01001110	00100111
01111100	10100111

$$\begin{aligned} & \vee \neg 1 * 0 * 3 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1 * 3 \vee \neg 1 * 0 * 1 * 2 \vee \\ & \vee 0 * 2 * 3 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1 * 2 \vee \\ & \vee \neg 3 * \neg 1 * 0 * 1 * 2 \vee 1 * 2 * 3 * 6 \vee \neg 1 * 0 * 3 * 4 \vee \\ & \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 2 \vee \neg 2 * \neg 1 * 2 * 3 * 4 \vee \\ & \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 2 \vee \neg 1 * 0 * 1 * 4 \vee \neg 2 * 0 * 1 * 3 \vee \\ & \vee 0 * 1 * 2 * 3 * 4 \vee 0 * 1 * 3 * 4 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Если перехватчик получит несколько пар передаваемых сигналов и соответствующих команд управления и попытается восстановить булеву функцию F , то он сформирует функцию, которая для других сигналов будет давать неверный результат. Так, в приведенном примере перехватчику могут быть известны пары:

10100011	01110011
01111010	11010001
11101001	10110010
10010111	10101100

По этим парам он вычислит булеву функцию, например, такую:

$$\begin{aligned} F^* = & \neg 1 * 0 * 1 \vee \neg 1 * 0 * 1 * 2 \vee \neg 1 * 1 * 2 \vee \\ & \vee \neg 2 * 1 * 2 * 3 \vee 0 * 1 * 4 \vee \neg 3 * \neg 1 * 0 * 1 * 2 \vee \\ & \vee 0 * 1 * 1 * 2 \vee \neg 2 * 0 * 1 \vee 0 * 1 * 3 \vee \neg 2 * \neg 1 * 0 * 1 \vee \\ & \vee 2 * 4 \vee \neg 2 * 0 * 2. \end{aligned}$$

Если применить эту булеву функцию к остальным четырем входным последовательностям, получим совершенно другие сигналы управления:

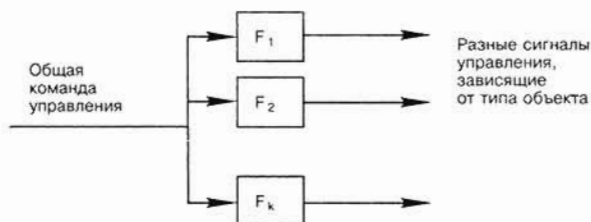
00111010	011101001
11001011	11010111
01001110	11011001
01111100	11011011

3. Передача сигналов управления и контроля на удаленные объекты.

Каждый тип удаленного объекта управления и контроля может снабжаться на входе собственной функцией F , вид которой зависит от типа объекта. Команда управления может быть общей для всех разнородных объектов, однако при обработке этой команды каждый тип объектов вырабатывает собственный сигнал управления. Схема передачи приведена на рис. 4.

Пусть сигналы управления для пяти типов объектов имеют вид: 1) 10010111; 2) 10111010; 3) 01110101; 4) 11001001; 5) 00111101.

Выберем некоторую общую команду, поступающую на все входы, например, такую: 11010111. Най-



■ Рис. 4. Схема передачи сигналов управления

дем для каждого устройства преобразующую функцию:

$$\begin{aligned} F_1 &= 1 * 2 \vee 0 * 1 \vee \neg 1; \\ F_2 &= 1 * 2 \vee 0 \vee \neg 1 * 1; \\ F_3 &= 1 \vee 0 * 2 \vee 0 * 2; \\ F_4 &= 1 * 2 \vee 0 * 2 \vee \neg 1 * 1 \vee \neg 1 * 2; \\ F_5 &= 1 * 2 \vee 1 * 2 \vee 0 \vee \neg 1 * 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Легко убедиться в том, что из общей команды 11010111 с помощью соответствующей булевой функции F_1, F_2, F_3, F_4 или F_5 каждое устройство вырабатывает команду, предназначенную для данного типа устройства: 1, 2, 3, 4 или 5.

Если определить общее число разных команд, которые следует подавать на управляемые устройства и для каждого типа устройств определить необходимые команды управления, то легко вычислить булевы функции для каждого типа устройств. Снабдив на входе каждый тип устройств соответствующей булевой функцией, мы обеспечим как требуемое управление, так и скрытность передачи (даже перехватив несколько команд, достаточно трудно восстановить значение булевой функции).

4. Применение одноразовых ключей в системах связи объектов управления.

Управляющий центр и объект управления снабжаются одной булевой функцией F и набором исходных последовательностей A_1, A_2, \dots, A_k .

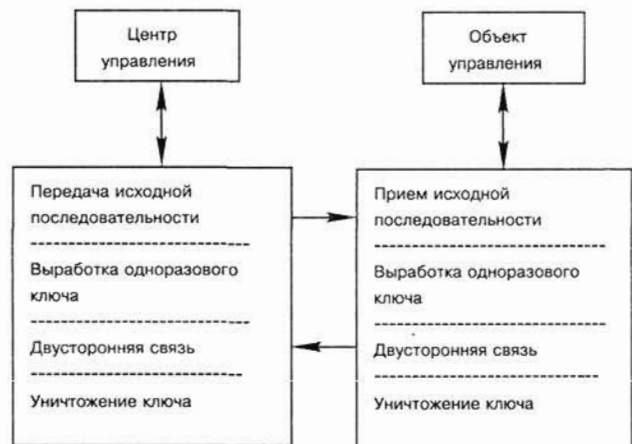
Из каждой исходной последовательности с помощью функции F центр и объект управления вырабатывают набор одноразовых ключей, например:

$$\begin{aligned} A_1 &\rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow \dots A_1, \\ A_2 &\rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow \dots A_2, \\ &\dots \dots \dots \\ A_k &\rightarrow \dots \dots \rightarrow \dots \dots A_k, \end{aligned}$$

которые после каждого сеанса связи уничтожаются.

Схема связи приведена на рис. 5.

Пример 4. Пусть заданы последовательности: $A_1 = 11010111$; $A_2 = 10010011$; $A_3 = 01110101$; $A_4 = 10100111$.



■ Рис. 5. Схема связи при использовании одноразовых ключей

Определим булеву функцию, которая осуществляет следующее преобразование:

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_1.$$

$$F = \neg 1 * \neg 1 * \neg 2 \vee \neg 1 * 0 * 1 \vee \neg 2 * 0 * 2 * \neg 4 \vee \vee \neg 0 * \neg 1 * 4 \vee \neg 0 * \neg 3 \vee \neg 1 * \neg 1 * 2 \vee \neg 1 * \neg 2 * \neg 3 \vee \vee \neg 2 * \neg 1 * \neg 0 \vee \neg 2 * \neg 2 * 4 \vee \neg 1 * \neg 0 * \neg 2 \vee 0 * 1 * 3. \quad (7)$$

Если функцию F представить не в дизъюнктивной нормальной форме, а в скобочной форме, получим более простое выражение:

$$F = \neg 0 * (\neg 1 * 4 \vee \neg 1 * (\neg 2 \vee \neg 2)) \vee \vee \neg 2 * (\neg 1 * (\neg 1 \vee \neg 3) \vee \neg 1 * 4) \vee \vee 0 * (1 * (\neg 1 \vee \neg 3) \vee \neg 2 * 2 * 4) \vee \neg 1 * \neg 1 * 2.$$

5. Ответы управляемых объектов с использованием различных паролей.

Центр передает сигналы запроса на объекты. Каждый объект для ответа использует несколько различных паролей (для маскировки). Центр обрабатывает ответы одной булевой функцией F и идентифицирует объект вне зависимости от выбранного им (из собственного списка) пароля.

Пример 5. Пусть имеется две группы объектов: X и Y .

Объект X используют следующие пароли:

101101
011011
100101.

Эти пароли при обработке функцией F центром должны дать код объекта X : 100011.

Объект Y пусть использует следующие пароли:

111011
001011
010111.

Эти пароли при обработке функцией F центром должны дать код объекта Y : 110111.

Функция $F = \neg 1 * \neg 2 \vee \neg 1 * 0 * 1 \vee 0 * 1 * 2 \vee 0 * \neg 1 * 4 \vee \vee \neg 1 * \neg 0 * \neg 2 \vee 0 * 1 * \neg 3 \vee \neg 2 * 1 * \neg 3 * \neg 4 \vee \neg 1 * \neg 0 * \neg 1 \vee \vee \neg 3 * 1 \vee \neg 1 * \neg 2 \vee \neg 1 * 1 * 2 \vee 5$ реализует эту процедуру.

6. Работа с большим числом объектов.

Число паролей может быть существенно увеличено без усложнения булевых функций, если использовать обратимые булевы преобразования, т. е. такие преобразования, при которых уравнение $F(X) = B$ при любых значениях вектора B имеет решение.

Важным вопросом является нахождение класса нетривиальных функций F , при которых уравнение $F(X) = B$ разрешимо относительно вектора $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при любых значениях элементов вектора $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$. Снабдив такой функцией F официального получателя сообщений, можно в центре управления по исходному тексту B_1, B_2, B_3, \dots вычислять криптотекст X_1, X_2, X_3, \dots , который и передавать по открытому каналу. Официальный получатель, используя функцию F , восстановит исходное сообщение, так как $B_1 = F(X_1), B_2 = F(X_2), B_3 = F(X_3)$ и т. д. Кроме того, такой способ позволяет значительно увеличить число используемых паролей без

существенного усложнения метода нахождения функций и паролей.

В качестве примера такой функции F для восьмиразрядных произвольных векторов $B(b_1, b_2, \dots, b_8)$ можно взять функцию $F = \neg a_{i-1} \oplus a_0 \oplus a_{i+2}$. Значения элементов вектора X для этой функции определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1 &= b_1 \oplus b_4 \oplus b_5 \oplus b_6 \oplus b_8 \oplus 1; \\ x_2 &= b_3 \oplus b_4 \oplus b_5 \oplus b_7; \\ x_3 &= b_4 \oplus b_5 \oplus b_6 \oplus b_8; \\ x_4 &= b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_6 \oplus b_7 \oplus b_8; \\ x_5 &= b_6 \oplus b_7 \oplus b_8 \oplus 1; \\ x_6 &= b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_5 \oplus b_7 \oplus 1; \\ x_7 &= b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_5; \\ x_8 &= b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_5 \oplus b_8 \oplus 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Это можно записать в виде матричного произведения: $F^{-1} * B = X$.

Для примера выберем в качестве паролей все буквы латинского алфавита от A до Z . Сигналы запроса можно вычислить с помощью соотношения (9):

$$\begin{pmatrix} 100111011 \\ 001110100 \\ 000111010 \\ 111001110 \\ 000001111 \\ 111010101 \\ 111010000 \\ 111010011 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 000000000000000000000000 \\ 11111111111111111111111111 \\ 000000000000000000000000 \\ 00000000000000011111111111 \\ 00000001111111100000000111 \\ 00011110000111100001111000 \\ 01100110011001100110011001 \\ 10101010101010101010101010 \\ 11111111111111111111111111 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 01001010101101001011010101 \\ 01100111100110011001100001 \\ 10110101010010110100101010 \\ 00101101001011010010110100 \\ 00101101001011010010110100 \\ 01100111100110000110011110 \\ 111111000000011111111000 \\ 10101011010101001010101101 \end{pmatrix} \cdot \quad (9)$$

В выражении (9) первая матрица соответствует F^{-1} , вторая — B , результирующая — X . В матрице B в столбцах представлены коды всех букв от A до Z , последняя строка из единиц введена для того, чтобы учесть необходимые инверсии в преобразовании (8).

Например, передав полностью бессмысленную последовательность символов: 01111101100110111100010101111010 и обработав ее побайтно функцией $F = \neg 1 \oplus 0 \oplus 2$, получим коды букв осмысленного текста HELP:

01001000(H)01000101(E)01001100(L)01010000(P).

Легко проверить, что если взять любой код из матрицы X и обработать его функцией F , получим соответствующий код в матрице B .

Все передаваемое сообщение можно разбить на блоки длины $n = 8$ и шифровать каждый блок. Можно разбить на блоки другой длины, например, $n = 5$ или $n = 6$. В этом случае перехватчик, кроме подбора функции F , которая зависит от длины блока, должен еще подобрать длину блока n .

В рассмотренном случае не накладывается никаких ограничений на последовательности (они могут быть любыми и даже связанными сдвигом). Автору представляется реальной задачей выбора некоторой функции F , например, для 32 разрядной последовательности, и нахождения уравнения, аналогичного (9). В этом случае число паролей будет превышать 4 миллиарда.

При необходимости можно брать последовательности значительно большей длины.

Следует заметить, что использование булевых преобразований во всех рассмотренных случаях не препятствуют применению средств защиты от помех, в частности, кодов, исправляющих как независимые ошибки в каналах связи, так и пакеты ошибок.

Заключение

В статье предложено использовать метод булевых преобразований двоичных последовательностей для решения различных задач контроля и управления подвижными объектами.

Показано, что нахождение булевых преобразований центром управления осуществляется достаточно просто, однако из-за неоднозначности доопределения получаемых слабоопределенных булевых функций криптоаналитику (незаконному перехватчику сообщений) даже при большом чис-

ле перехваченных пар сигналов практически невозможно восстановить функцию, выбранную центром управления.

Использование простых, быстроисчисляемых булевых функций может существенно расширить область применения средств защиты информации в случаях работы с большим количеством контролируемых и управляемых объектов.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору Сергееву М. Б. за интерес, проявленный им к данной тематике, и настойчивость, благодаря которой была написана эта статья.

Литература

1. **Ерош И. Л., Игнатьев М. Б., Москалев Э. С.** Адаптивные робототехнические системы. Учебное пособие для вузов. — Л., 1985. — 144 с.
2. **Ерош И. Л.** Дискретная математика. Булевы функции, комбинационные схемы, преобразования двоичных последовательностей: Учебное пособие. — СПб., 2001. — 38 с.
3. **Астапкович А. М., Анисимов А. Л., Елисеенко А. Г., Суханов И. О.** Современные тенденции построения систем управления дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами. // В кн.: Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 7–32.
4. **Сергеев М. Б., Чудиновский Ю. Г.** IP-сеть как основа построения распределенных информационно-управляющих систем. // В кн.: Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 33–42.
5. **Анисимов А. Л., Астапкович А. М., Кравченко Д. А., Сергеев М. Б.** Контроль целостности радиоканала в системе дистанционного управления подвижными объектами. // В кн.: Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 100–109.
6. **Ерош И. Л.** Булевы преобразования в системах с открытым распределением ключей для задач управления подвижными объектами. // В кн.: Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 109–118.

Санкт-Петербург

4–6 ноября 2002 г.

ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Комитет Государственной думы Российской Федерации (РФ) по промышленности, строительству, наукоемким технологиям
- Комитет Государственной думы РФ по образованию и науке
- Министерство промышленности, науки и технологий РФ
- Министерство образования РФ
- Министерство по чрезвычайным ситуациям РФ
- Правительство Санкт-Петербурга
- Правительство Ленинградской области
- Санкт-Петербургский научный центр РАН
- Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
 - ISA — The Instrumentation, Systems and Automation Society
 - Северо-западный межрегиональный парламентский Центр «Наукоемкие технологии интеллектуальная собственность»
 - Центр испытаний и сертификации Госстандарта России
 - Институт аналитического приборостроения РАН
 - Центральный институт робототехники и кибернетики
 - Центр экологической безопасности РАН
 - Ассоциация Инжиниринговых Центров РФ
 - Международная академия информатизации
 - Петровская академия наук и искусств
 - Академия содействия развитию промышленности и сельского хозяйства (Академия СРПСХ)

ЦЕЛИ

Консолидация мирового сообщества ученых, инженеров, химиков, биологов, медиков и других специалистов, а также бизнесменов, работающих в области ПЭБЧ.

Создание «моста» между иностранными и Российскими предприятиями и научными школами в области приборостроения в экологии и безопасности человека (ПЭБЧ), заключение договоров и соглашений, включая коммерческие.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Экологическое приборостроение
- Приборостроение в измерении и управлении процессами обеспечения безопасности Человека
- Утилизация боеприпасов и отходов промышленности

- Информационные технологии в ПЭБЧ
- Наукоемкие технологии и интеллектуальная собственность в ПЭБЧ
- Робототехника в чрезвычайных ситуациях
- Инжинирингсеть России в экологии и безопасности

- Моделирование риска и безопасности в банковских и технических системах

В рамках перечисленных направлений предполагается проведение «круглых столов», выставок по специализированным приложениям приборостроения.

По двум первым направлениям будут организованы заседания «молодежных секций», на которых будут представлены доклады и проведены дискуссии молодых ученых, аспирантов и студентов.

РЕГЛАМЕНТ ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

Конференция проводится с 4 по 6 ноября 2002 г. в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

Открытие: 4 ноября в 10 часов
Закрытие
и подведение результатов: 6 ноября в 10 часов

РАБОЧИЕ ЯЗЫКИ

- Русский
- Английский

АДРЕС И ТЕЛЕФОНЫ ОРГАНИЗАЦИОННО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО КОМИТЕТА

Россия, 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская, 67, СПбГУАП, кафедра 14.

- Исполнительный секретарь Баташева А. Э.
Тел./fax : +7 (812) 315-49-67,
тел.: +7 (812) 315-70-14,
e-mail: sol_k14@aanet.ru
mailto:sol_k14@aanet.ru
- Помощник председателя комитета Котов В. П.
Тел.: +7 (812) 313-70-15,
e-mail: kotov@aanet.ru
mailto:kotov@aanet.ru

УДК 621.317.08; 681.2.001.5; 615.47

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОПОТЕНЦИАЛОВ ЭКГ

О. О. Жаринов,

ассистент

А. П. Шелета,

д-р техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП)

Исследование тонкой структуры ЭКГ считается перспективным направлением повышения диагностических возможностей электрокардиографии. Экспериментально доказано [1], что ряд электрофизиологических нарушений в миокарде сопровождается появлением низкоамплитудных «зубцов», часто недетерминированной структуры и нестабильными во времени характеристиками. Возможности регистрации микропотенциалов на обычной ЭКГ принципиально ограничены наличием множества помех, что предопределяет использование методов статистической теории обработки сигналов.

Постановка задачи. Использование системы из 3 ортогональных отведений позволяет рассматривать регистрируемый процесс как векторный $\vec{\eta}[k] = \{\eta_{<x>}[k] \ \eta_{<y>}[k] \ \eta_{<z>}[k]\}$. Как известно, ЭКГ является квазипериодическим сигналом, состоящим из отдельных повторяющихся кардиоциклов. Обобщенная математическая модель процесса, регистрируемого на протяжении некоторого ℓ -го кардиоцикла, может быть представлена в виде

$$\vec{\eta}_\ell[k] = \mathfrak{R}_\ell \times (\vec{s}[k] + \vec{s}_{\mu_\ell}[k]) + \vec{n}_\ell[k], \quad \ell = \overline{1, L}; \quad k = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где информационным сигналом является низкоамплитудный компонент $\vec{s}_{\mu_\ell}[k]$, по-разному (нерегулярно) проявляющийся в L кардиоциклах записи ЭКГ; все остальные составляющие: $\vec{s}[k]$ — высокоамплитудный, повторяющийся, сигнал «обычной» ЭКГ (комплекс P-QRS-T, регулярная активность); \mathfrak{R}_ℓ — матрица преобразования координат размера 3×3 , описывающая механические перемещения источника сигналов; многокомпонентный случайный процесс $\vec{n}_\ell[k]$, в контексте решаемой задачи рассматриваются как помехи.

Выделение составляющих МП из смеси (1) с учетом высокой степени априорной неопределенности, широкого динамического диапазона, сложной структуры помехи и ее нестационарного характера и представляет собой сложнейшую задачу, решение которой требует многоэтапной обработки сигнала. Для приведения задачи анализа информационного сигнала к обычному виду смеси типа

$$\vec{\eta}_{\mu_\ell}[k] \cong \vec{s}_{\mu_\ell}[k] + \vec{n}_\ell[k], \quad \ell = \overline{1, L}, \quad (2)$$

необходимо последовательно решать задачи исключения внеполосных составляющих помехи, об-

наружения кардиоциклов, оценивания параметров матрицы \mathfrak{R}_ℓ , оценивания сигнала регулярной активности (посредством усреднения L сигналов) и его компенсации.

Некоторые из перечисленных задач являются традиционными для автоматического анализа ЭКГ; другие, в частности необходимость оценивания матрицы \mathfrak{R}_ℓ [2], и собственно задача анализа выборки (2), ставятся редко, а известные методы их решения развиты недостаточно. Здесь приводится краткое описание предлагаемых подходов к реализации процедур обработки ЭКГ, имеющих ключевое значение.

Компенсация мультипликативных помех. Процессы механического перемещения источника сигналов преимущественно обусловлены дыхательной активностью, в результате чего сердце осуществляет повороты на углы вокруг ортогональных осей $\{\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\}$. Оценить параметры матрицы преобразования (вращения координат), связанные нелинейной зависимостью и изменяющиеся во времени, довольно сложно. Некоторого упрощения удастся достичь в случае спокойного неглубокого дыхания, когда на протяжении каждого кардиоцикла параметры можно считать постоянными и углы поворота малы, так что для любого из них $\sin(\varphi) \approx \varphi$, $\varphi^2 \approx 0$, $\cos(\varphi) \approx 1$. В таком приближении матрица вращения представляется следующим образом:

$$\mathfrak{R} \cong \begin{pmatrix} 1 & -\varphi_z & \varphi_y \\ \varphi_z & 1 & -\varphi_x \\ -\varphi_y & \varphi_x & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, необходимо оценивать три параметра для каждой пары $\{\ell_1, \ell_2\}$ выборок, соответствующих различным кардиоциклам $\{\vec{\eta}_{\ell_1}[k]\}_{k=1}^N$ и $\{\vec{\eta}_{\ell_2}[k]\}_{k=1}^N$. Поскольку информативны не абсо-

лутные значения углов, а относительные, то сигнал одной из выборок, например, ℓ_1 -ой, принимается за начало отсчета, т. е. $\mathfrak{R}_{\ell_1} = \mathbf{I}$. Важно отметить, что умножение на матрицу (3) увеличивает евклидову норму вектора, $\|\mathfrak{R} \times \mathfrak{s}[k]\| \geq \|\mathfrak{s}[k]\|$. Это обстоятельство является, в общем, побочным эффектом приближения, но может оказаться полезным, поскольку открывает возможность «автоматического» учета изменения амплитуды сигнала вследствие изменения проводимости тканей при дыхании.

Оценки параметров матрицы по методу максимального правдоподобия [3] для случая широкополосного шума получаются в результате минимизации функционала:

$$\hat{\mathfrak{R}} = \operatorname{argmin}_{\mathfrak{R}} \sum_{m=x,y,z} \sum_{k=1}^N \left(\eta_{\ell_1 \langle m \rangle} [k] - \sum_{n=x,y,z} \mathfrak{R}_{\langle mn \rangle} \eta_{\ell_2 \langle n \rangle} [k] \right)^2 \quad (4)$$

Решение (4) может быть получено как прямыми методами, так и посредством любых итерационных процедур последовательного приближения. Применение последних может быть предпочтительнее, поскольку не возникает проблем с устойчивостью решения.

Обнаружение информационного сигнала.

Проведение статистического синтеза метода обработки смеси (2) требует описания сигнала и помехи. Известно, что при нормальных условиях регистрации ЭКГ широкополосная составляющая аддитивной помехи (в основном, представленная электромиограммой) является стационарной и имеет гауссовское распределение. Наличие изоэлектрической фазы ЭКГ, в которой отсутствует электрическая активность сердца, позволяет выделить обучающую выборку помехи. Адекватное описание каждой ℓ -й реализации информационного сигнала $\mathfrak{s}_{\mu_\ell}[k]$ предложить сложно, поэтому общий подход к решению задачи обнаружения состоит в использовании статистических тестов на *однородность* характеристик двух выборок. Класс возможных методов ограничивает взаимная коррелированность отсчетов помехи и небольшая длительность каждой выборки.

Обработку смеси (2) можно проводить по скалярному сигналу каждого отведения. Алгоритм обработки процесса в на фоне помехи с коррелированными отсчетами основан на декоррелирующем (выбеливающем) преобразовании. Эффективный вычислительный алгоритм реализации выбеливающего фильтра использует представление помехи параметрической авторегрессионной моделью, которая связывает некоторое количество дискретных отсчетов процесса во временной области линейным рекуррентным соотношением

$$n[k] + \sum_{r=1}^p a_r n[k-r] = b_0 \chi[k], \quad (5)$$

где $\{\chi[k]\}$ — так называемый порождающий процесс, дисперсия которого равна единице, а отсчеты взаимно некоррелированы; $\{\hat{a}_r\}_1^p, \hat{b}_0$ — параметры модели; p — ее порядок. Оценки параметров модели (5) по обучающей выборке помехи получаются

в результате решения системы уравнений Юла-Уолкера [4]. Тогда ЧПФ цифрового выбеливающего фильтра определяется следующим образом:

$$W_=(z) = \left(1 + \sum_{r=1}^p \hat{a}_r z^{-r} \right) / \hat{b}_0,$$

которая однозначно определяет алгоритм обработки контрольной выборки. После применения выбеливающего преобразования к исходной реализации процесса (2), $\eta_=[k] = w_=\{\eta[k]\}$, возникает задача обнаружения сигнала на фоне белого шума с единичной дисперсией. Для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала в выборке $\{\eta_=[k]\}_1^N$, необходимо вычислить статистику, позволяющую осуществить проверку гипотезы о величине дисперсии нормального БШ:

$$\Xi[N] = \sum_{k=1}^N (\eta_=[k])^2 \quad (6)$$

и сравнить ее значение с фиксированным пороговым уровнем.

Известно, что оценки параметров $\{\hat{a}_r\}_1^p, \hat{b}_0$ являются состоятельными и асимптотически эффективными. Показано [5], что в асимптотическом случае, при $N \gg 1$, выражение для потенциально возможных характеристик обнаружения сигнала посредством рассмотренного алгоритма представляется в виде

$$P_D(N, q_\alpha^2) = \frac{1}{\sqrt{4\pi N(1+2q_\alpha^2)}} \times \int_{\chi_\alpha^2}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\kappa - N(1+q_\alpha^2))^2}{4N(1+2q_\alpha^2)}\right) d\kappa, \quad (7)$$

где χ_α^2 является пороговым уровнем принятия решения для статистики (6) при уровне ложной тревоги $P_F = \alpha$;

$q_\alpha^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (s_=[k])^2}{\sum_{k=1}^N (n_=[k])^2}$ — отношение сигнал-шум для процесса $\{\eta_=[k]\}_1^N$.

Чтобы интерпретировать полученное выражение для отношения сигнал-шум в исходном процессе (2),

$q^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (s[k])^2}{\sum_{k=1}^N (n[k])^2}$, используется правило

преобразования спектральных функций процессов и равенство Парсеваля:

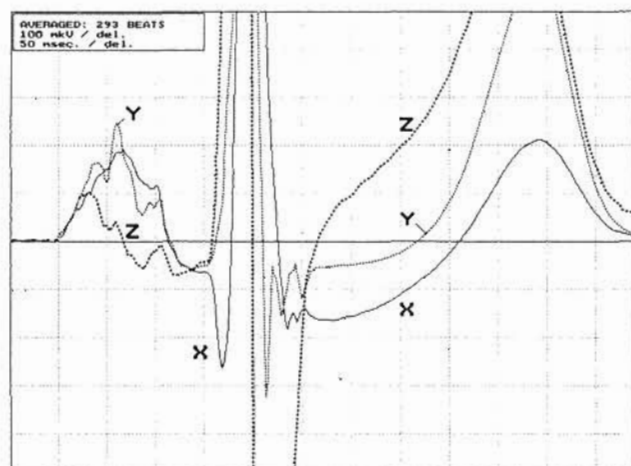
$$q_\alpha^2 = \frac{\int_0^{\pi/T_\Delta} |G_{(s)}(j\omega)|^2 |W_=(j\omega T_\Delta)|^2 d\omega}{\int_0^{\pi/T_\Delta} |G_{(s)}(j\omega)|^2 d\omega}, \quad (8)$$

где $G_{(s)}(j\omega)$ — спектр сигнала $\{s_{\mu_\ell}[k]\}_1^N$, T_Δ — период дискретизации процессов.

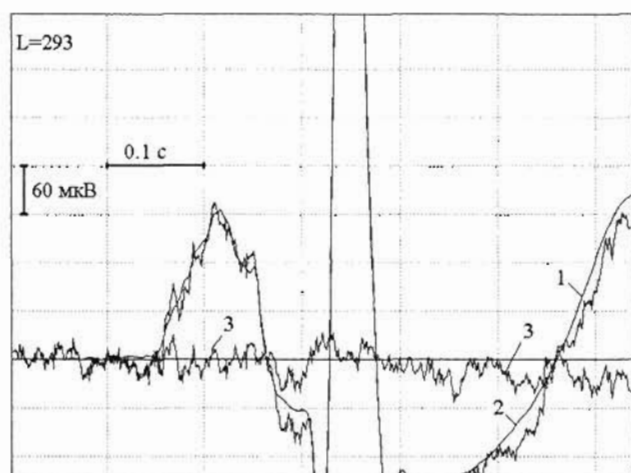
Качественные показатели обнаружения зависят от соотношения спектров мощности сигнала и помехи. Наиболее неблагоприятным случаем для обнаружения является полное совпадение спектральных свойств помехи и сигнала.

Результаты эксперимента служат критерием объективной проверки истинности теоретических положений, изложенных в работе, и работоспособности синтезированных алгоритмов и процедур в реальных условиях помеховой обстановки. Практическая оценка качественных показателей алгоритмов затруднена априорной неопределенностью наличия нерегулярных микропотенциалов в реальной контрольной выборке ЭКГ. Обойти данное ограничение позволяет метод полунатурного моделирования: в исходный зарегистрированный процесс добавляется аддитивный компонент информационного сигнала, но никаких изменений в структуре и параметрах алгоритма не производится.

Конкретный пример практического воплощения принятой концепции эксперимента иллюстрируют реализации реально зарегистрированных и обработанных процессов, приведенные на рис. 1–4.

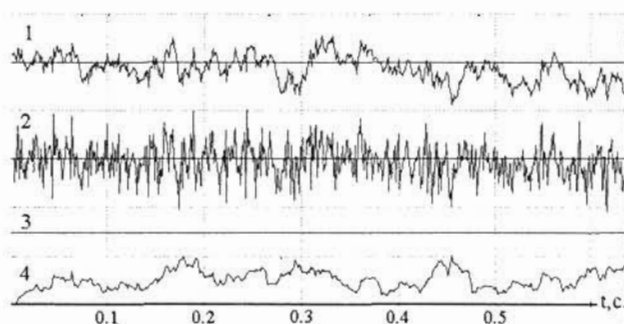


■ Рис. 1. Усредненные сигналы трех ортогональных отведений ЭКГ по Франку



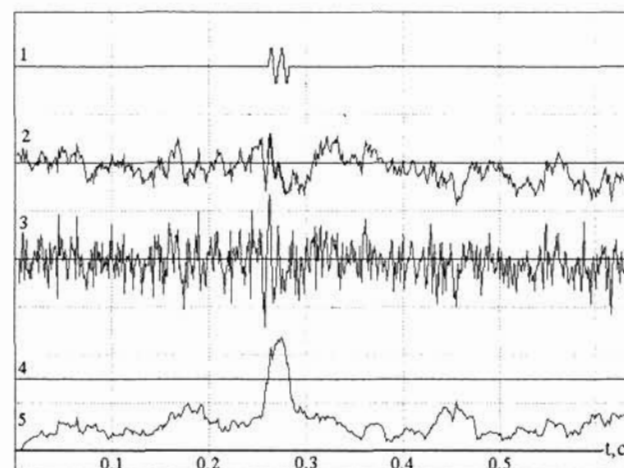
■ Рис. 2. Сигналы в отведении X:

1 — реализация одного из кардиоциклов; 2 — усредненный сигнал $\{\bar{\eta}_{kX}[k]\}$: регулярная активность; 3 — результат компенсации регулярных составляющих ЭКГ — контрольная выборка процесса, $\eta_{\mu}[k] = s_{\mu}[k] + n_l[k]$



■ Рис. 3. Обработка контрольной выборки процесса в отведении X, представленного на рис. 2:

1 — исходная контрольная выборка; 2 — выходной процесс выбеливающего фильтра $\{\eta_{\mu}[k]\}_1^N$; 3 — пороговый уровень C для $P_F = 0,01$; 4 — решающая статистика (б), вычисляемая на скользящем окне длительностью $N = 50$ отсчетов



■ Рис. 4. Полунатурное моделирование алгоритмов: в контрольную выборку процесса в отведении X, представленную на рис. 2 и рис. 3 введен искусственный аддитивный сигнал. Отношение сигнал-шум $q = 1$:

1 — сигнал: два периода синусоиды частотой 100 Гц; 2 — контрольная выборка; 3 — выходной процесс выбеливающего фильтра $\{\eta_{\mu}[k]\}_1^N$; 4 — пороговый уровень C для $P_F = 0,01$; 5 — решающая статистика (б), вычисляемая на скользящем окне длительностью $N = 50$ отсчетов

На рис. 1 в увеличенном масштабе отображения приведены усредненные сигналы в трех ортогональных отведениях по Франку. Усреднено $L = 293$ кардиоциклов. Из рисунка видны детали тонкой структуры ЭКГ: на протяжении зубца P и в конечной части QRS-комплекса. Указанные компоненты обычно и считаются микропотенциалами в традиционном понимании вопроса. Вообще они относятся к составляющим регулярных составляющих ЭКГ.

Из рис. 2 можно получить наглядное представление об эффективности компенсации регулярных составляющих на протяжении произвольно выбранного кардиоцикла. В результате вычитания усред-

ненного сигнала (эпюра 2) из исходной зашумленной реализации кардиоцикла (эпюра 1) образуется контрольная выборка $\{\eta_{\mu}[k]\}_0^T$ (процесс 3), в которой могут присутствовать составляющие нерегулярных микропотенциалов $\{s_{\mu}[k]\}_1^N$.

Рис. 3 иллюстрирует этапы обработки полученной контрольной выборки. Процесс на выходе выбеливающего фильтра представлен эпюрой 2. Визуальный анализ позволяет констатировать сходность его структуры с процессом типа белого шума. Вычисление решающей статистики (6) на скользящем окне длительностью $N=50$ отсчетов (априорно предполагаемая длительность сигнала) соответствует процессу 4. Превышение порогового уровня, установленного исходя из $P_F=0,01$, не наблюдается ни в одной точке, т. е. составляющие нерегулярных микропотенциалов не обнаружены. Это подтверждает работоспособность предложенного подхода: не обнаружено никаких составляющих, которые могли бы быть побочными продуктами предыдущих этапов обработки реализации ЭКГ.

Проверку способности алгоритма к обнаружению сигнала иллюстрируют эпюры на рис. 4. В исходный процесс искусственно вводится информационный сигнал, представляющий собой 2 периода синусоидального сигнала частотой 100 Гц. Исходные данные выбраны, исходя из наилучших условий: длительность сигнала примерно равна периоду корреляции помехи, т. е. его структура мало отличается от одиночных выбросов помехи. Отношение сигнал-шум q составляет 1. Визуальный анализ полученной контрольной выборки, соответствующей процессу 2, не позволяет принять решение о наличии какого-либо информационного сигнала (для облегчения проведения сравнения участков процесса интервал наличия сигнала специально выделен). Но заметно, что дисперсия процесса на выходе выбеливающего фильтра возрастает (эпюра 3). На протяжении интервала наличия сигнала регистрируется устойчивое превышение ре-

шающей статистикой порогового уровня. Результаты моделирования позволяют констатировать отличное совпадение расчетных и экспериментально полученных рабочих характеристик алгоритма обнаружения.

Заключение. Предложенная методика обработки ЭКГ предназначена для проведения диагностики электрической нестабильности миокарда. Необходимая достоверность конечного результата достигается только при оптимальном построении каждого этапа алгоритма обработки. В случае обнаружения микропотенциалов следует решать задачу оценивания их параметров, энергетических и неэнергетических [3], что можно осуществить стандартными методами статистической теории, и соответствующей классификации по виду нерегулярности.

Литература

1. **Waldo A. L., Kaiser G. A.** A study of ventricular arrhythmias associated with acute myocardial infarction in the canine heart. // *Circulation*. 1973. — Vol. 47. — P. 1222–1228.
2. **Лебедева Н. А.** Алгоритмы анализа многоканальной ЭКГ для классификации форм QRS-комплексов. / Автореф. дисс ... к. т. н. — СПб: ЛЭТИ, 1999. — 16 с.
3. **Куликов Е. И., Трифионов А. П.** Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. Радио, 1978. — 296 с.
4. **Марпл С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 564 с.
5. **Зайченко К. В., Жаринов О. О., Кулин А. Н., Жаринов И. О.** Использование принципов адаптивной фильтрации для обнаружения низкоамплитудных биоэлектрических сигналов. // *Вестник С.-З. регионального отделения АМТН*. Под ред. Г. В. Анцева. / ООО «Агентство РДК-принт». — СПб, 2001. — Вып. 5. — С. 157–162.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИТЕХНИКА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ

Кухарев Г. А.

Биометрические системы: методы и средства идентификации личности человека. — СПб.: Политехника, 2001. — 240 с., ил.

В книге дан обзор идей, методов и средств, используемых в системах идентификации и верификации личности человека на основе его биометрических характеристик. Проанализированы состояние и тенденции развития различных биометрических технологий. Подробно обсуждены биометрические системы, использующие информацию об отпечатках пальцев, геометрии руки, параметрах лиц и радужной оболочке глаз. Представлены элементы цифровой обработки изображений, наиболее часто используемые в различных биометрических технологиях, базовые методы обработки исходных данных в приложении к системам распознавания лиц, а также методики построения (синтез, анализ и реализация) систем распознавания людей по их лицам. Приведены словарь терминов, обширная библиография и адреса наиболее важных интернет-сайтов по биометрическим технологиям.

Книга предназначена для студентов и аспирантов соответствующих специальностей, а также практиков, интересующихся использованием представленных в ней биометрических систем.

УДК 007: 57+007:573

ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОИНВАЗИВНЫХ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ РЕНТГЕНО–ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ

П. И. Бегун,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ГЭТУ)

В. К. Сухов,

д-р мед. наук

Городская многопрофильная больница № 2, Санкт-Петербург

Рассмотрены проблемы информационного обеспечения внедренных в последнее время в медицинскую практику методов малоинвазивных хирургических операций. Проанализированы причины, при которых в ряде случаев не удается достичь желательного лечебного эффекта, и операции сопровождаются малопрогнозируемыми осложнениями. Поставлены задачи, которые необходимо решить для оптимизации информации при проведении малоинвазивных хирургических операций, и намечены пути решения этих задач.

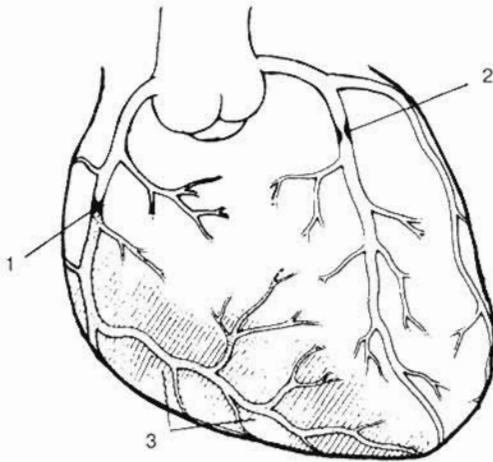
Современные подходы к лечению наиболее частых и опасных для человека заболеваний сосудов предполагают комбинацию нескольких видов медицинских технологий. Традиционные пути оказания помощи в виде терапии и хирургических операций протезирования или перестройки сосудистого русла развиваются с начала 60-х годов. Успехи этих операций в сочетании с медикаментозными средствами спасли от внезапной смерти и вернули к активной жизни многие миллионы больных. К сожалению, способы коррекции заболеваний сосудов не предполагают радикального избавления от болезни и сопровождаются обширной травмой. Поэтому в последнее время в повседневную медицинскую практику внедряются методы малоинвазивной хирургии. Эти методы предопределяют изменения технологии выполнения операций: не используется искусственное кровообращение и не производится разрез при доступе.

В своей основе операции содержат приемы катетеризации сосудов, но включают активное изменение внутрисосудистого русла и отличаются большой сложностью. Эффективность хирургического вмешательства достигается селективным воздействием на измененную часть сосуда. Такие операции выполнимы только для части больных, с определенными типами поражения сосудов и характерами клинического течения. Выделение признаков, определяющих возможность проведения операций, производится в результате специального инструментального исследования. Интервенционные рентгено-хирургические операции проводят на кровеносных сосудах разных органов

(сердца, мозга, органов брюшной полости, конечностей) [1–3] в рентгеновской операционной, оборудованной системами регистрации рентгено-телевизионного изображения и физиологических показателей сердечной деятельности.

Эффективность таких операций не уступает традиционному хирургическому, не предполагает никаких травмирующих воздействий, кроме проколов, перемещений инструментов к месту поражения, локального воздействия в виде растяжения и разрыва. Эти операции мало травматичны, почти не вызывают неприятных ощущений и дают возможность вернуться к активной жизни на следующий день после операции. В то же время отсутствие необходимой информации создает объективные трудности при выполнении таких операций и не позволяет планировать успех или предсказать неблагоприятный исход технически правильно выполненных манипуляций.

Биологические и технические элементы (врач, технические средства операционной, пациент и подвергающиеся коррекции биологические структуры) должны быть связаны между собой в едином контуре управления. Такая совокупность представляет собой медицинскую биотехническую систему [4]. Оптимальное функционирование медицинской биотехнической системы возможно только при условии согласования характеристик, определяющих поведение каждого элемента системы и идентификации информационной среды. При этом в информационной среде должны быть оптимизированы как количество, так и форма предъявляемой информации и интенсивность ее потоков.



■ Рис. 1. Схема сердца со стенозированными сосудами: 1 — окклюзия правой коронарной артерии; 2 — стеноз левой коронарной артерии; 3 — зона инфаркта

Один и тот же атеросклеротический процесс имеет различные морфологические проявления в сосудах разных органов. При этом существует большое количество разнообразных морфологических форм поражения одних и тех же сосудов.

Самым частым объектом хирургического воздействия у кардиохирургов является сужение в сосудах сердца (рис. 1). Например, в США в 2001 г. проведено около миллиона малоинвазивных хирургических операций на коронарных артериях и только около четырехсот традиционных операций по арто-коронарному шунтированию.

При атеросклеротических заболеваниях образуются склеротическая бляшка (рис. 2), которая препятствует кровоснабжению органа. В результате рентгено-хирургической операции бляшка разрушается и кровоток восстанавливается.

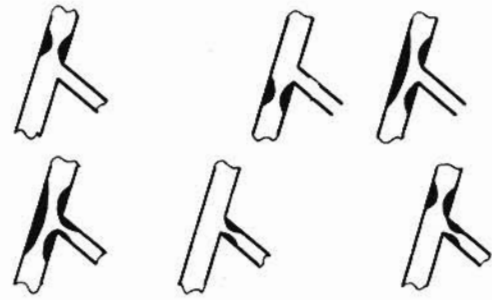
Для разрушения бляшки разработаны технологии воздействия: баллонная дилатация, лазерная, ультразвуковая, роторная и ротоблатерная ангиопластики и ротационная атероэктомия.

Порядка 97 % операций проводят, используя технологию баллонной дилатации [5]. При баллонной дилатации воздействие на бляшку происходит при расширении баллона, установленного в зоне ее локального расположения (рис. 3).

Для определения величины и характера воздействия на бляшку при обеспечении минимального возможного повреждения кровеносного сосуда необходимо располагать информацией о ее патологических, морфологических, геометрических и механических характеристиках и о процессах реконструкции сосуда как следствия различных режимов воздействия на биологическую структуру при определенном физиологическом состоянии организма пациента в целом.

На различных стадиях развития бляшки каждая из перечисленных характеристик принимает существенно различные значения. При этом на каждой стадии значения характеристик бляшки варьируются как вдоль сосуда, так и по его образующей.

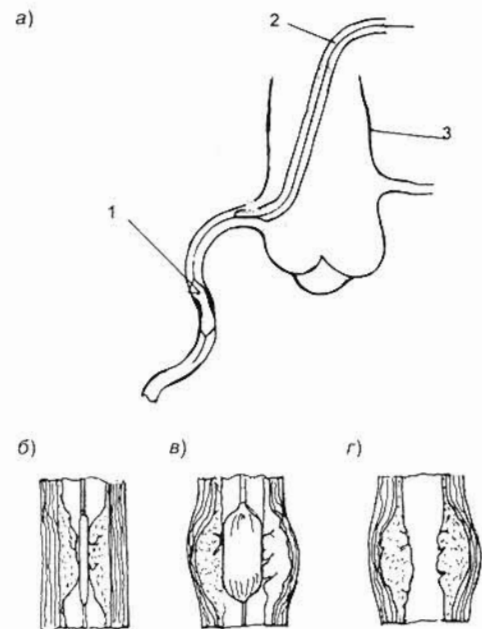
На ранней стадии развития бляшка имеет фибромускулярное строение. Атеросклеротические бляшки поздней стадии развития являются самыми частыми объектами коронарной ангиопласти-



■ Рис. 2. Схемы различных форм стеноза сегмента коронарной артерии

ки. Они отличаются от ранних фибромускулярных бляшек наличием некротических фокусов, кровоизлияний в толще бляшки или субинтимально, иногда очагами кальцификации. При этом часть внутренней эластичной мембраны обычно повреждена (нарушена ее целостность), а также затронут медиальный слой стенки сосуда. Фиброзная крышка бляшки или организованный пристеночный тромб на ней сужают просвет артерии. Баллонная дилатация ведет к отслойке части эндотелия, к образованию линий раскола в толще бляшек и их фрагментации. Это может привести к внутрисосудному кровенаполнению в артерии, передислокации тромбов внутри просвета коронарной артерии, агрегации свежих тромботических масс на поверхности поврежденной бляшки.

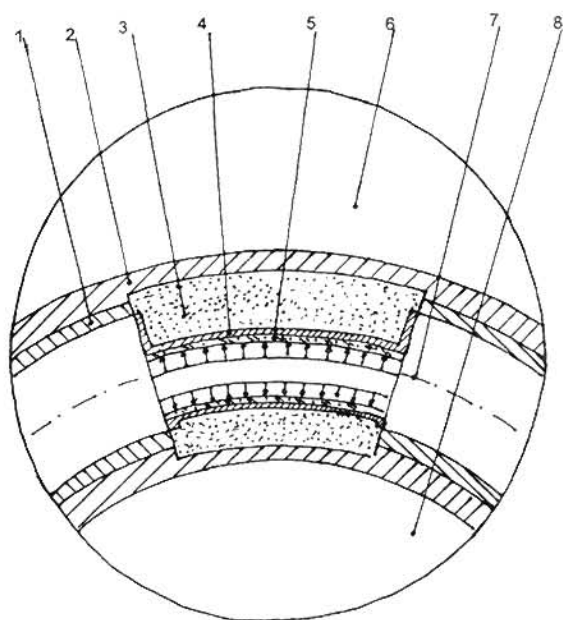
Ультразвуковое изображение просвета коронарной артерии до и после выполнения коронарной



■ Рис. 3. Схемы дилатации коронарной артерии: а — положение баллона при дилатации:

1 — баллон; 2 — проводниковый катетер; 3 — восходящая аорта;

б — сегменты сосуда с дилатируемой бляшкой при установке баллона; в — во время дилатации; г — после дилатации



■ Рис. 4. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния при дилатации бляшки:

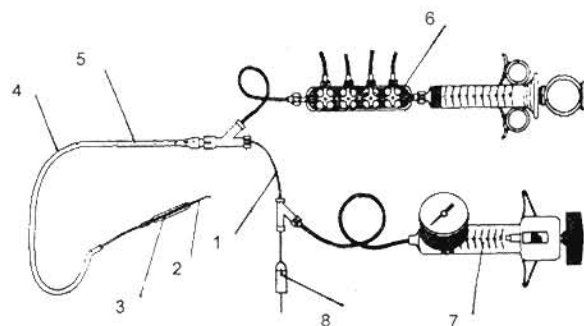
1 — интима; 2 — медиа; 3 — бляшка; 4 — крышка бляшки; 5 — баллон; 6 — перикард; 7 — ось сосуда; 8 — миокард

ангиопластики дает возможность получить информацию о реальных параметрах просвета сосуда и образующей его стенки, включая морфологические особенности. В то же время нет методики предоперационной диагностики ни одной из характеристик дилатированного сосуда, так как не разработаны технические средства для определения *in vivo* (внутри организма) механических свойств бляшки и стенок сосуда в окрестности патологического поражения.

Датчик для определения механических свойств бляшки (модуля нормальной упругости, коэффициента Пуассона) можно спроектировать, взяв за основу фазовую антенную систему «Endosonics», используемую для исследования геометрии дилатированного сосуда [6]. По скорости распространения ультразвука можно определять распределение плотности, а значит, и распределение модуля нормальной упругости и коэффициента Пуассона как в самой бляшке, так и в находящихся в ее окрестностях стенках сосудов. Заметим, что в публикациях нет результатов исследований и *in vitro* (вне организма) ни механических свойств, ни механических характеристик бляшек.

При получении значений распределения модулей упругости в бляшке и ее окрестностях можно исследовать характер напряженно-деформированного состояния по математическим моделям, расчетная схема которых представлена на рис. 4. В настоящее время даже для определения распределения напряжений, возникающих в сосуде в норме, используют только среднестатистические значения механических характеристик, полученные при исследовании сосудов *in vitro* [7, 8].

Для дилатации просвета кровеносного сосуда используют специальный набор инструментов



■ Рис. 5. Набор инструментов для коронарной ангиопластики:

1 — баллонный катетер; 2 — коронарный проводник; 3 — проводниковый катетер; 4 — интродьюсер; 5 — адаптер; 6 — четырехходовой манифолд; 7 — шприц нагнетания давления; 8 — вращатель проводника

(рис. 5). Он включает следующие основные узлы: баллонные катетеры, баллоны, коронарные проводники и дилатационные шприцы.

Перед введением комплекса «баллонный катетер—коронарный проводник» получают кривые артериального давления на мониторе от бокового ввода интродьюсера или от кончика проводникового катетера и налаживают ЭКГ мониторинг. Стабильно устанавливают кончик проводникового катетера в устье дилатируемой артерии и в просвет проводникового катетера через адаптер проводят комплекс «баллонный катетер—проводник».

При приближении кончика баллонного катетера к устью дилатируемой артерии из центрального просвета катетера выпускают на 10–15 см коронарный проводник. Затем кончик самого проводника вводят в просвет коронарной артерии. Коронарный проводник с помощью управляющей цанги вводят в просвет дилатируемой артерии. Ротационными и поступательными движениями кончик проводника проводят дистальнее пораженного сегмента, и после того, как проводник проведен в периферические сегменты дилатируемой артерии, передвижение его прекращается и на проводник нанизывается баллонный катетер. По мере продвижения проводника проводят контрастирование просвета дилатируемой артерии.

Раздувание баллона выполняют разведенным в физиологическом растворе контрастным веществом. Это позволяет визуализировать на мониторе раздутый баллонный сегмент в коронарной артерии. После каждого раздувания и сдувания баллона визуализируют и оценивают дистальный кровоток.

Для оценки анатомических изменений просвета коронарных артерий проводят интракоронарное ультразвуковое исследование. В результате исследования можно оценить состояние места дилатации: разрыв бляшки, ее фрагментацию, заворот интимы, наличие пристеночного тромба на месте проведения дилатации и состояние просвета коронарной артерии в других сегментах дистальнее и проксимальнее места дилатации, в частности, наличие атеросклеротических бляшек, кальциноза стенки артерии, не выявленных при контрастной коронарной ангиографии.

Баллонные катетеры имеют два просвета: один для введения металлического коронарного провод-

ника, другой — сообщающийся с баллоном. Диаметр базисного катетера около 1,4 мм. Для улучшения скользящих качеств базисной трубки катетера используют различные покрытия ее поверхности, например, гидрофильное.

Длина баллона составляет от 10 до 40 мм, а диаметр в раздутом состоянии колеблется от 1,5 до 4,2 мм. Центральный просвет имеет диаметр, необходимый для введения металлического проводника диаметром 0,25–0,42 мм. Применяют баллоны двух модификаций — «гибкие» и «жесткие». «Гибкие» баллоны увеличивают размеры по мере увеличения давления. «Жесткие» баллоны имеют ограниченный максимальный диаметр. И те, и другие выдерживают давление до 25–30 атмосфер.

Для дилатации конкретного патологического образования нет методики выбора: 1) баллона той или иной модификации; 2) максимального допустимого давления для баллонов одной модификации и максимального диаметра для другой; 3) режима нагружения баллона. Для разработки такой методики необходимы характеристики бляшки *in vivo*, реализованные математические модели взаимодействия баллона и бляшки (рис. 4) и исследования характера напряженно-деформированного состояния в сосуде, соседнем с дилатируемым.

Коронарные проводники играют решающую роль в катетеризации и установке баллонного сегмента катетера в зоне поражения коронарной артерии. Они имеют тефлоновые и гепариновые покрытия для уменьшения агрегации фибрина на поверхности проводника, а также для уменьшения трения при проведении его в центральном просвете баллонного катетера. Для увеличения рентгеноконтрастности дистальный кончик изготавливают с платиновым напылением. Стандартная длина коронарного проводника — 175–180 см. Диаметр проводника варьируется от 0,25 до 0,5 мм.

Кончик проводника изготавливают различной длины и гибкости в зависимости от поставленных перед коронарной ангиопластикой целей. Очень гибкие и длинные (до 10 см) кончики проводников используют для прохождения резких изгибов и извитых участков артерий, для повторной катетеризации просвета артерии после предварительной дилатации сосуда, для уменьшения механической травмы поврежденной интимы артерий. Проводники с коротким гибким кончиком (до 4 см) и жесткой базисной проволокой применяют для реканализации окклюзированных артерий и для прохождения жестких стенозов.

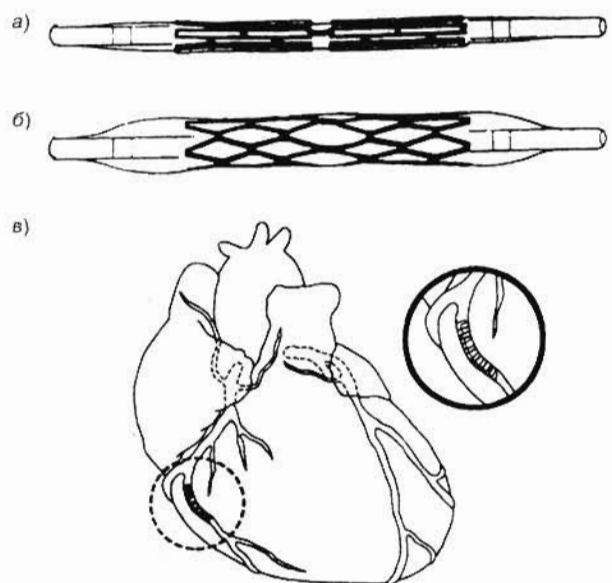
Важная характерная особенность проводников — управляемость, возможность дистанционной передачи на дистальный конец проводника всех манипуляций, выполненных на проксимальном конце проводника с помощью управляющего элемента. При L-образной форме кончика проводника различной кривизны управляемость проводника и шанс катетеризации сложных участков артерии намного выше, чем при манипуляции проводником с прямым кончиком.

Из-за отсутствия полноценной информации о геометрии сосудистого русла, по которому проходит коронарный проводник, и полного отсутствия информации о механических свойствах стенок сосуда, образующих это русло, нет и информации, необходимой для решения вопроса о выборе типа и конструкции проводника.

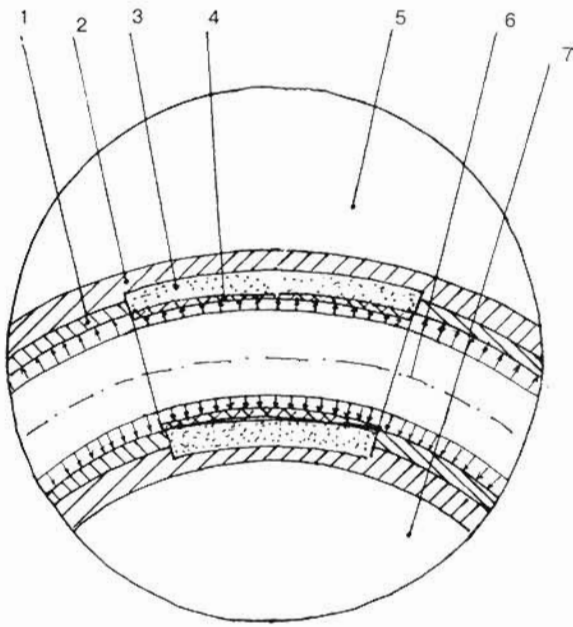
Несовершенство физиологического механизма баллонной дилатации пораженного сегмента артерии, связанное с отсутствием сведений о его механических свойствах, а значит, и о его состоянии после дилатации, обуславливает высокую частоту рестеноза (30–56 %) и необходимость в повторных реваскуляризирующих вмешательствах (повторная ангиопластика или коронарное шунтирование). По этой же причине баллонная коронарная ангиопластика аорто-коронарных шунтов связана с высоким риском дистальной эмболизации тромботическими массами и последующим развитием инфаркта миокарда в зоне вмешательства.

Один из эффективных путей снижения частоты осложнений — применение внутрисосудистых протезов — стентов (рис. 6). Впервые стент имплантировал в коронарную артерию U. Sigwart в 1986 г. В настоящее время 60 % малоинвазивных интервенционных хирургических операций заканчиваются установкой стента [3, 4]. Известно более 50 видов интракоронарных стентов [9]. Их длина составляет от 9 до 50 мм, диаметр — от 2,25 до 6 мм, толщина — от 0,015 до 0,125 мм. По способу установки в сосудах стенты разделяют на расширяемые баллоном (например, Palmaz — Schatz, Gianturo — Roubin, Bi — stent, Wictor) и саморасправляющиеся (например, Wallstent). Стенты изготавливают из нержавеющей стали, титана или нитинола. По технологии изготовления все стенты относят к двум видам: матричные (Palmaz — Schatz, Bi — stent) и проволочные (Gianturko — Roubin, Wictor). В России не налажено производство стентов, а в мировой практике нет обобщающих исследований, кроме клинических, по стентированию артерий.

Исследовать характер напряженно-деформированного состояния в стенте и сегментах дилатированного сосуда при прогнозируемых значениях механических характеристик коронарной артерии позволяет расчетная схема, приведенная на рис. 7. Механические свойства стента (гибкость, радиальная устойчивость, циклопрочность, степень погру-



■ Рис. 6. Схемы стента: а — на баллоне; б — в развернутом состоянии; в — установленного в правой коронарной артерии



■ Рис. 7. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния в структуре стент-сосуд

жения элементов стента в артериальную стенку с неровностью контуров последней) должны определяться не только его конструкцией и материалом [10, 11], но и изменяющимися со временем механическими свойствами и характером деформации как того локального участка, на котором его устанавливают, так и окрестных структур. До настоящего времени не изучен вопрос о биосовместимости стентов и кровеносных сосудов. Нет долговременных исследований по использованию металлических внутрисосудистых изделий, имеющих отличный от сосудов характер напряженно-деформированного состояния.

Врач, выполняющий функции управляющего звена медицинской биотехнической системы, отвечает за выбор цели и реализацию поставленной задачи. При выборе технологии интервенционной малоинвазивной операции он не располагает необходимой информацией о характеристиках элементов системы, диапазоне внешних воздействий, при которых они сохраняют необходимые функциональные свойства. Он может руководствоваться только предшествующим опытом и опираться на свою интуицию.

Отсутствие необходимого информационного обеспечения объясняет тот факт, что до настоящего времени не сложилось общее мнение о технологических принципах интервенционно-хирургических операций, не разработаны конкретные схемы эндоваскулярного лечения каждой патологии, не предложены оптимальные варианты доставки инструмента к пораженному сосуду, не изучены условия минимальной травматизации внутрисосудистых структур при достижении лечебного эффекта.

Врачу, как и любому человеку, присущ сложный механизм целеобразования и необъяснимое до конца влияние мотивизации и эмоционального состояния на качество принимаемых решений [4].

Все это приводит к неоднозначности действий даже при одних и тех же внешних условиях. В результате во многих случаях не удается достичь желаемого лечебного эффекта, и операция сопровождается многими, часто мало прогнозируемыми, осложнениями.

Введение в медицинскую практику новых методов лечения связано с необходимостью значительного расширения и углубления информационного обеспечения. Для оптимизации информации при проведении интервенционных малоинвазивных хирургических операций необходимо решить следующие задачи: 1) разработать способ эндоваскулярного исследования механических свойств стенок кровеносного сосуда; 2) используя аппарат теории оболочек и пакеты прикладных программ, построить алгоритм поведения стенок сосуда с различным характером и степенью атеросклеротического поражения при механических воздействиях; 3) на этой основе разработать систему автоматизированного анализа свойств патологических изменений стенки сосуда; 4) провести статистическую обработку послеоперационного поведения сосудов, относящихся к различным по характеристикам механических свойств группам атеросклеротических поражений; 5) разработать комплексный способ диагностики и анализа возможностей и целесообразности проведения операций на стенозированном сосуде.

Литература

1. **Первый** Всероссийский конгресс по эндоваскулярной хирургии врожденных и приобретенных пороков сердца, коронарной и сосудистой патологии. Сердечно-сосудистые заболевания. — М.: Изд. НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. — 2002. — Т. 3. — № 6. — 107 с.
2. **Textbook** of interventional cardiology, edited by Eric J. Topol, — Philadelphia: W.B.Saunders Company, 1st ed — 1990. — 684 p, 3rd ed, v 1,2 — 1392 p.
3. **Crossman W.** Cardiac Cateterization, Anqioqraphy, and Intervention. — Philadelphia: Wolters Kluwer Company, 2000. — 943 p.
4. **Полечителев Е. П.** Биотехнические системы и технологии на их основе // В кн.: Биомеханические системы в медицине и биологии. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 5–12.
5. **Tenth** complex coronary angioplasty course book, edited by Marco J, Fajadet J. Paris: Europa Edition. — 1999. — 946 p.
6. **Бокерия Л. А., Алекян Б. Г., Бузиашвили Ю. И.** и др. Применение внутрисосудистого ультразвука при эндоваскулярных вмешательствах на коронарных артериях. Сердечно-сосудистые заболевания. — Т. 3. — 2002. — С. 28–29.
7. **Пурин Б. А., Касьянов В. А.** Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. — Рига: Зинатне, 1980. — 260 с.
8. **Бегун П. И., Шукейло Ю. А.** Биомеханика: Учебник для вузов. — СПб.: Политехника, 2000. — 463 с.
9. **Handbook** of Coronary Stents edited by P.W.Seruys. — London: Martin Duntz LTD, 2002. — 424 p.
10. **Dumonlin C., Cochelin B.** Mechanical behaviour modeling of ballon — expandible stents Journal of Biomechanics, 33 (2000). — P. 1461–1470.
11. **Etave F., Finet G., Bojvin M.** Mechanical properties of coronaru stents determined by using finite eliment analysis Journal of Biomechanics 34 (2001). — P. 1065–1075.

УДК 612.821

ИНФОРМАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В БИОУПРАВЛЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ СОСТОЯНИЕМ ЧЕЛОВЕКА

Н. Б. Суворов,

д-р биол. наук, профессор

Санкт-Петербургский Государственный
электротехнический университет (ГЭТУ)

На начальном этапе развития биоуправления действие сигнала обратной связи в виде биологически значимого подкрепления носило преимущественно энергетический характер. Информационная составляющая имела значительно меньший вес — в аналитическом блоке биотехнической системы формировались команды на включение стимулов. В биотехнических системах последних поколений, реализующих принцип соответствия параметров сигнала обратной связи характеру физиологической функции (последовательность включений мышц, ритмическая структура сердечного ритма, артериального давления и т. д.), благодаря установке на успешный конечный результат информационно-мотивационная насыщенность сигнала обратной связи чрезвычайно велика.

Напряжение отдельных систем и организма в целом под влиянием факторов внешней и внутренней среды является источником нервных и нервно-висцеральных нарушений, способствует их хронизации и возникновению устойчивых патологических состояний. В настоящее время доказано, что наряду с экстремальными факторами среды значительное влияние на здоровье человека оказывают многочисленные слабые факторы различной природы, вызывающие зачастую парадоксальные и несоизмеримые с их дозой или мощностью биологические эффекты вследствие невключения адаптационных механизмов, кумуляции и постепенно нарастающего хронического стресса, приводящего в конечном итоге к росту общей заболеваемости. Они представляют высокую опасность из-за отсутствия негативных первичных реакций, развивающихся в основном по неспецифическому активационному типу. Известно, что ранние отклонения от нормы длительное время носят функциональный характер и проявляются в виде деструкции биоритмологических процессов. В случаях своевременного выявления коррекция этих нарушений если и проводится, то, как правило, фармакологическими методами. Развитие же лекарственной болезни вследствие длительной и зачастую избыточной фармакотерапии представляет существенную угрозу здоровью.

В связи с этим большое значение приобрели методы нефармакологического воздействия, к которым относятся психотерапия, аутогенная тренировка, биоуправление с обратной связью (БОС). Последнее хорошо зарекомендовало себя как совокупность методов, направленных на мобилизацию резервных возможностей организма за счет тренировки и повышения лабильности регулятор-

ных механизмов. Появились новые подходы в изучении механизмов адаптации и адаптивной саморегуляции функций, для исследования и коррекции которых использованы приемы биоуправления с обратной связью, — научные разработки этих идей начаты более четырех десятилетий назад. В нашей стране они связаны с именем чл.-корр. РАНН Н. Н. Василевского [1].

Биологическая система, находящаяся в естественных условиях в непрерывном взаимодействии с внешней средой, всегда стремится за счет внутреннего динамизма выбрать из множества возможных единственное состояние, обеспечивающее наиболее благоприятный приспособительный эффект. Она приобретает максимальную устойчивость к изменениям окружающей среды при широком диапазоне ее «поисковых» движений (колебаний физиологических функций). Сейчас признано, что уровень развития колебательных и циклических форм биологической активности является необходимой мерой адаптивности организма. Биологическим системам с многочисленными цепями внутренних связей присуща активная форма поиска наиболее биологически целесообразных состояний. Обратные связи служат целям информирования управляющих центров организма о качестве приспособления к условиям внутренней и внешней среды, а также получении энергии для его реализации.

Поддержание существенных переменных биосистем в физиологических пределах также тесно связано с колебательным характером нервных процессов. Живые системы осуществляют динамическое регулирование своих функций, поиск и воспроизведение оптимальных режимов деятельности посредством модуляции своих биоритмов. Прием и переработка информации о состоянии

биообъекта, «принятие решения», оценка его эффективности по конечному результату требуют определенного времени, из-за чего в сенсорных и регуляторных цепях неизбежно возникают временные задержки, которые также являются причинами эндогенных колебаний и циклических процессов в биосистемах. Таким образом, в динамике адаптивного регулирования органных и организменных функций выделение биоритмов представляется важным для понимания их роли в структурно-функциональной организации целостной деятельности. Биоритмы играют важную роль в регулировании на молекулярном и клеточном уровнях, в функционировании механизмов памяти, в сфере энергетических и информационных процессов.

Адаптивные свойства необходимо изучать в неразрывной связи с динамикой внешних воздействий, поэтому исследователи стали использовать статистические модели окружающей среды, с которой объект должен взаимодействовать по заранее заданному или формируемому в ходе взаимодействия адаптивному алгоритму. Эти условия наряду с непрерывным контролем физиологического состояния объекта в сочетании с взаимозависимостью интенсивности и качества биологически значимого раздражения от этого состояния были осуществлены в режиме «управляемого эксперимента».

Управляемый эксперимент — это метод системного исследования и системно-статистического анализа, при котором совокупность воздействий на исследуемый объект находится в функциональной причинно-следственной связи с состоянием его измеряемых и регулируемых параметров.

Исследуемая система должна быть формализована так, чтобы это не приводило (в рамках поставленной задачи) к существенной потере информации и чтобы в любой момент времени ее можно было описать конечным набором величин $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$. Эти переменные являются компонентами вектора состояния $X(t)$. Постоянное знание текущего состояния системы и оптимальное преобразование совокупности координат объекта используется для прогнозирования его дальнейшего поведения. Многошаговый процесс выбора целесообразного поведения состоит в том, что принимается лишь та последовательность действий, которая соответствует наилучшей траектории. Независимо от исходного состояния и первоначальных реакций все последующие действия должны неизбежно приводить систему к достижению конечного физиологического результата. Аналитический модуль биотехнической системы осуществляет преобразование совокупности текущих координат (переменных) объекта для характеристики его поведения во времени. При этом в каждый момент времени биологический объект может влиять на энерго-информационную структуру внешних воздействий путем динамической оценки вектора состояния, имеющего $(n + 1)$ координат

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_i(t) \\ \dots \\ x_n(t) \\ q_i(t) \end{pmatrix},$$

где $q_i(t)$ — контролируемое внешнее воздействие ($i = 1, 2, \dots, m$). Тогда поведение системы описывается совокупностью векторов состояния $X(t_1)$, $X(t_2)$, ..., $X(t_m)$. В пространстве этих векторов выделяется область P , соответствующая требуемому состоянию биосистемы. Аналитический модуль в каждый момент времени фиксирует последовательно положение векторов и при выходе вектора состояния $X(t_i)$ из области P вырабатывает сигнал, управляющий внешними стимулами.

На начальном этапе развития биоуправления как научного направления в области экспериментального изучения физиологических механизмов саморегуляции, адаптации и поведения животных действие сигнала обратной связи в виде биологически значимого подкрепления носило преимущественно энергетический характер («управляемый эксперимент» конца 50-х — начала 70-х годов). Как правило, пересечение регулируемой функцией сверху/снизу некоторого заданного уровня (порога) приводило к включению электростимулятора, формирующего околопороговые электрокожные стимулы. Информационная составляющая имела значительно меньший вес — в аналитическом блоке биотехнической системы лишь формировались команды на включение стимулов.

Биологически значимая электростимуляция, синхронизированная с определенными фазами биоритма, способствовала устойчивой минимизации отрицательного энергетического воздействия, т. е. имела место реакция избегания тех форм биологической активности, которые вызывали электростимуляцию. При положительном (например, пищевом) подкреплении наблюдалась максимизация стимулируемых форм активности. Так вырабатывались новые двигательные стереотипы, мышечное чувство, снижалась или повышалась частота сердечных сокращений, были попытки воздействовать на артериальное давление. Терапевтическая эффективность таких процедур была невысокой.

В настоящее время под технологией управления с биологической обратной связью понимают комплекс исследовательских и лечебных процедур, в ходе которых пациенту посредством внешней цепи обратной связи, организованной преимущественно с помощью компьютерной или микропроцессорной техники (биотехнической системы), предъявляется информация о состоянии и изменении тех или иных регулируемых физиологических процессов. Процедура позволяет в течение 10–15 сеансов при активном участии испытуемого развить навыки саморегуляции и самоконтроля, производить коррекцию собственного состояния.

В биотехнических системах последних поколений, реализующих принцип соответствия параметров сигнала обратной связи характеру физиологической функции (последовательность включения мышц, колебательная структура сердечного ритма, артериального давления, нормализация собственной электроэнцефалограммы и т. д.) [2], благодаря установке на успешный конечный результат информационно-мотивационная насыщенность сигнала обратной связи чрезвычайно велика. В качестве подкрепляющего фактора используются специально подобранные видеоклипы, видеопленки, музыка, в том числе «музыка мозга». Активно развиваются мультимедийные и соревновательные сюжеты. Необходимо подчеркнуть, что достигнутый в

результате тренинга и осознанный пациентом положительный результат является дополнительным «допингом» — информационной обратной связью подкрепляющего (положительного) характера. При этом в управление включаются как произвольно, так и непроизвольно регулируемые механизмы. Положительный клинический результат устойчив в течение длительного времени.

Таким образом, организм рассматривается как целостная динамическая система, все элементы которой самоуправляются и саморегулируются по принципу внешних и внутренних обратных связей. Последние обеспечивают непрерывную афферентную информацию о состоянии основных констант организма. Регулирование касается всей системы в целом и разных ее уровней, которые обладают относительной автономией, и, будучи связаны между собой, образуют многоуровневую систему, высшие центры которой контролируют нижележащие.

Не претендуя на исчерпывающий анализ проблемы биологических обратных связей, мы обращаем внимание преимущественно на ее методологическую и практическую стороны и актуальные вопросы информатизации исследований. Стало очевидным, что генеральная линия развития определяется внедрением компьютерных (микропроцессорных) методик, обеспечивающих реализацию принципа системной регуляции «непроизвольных функций», направленной на нормализацию их биоритмологической структуры.

Как известно, регулирование непроизвольной функции осуществляется при помощи внешней искусственной обратной связи, включенной в сферу произвольного контроля, т. е. ассоциативным путем. На основе этого у человека вырабатывается своеобразный условный рефлекс, и он обучается хорошо владеть той функцией, которая прежде вообще или почти не поддавалась произвольному управлению.

На протяжении почти полувековой истории биоуправления с обратной связью (biofeedback) в медицине не утихает дискуссия об эффективности этого метода произвольной (принудительной) регуляции, о его возможностях в анализе фундаментальных закономерностей интегративной работы мозга и о перспективах его практического применения в клинике, прикладной психологии и физиологии. Эффективность — свойство системы, которое раскрывается через реализацию определенной целевой функции и объективно выражается степенью ее достижения с учетом затрат ресурсов и времени [3]. Эффективность биоуправления с обратной связью приравнивается либо к принципиальной возможности управления заданной функцией, либо к оценке величины выработанных сдвигов, либо к их устойчивости и воспроизводимости во время и после исследования, либо к возможности произвольного их воспроизведения без сигналов обратной связи, либо к клиническим результатам. Очевидно, понятие эффективности БОС в таком широком смысле не имеет однозначного толкования. Многочисленными исследованиями установлено, что цель произвольного биоуправления может быть достигнута в отношении практически любой произвольной и непроизвольной нервной, вегетативной и соматической функции. Однако величины и устойчивость выработанных сдвигов чрезвычайно разнообразны. В пер-

вую очередь это связано с физиологическими особенностями тренируемой функции, например, с пластичностью, с ее максимальной близостью к произвольно управляемым процессам [2, 4, 5].

В настоящее время теоретический раздел биоуправления с обратной связью достаточно проработан для того, чтобы сводить анализ эффективности (при адекватном выборе аппаратных средств и рациональном способе их использования на каждом шаге управления) в первую очередь к оценке терапевтического результата. Однако, комплексные критерии клинической эффективности, несмотря на важное прикладное значение методологии биологических обратных связей, остаются недостаточно разработанными. Дело в том, что в большинстве случаев БОС не может рассматриваться в качестве основного патогенетического приема лечения. Оно пока остается вспомогательным методом, особого рода психофизиологической поддержкой, устраняющей дизрегуляторные симптомы при патологии, поэтому результаты тренинга необходимо оценивать только комплексно по выраженности отдельных параметров, симптомов и синдромов.

Наибольшая эффективность установлена для биоуправления скелетной мускулатурой в терапевтических и спортивно-тренировочных целях посредством слуховых, зрительных, электромиографических обратных связей в сочетании с релаксацией и психофизиологической поддержкой. Есть данные об эффективности дыхательной тренировки при терапии некоторых заболеваний на стадии реабилитации. Точность собственной оценки временных интервалов также поддается коррекции за счет обратных связей. Что касается регуляции непроизвольных функций (нервных и вегетативных) в терапевтических целях, то по существу исследования продолжают находиться на стадии поисков и клинических испытаний.

Относительно несложной представляется задача произвольного управления температурой различных участков тела, избавления от головной боли. Большая методическая изолированность требуется для инструментального управления артериальным давлением (АД). Нормализация АД в некоторых случаях оказывается неспецифическим сопутствующим эффектом.

Первостепенную роль в проблеме эффективности играет безопасность процедуры с точки зрения состояния испытуемого (пациента). Снизить вероятность нежелательных эффектов от действий лица, проводящего сеанс биоуправления, позволяет введение в интеллектуальную часть биотехнической системы программного адаптивного модуля, который, непрерывно анализируя текущее состояние, не позволяет формировать внешнюю среду, провоцирующую выход физиологических параметров конкретного испытуемого за пределы его индивидуальной физиологической нормы. Необходимой составной частью такого модуля является как база знаний, так и экспертная система. Организованное таким образом адаптивное биоуправление повышает качество процедуры с точки зрения получения устойчивого полезного приспособительного эффекта. Клиническая эффективность БОС повышается при непосредственной и непрерывной оценке результатов.

Экспериментальные исследования и клинические испытания многочисленных приемов БОС про-

водятся в течение многих лет. Полученные результаты заложили основу нового направления в компьютерных БОС-технологиях — колебательное или знакопеременное биоуправление [4, 6], эффективность которого подтверждена многочисленными клиническими испытаниями на различных группах больных. Подобная технология в силу физиологической адекватности и близости к биоритмологическим процессам в регуляторных механизмах позволяет выявлять и восстанавливать естественные (собственные) биологические ритмы организма. Пациент не ставится в рамки «жесткой» инструкции, ему предлагается лишь следовать за текущей динамикой регулируемого процесса, биоритм которого нуждается в коррекции (с предъявлением «целевой» функции или без нее).

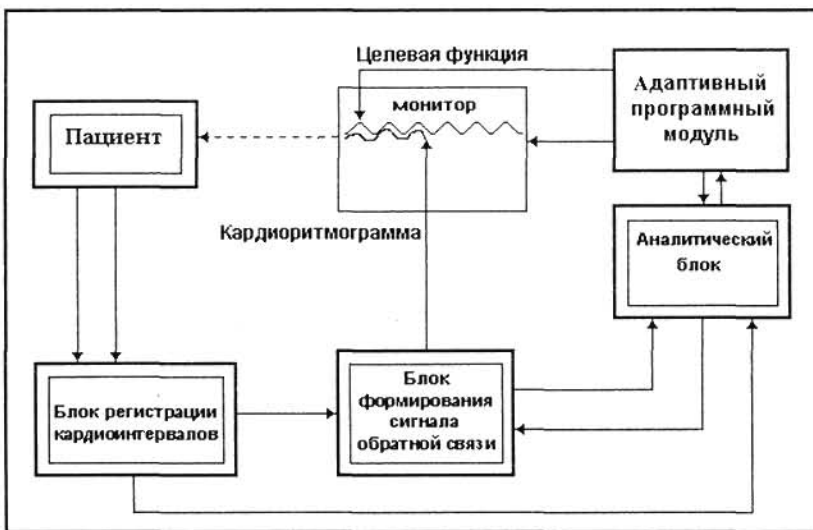
Подавляющее большинство физиологических функций имеет колебательный характер. Особо был выделен диапазон 8–30 с — адаптогенные биоритмы. С биоритмологической динамикой внутри этого диапазона исследователи связывают развитие адаптационных и гомеостатических процессов в организме. Периодические составляющие адаптогенного диапазона были приняты в качестве основных временных констант знакопеременной обратной связи. Изуче-

ние механизмов знакопеременного управления кардиоритмом как информативного способа контроля состояния сердечно-сосудистой системы открыло пути к его коррекции через механизмы саморегуляции организма.

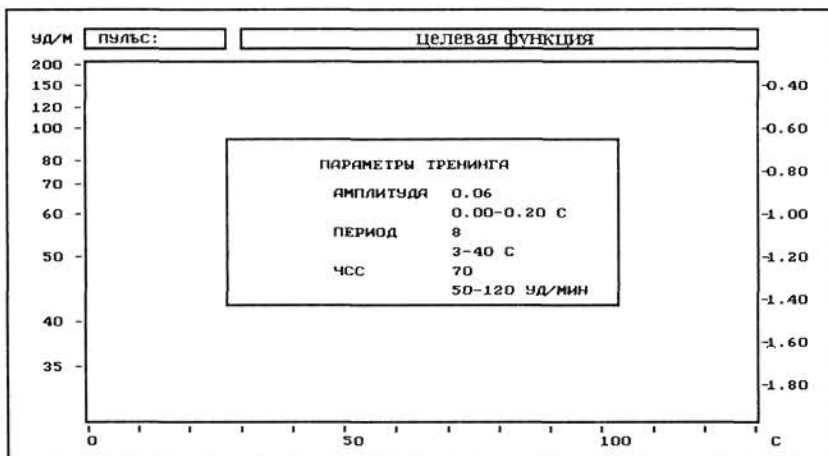
Суть знакопеременного кардиотренинга состоит в одновременном предъявлении на экране перед испытуемым двух функций — собственной кардиоритмограммы (КРГ) и целевой синусоиды, периоду и амплитуде которой необходимо следовать во время тренинга. Таким образом, задача периодического повышения/понижения (перемена знака колебаний сердечного ритма) частоты сердечных сокращений (ЧСС), направленная на нормализацию биоритмологической структуры, становится реальной. Технология знакопеременной БОС предназначена для оценки адаптационных возможностей сердечно-сосудистой системы; тренировки сердечного ритма в адаптивной системе биоуправления; выработки навыков саморегуляции и расслабления; повышения уровня адаптационных возможностей и работоспособности; применения в качестве дополнительного средства предварительной диагностики. Комплекс применяется также для систематического обследования лиц, находящихся в состоянии профессионального, экологического, психологического или социального напряжения (стресса); спортсменов до и после тренировок; для аутотренинга при нервных и физических нагрузках.

На рис. 1 представлена схема биотехнической системы с обратной связью (БТСОС). После обработки в блоке регистрации и формирования сигнала обратной связи на экран компьютера в реальном времени предъявляется КРГ пациента. Аналитический блок в автоматическом режиме производит анализ данных, полученных при математической обработке КРГ и введенных дополнительных параметров. Результатами автоматической обработки кардиоритмограмм являются: гистограммы распределения кардиоинтервалов, частотные спектры КРГ, интенсивности волн спектра КРГ, скаттерграммы кардиоинтервалов. Ряд вторичных показателей определяется по стандартным формулам.

После формирования и обработки на монитор компьютера в реальном времени предъявля-



■ Рис. 1. Блок-схема биотехнической системы

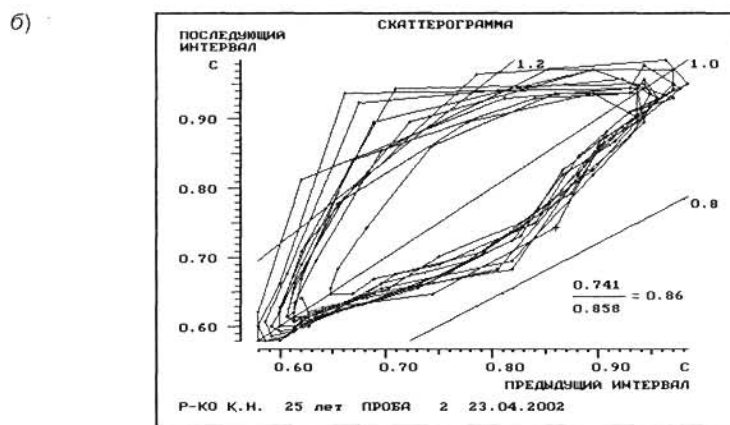


■ Рис. 2. Параметры целевой функции на пробу: амплитуда — 0,06 с размах — 0,12 с; период — 8 с; постоянная составляющая — 70 уд/мин; параметры определены на основании анализа предыдущей пробы

ется сигнал обратной связи в виде огибающей кардиоритмограммы пациента, характеризующей поударную ЧСС. Одновременно на экран выводится синусоидальная кривая — целевая функция (ЦФ), с амплитудой и периодом которой пациент должен стараться совмещать собственную КРГ во время тренинга (рис. 2). «Отслеживание» ЦФ удается за счет ритмичного дыхания, определенного ее периодом (при вдохе ЧСС растет, при выдохе — падает). Наличие в КРГ дыхательных колебаний является благоприятным диагностическим признаком. Пример эффективного отслеживания ЦФ при непрерывном зрительном контроле приведен на рис. 3, а. Качество отслеживания ЦФ определялось по коэффициентам кросс-корреляции с учетом фазового сдвига и среднеквадратическому отклонению. Результаты тренинга признавались удовлетворительными при достоверно высоком коэффициенте кросс-корреляции.

Процедура кардиотренинга состоит в следующем. Двухминутная регистрация КРГ (как фоновая, проводимая в состоянии расслабленного бодрствования с закрытыми глазами, так и активная) названа «пробой», «сеанс» — последовательность из нескольких проб длительностью 30–40 мин. Серия из 10–15 и более сеансов, проводимых через день или ежедневно, образует «цикл».

ЦФ на каждую двухминутную пробу тренинга формировалась впервые использованным в практике биоуправления адаптивным программным модулем, функции которого достаточно разнообразны. В описываемой БТСОС он служит для создания гибкого режима предъявления целевых синусоид, способствующего расширению адаптивных свойств системы регуляции кардиоритма. Параметры ЦФ для каждой пробы биоуправления формировались автоматически по результатам спектрального анализа путем быстрого преобразования Фурье предыдущей кардиоинтервалограммы. В адаптивном модуле также анализировались средняя ЧСС, период и амплитуда дыхательных волн после каждой пробы биоуправления. При успешном выполнении пробы задание на каждую последующую пробу усложнялось, в противном случае происходило упрощение задачи отслеживания. Чрезвычайно важно, чтобы повышение/сни-



■ Рис. 3. а — активная проба — отслеживание целевой функции — синусоиды, элемент тренинга для усиления дыхательного компонента в сердечном ритме. Период целевой функции (ЦФ) — 10,71 с, амплитуда — 0,05 с, период основной (собственной) гармоника кардиоритмограммы (КРГ) — 10,71 с, ее амплитуда — 0,171 с. По горизонтали — текущее время (с), по вертикали слева — мгновенная частота сердечных сокращений (уд/мин), справа — длительность RR-интервала (с). В рамке слева вверху — средняя частота сердечных сокращений за эпоху 120 с. В рамке в центре — фазовый сдвиг между КРГ и ЦФ, коэффициент кросс-корреляции и среднеквадратическое отклонение (СКО) между ними для реального процесса и при совмещении кривых (фазовый сдвиг равен 0 с); б — скаттерограмма или зависимость последующего RR-интервала от предыдущего для КРГ (см. рис. 3, а). Отношение (дробь) внизу справа — в числителе величина $RR(i+1)$, в знаменателе — величина RRi в координате, обозначенной знаком +, $F = 4.326$; в — гистограмма распределения RR-интервалов КРГ и некоторые параметры сердечного ритма

■ Таблица. Значения коэффициентов K при различных значениях средней частоты сердечных сокращений (уд/мин)

ЧСС	< 40	40-44	45-54	55-59	60-65	66-70	71-80	81-90	91-100	> 100
K	9,0	6,0	3,0	1,5	1,0	1,5	2,5	5,0	8,0	10,0

жение сложности задания являлось незаметным для пациентов. Параметры ЦФ при необходимости могли изменяться с клавиатуры. Следовало также ограничить влияние положительной эмоциональной обратной связи (при успешном выполнении задания) во избежание выхода некоторых показателей за пределы физиологической нормы. Поэтому в состав адаптивного программного модуля входит специально разработанная экспертная система, которая контролирует параметры ЦФ.

В процессе подобных тренировок в спектре КРГ появлялись исходно отсутствующие высокоамплитудные гармоники — биоуправление способствовало усилению дыхательно-сердечных взаимодействий и формированию собственных частот кардиоритма в области быстрых или медленных волн.

Колебательный режим, направленный на попеременное торможение и активацию ритмической активности синусового узла, является адекватным приемом для изучения особенностей произвольной дыхательной модуляции кардиоритма. Эти свойства лежат в основе профилактического, терапевтического, реабилитационного и мобилизационного действия комплекса.

Как уже указывалось, программное обеспечение БТСОС позволяет в автоматическом режиме производить анализ данных, полученных при математической обработке КРГ и дополнительных показателей (после каждой пробы в базу данных заносилось АД, рассчитывались пульсовое давление, среднее динамическое давление, ударный объем кровообращения, минутный объем кровообращения, периферическое сопротивление и др.).

Скаттерограмма, соответствующая КРГ на рис. 3, а, отображена в виде точек на плоскости, последовательно во времени соединенных между собой (рис. 3, б). В диагностике нарушений сердечного ритма большое значение придается форме скаттерограммы, для чего применяют разнообразные приемы [7, 8]. Форму скаттерограммы можно также оценить следующим образом

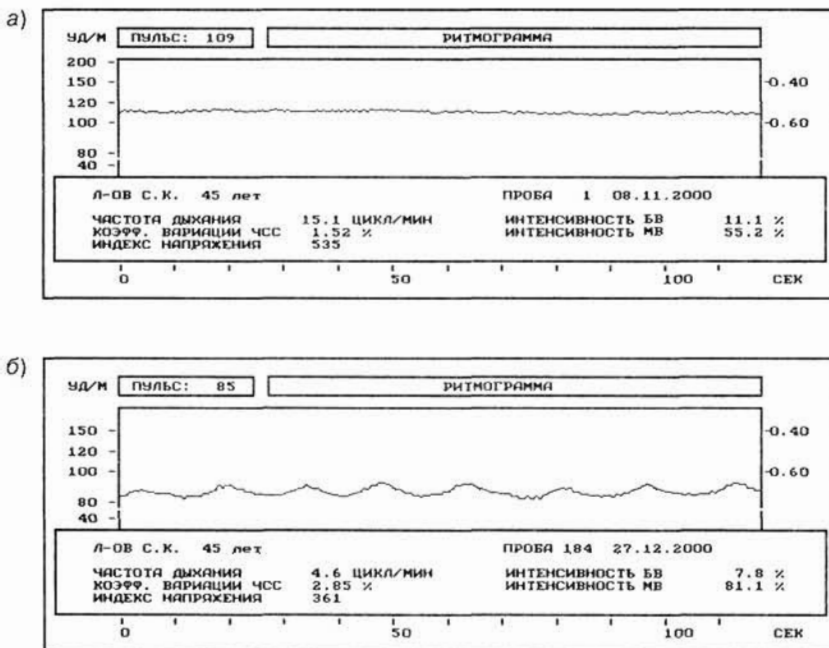
$$F = K \times L / 2\sqrt{\pi \times S},$$

где L — период внешнего контура скаттерограммы; S — ее площадь.

Очевидно, что скаттерограммы могут иметь близкие формы при разных средних частотах пульса и при этом их коэффициенты формы (фрактальные коэффициенты) также будут мало различаться между собой. На основании многочисленных исследований, подкрепленных литературными данными, были определены значения K для различных средних частот сердечного ритма (см. таблицу). При такой оценке диагностически благоприятными с точки зрения биоритмологической структуры сердечного ритма будут низкие значения F .

Гистограмма распределения кардиоинтервалов КРГ (рис. 3, а), представлена на рис. 3, в. Для количественной оценки процессов регуляции сердечного ритма использованы общепринятые параметры: индекс напряжения регуляторных систем $ИН = AMo/2 \times Mo \times dRR$ — отражает степень централизации управления сердечным ритмом (AMo — амплитуда моды в процентах, Mo — мода в секундах, $dRR = RR_{\max} - RR_{\min}$ — вариационный размах в секундах, индекс вегетативного равновесия $ИВР = AMo/dRR$, вегетативный показатель ритма $ВПР = 1/Mo \times dRR$ ($ИВР$ и $ВПР$ характеризуют отношения в симпатической и парасимпатической регуляции работы сердца), показатель адекватности процессов регуляции $ПАПР = AMo/Mo$ (для выявления соответствия между уровнем функционирования синусового узла и симпатической активностью).

Основным критерием кардиотренинга была признана его клиническая эффективность, которая складывалась из объективных данных (АД, средняя частота пульса и дыхания, дыхательно-сердечная синхронизация, результаты электроэнцефалографического обследования и психологического тес-



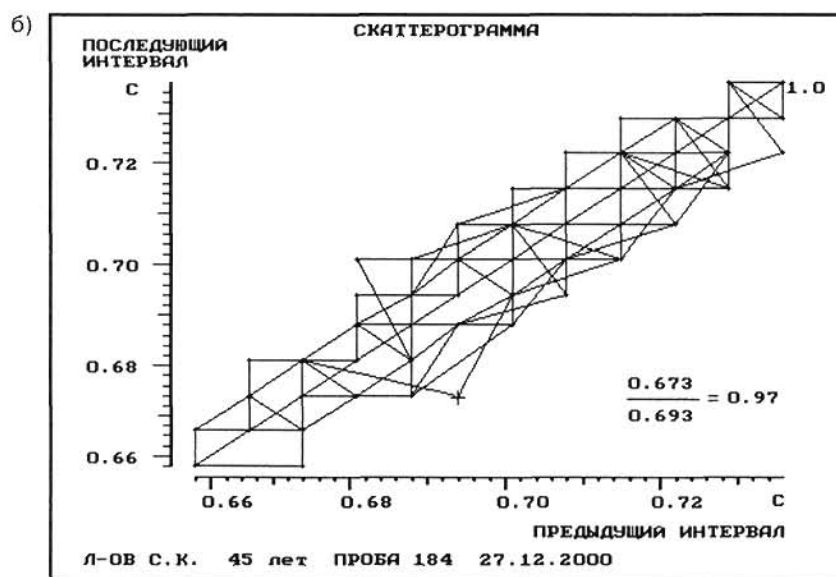
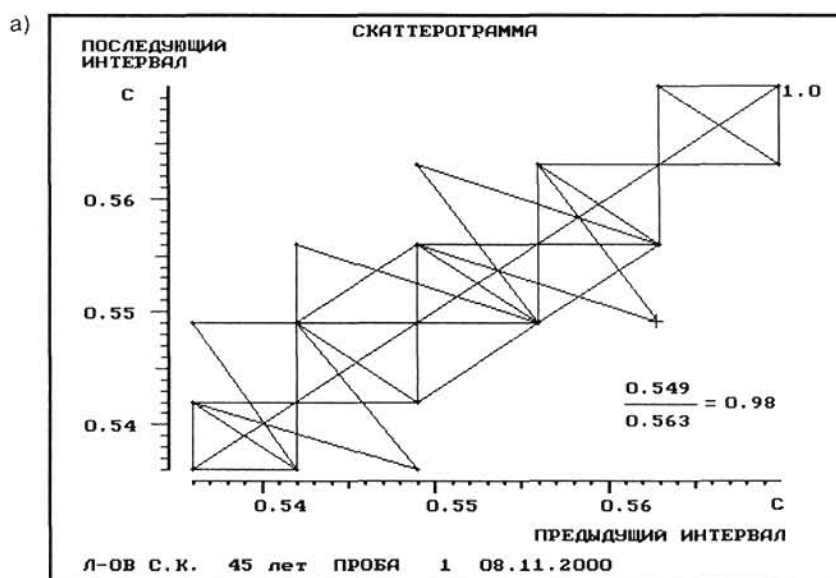
■ Рис. 4. а — исходная КРГ пациента в состоянии расслабленного бодрствования с закрытыми глазами — ригидный ритм. БВ — диапазон быстрых волн КРГ, МВ — медленные волны. Остальные обозначения те же, что и на рис. 3, а; б — заключительная КРГ пациента в состоянии расслабленного бодрствования с закрытыми глазами — дыхательно-сердечная синхронизация в диапазоне медленных волн. Обозначения те же, что и на рис. 3, а и 4, а

тирования реактивной и личностной тревоги, которые проводились в начале и конце каждого сеанса кардиотренинга) и субъективных жалоб больных. Положительные результаты полного цикла тренинга представлены на рис. 4 и 5.

Пациент Л-ов, страдающий гипертонической болезнью с 1984 г., максимальное АД — 200/140 мм рт. ст. В анамнезе: острый инфаркт миокарда. Объективно: АД — 180/120 мм рт. ст., ригидный ритм, ЧСС 109 уд/мин. Рекомендовано проведение цикла БОС — пациенту предстояло уловить слабые колебания КРГ на фоне ригидного ритма. Для формирования синусового ритма он располагался в удобном положении и, следуя инструкции, дышал спокойно, растягивая фазы вдоха и выдоха. Через четыре сеанса амплитуда КРГ несколько увеличилась, что дало возможность пациенту синхронизировать вдох с фазой подъема, а выдох — с фазой снижения КРГ. После восьми сеансов КРГ приобрела колебательный характер, что позволило восстановить дыхательно-сердечную синхронизацию и снизить ЧСС. Для закрепления навыка потребовалось 184 пробы в 23 сеансах. На фоне дыхательно-сердечной синхронизации в диапазоне медленных волн произошел рост вариационного размаха КРГ с 0,05 с до 0,15 с. Пациент отмечал значительное улучшение общего состояния. Объективно: снижение АД до 145/105 мм рт. ст., уменьшение ЧСС с 109 до 85 уд/мин, КРГ см. рис. 4, скаттерграммы — рис. 5.

Адаптивный характер управления сеансом и автоматическое предъявление задания позволяет после соответствующей консультации с врачом проводить тренинг самостоятельно (дома или на рабочем месте) без непосредственного медицинского контроля. Для восстановления дыхательного ритмического компонента КРГ, нормализации ЧСС и АД при функциональной дисрегуляции кардиоваскулярной системы или других нарушениях рекомендуется полный тренировочный цикл.

Для контролируемого восстановления (реабилитации) после тренировок, соревнований, тяжелых физических нагрузок, вахт, стрессовых ситуаций может быть достаточно одного—пяти тренировочных сеансов, проведенных на основе тех же принципов с учетом специфики нагрузки и индивидуальных особенностей испытуемого.



■ Рис. 5. а — скаттерграмма, соответствующая КРГ на рис. 4, а. Обозначения те же, что и на рис. 3, б. $F = 39.478$; б — скаттерграмма, соответствующая КРГ на рис. 4, б. Обозначения те же, что и на рис. 3, б. $F = 16.864$

Биоуправление может выступать в качестве диагностического теста, позволяющего выявлять скрытые при обычных регистрациях КРГ особенности организации и регуляции кардиоритма.

Биоуправление имеет большое значение для «мобилизационной» предстартовой психофизиологической подготовки человека-оператора сложных систем управления — снимается избыточное напряжение, нормализуется вегетативный баланс, формируются или активизируются навыки самоконтроля.

Непрерывное наблюдение за периодическими колебаниями длительностей кардиоинтервалов, соответствующими по периоду и амплитуде эталонной синусоиде, убеждало испытуемых в возможности направленного управления процессом и служило положительным информационным стимулом для дальнейших активных тре-

нировок. Именно знакопеременная обратная связь информационно и биоритмологически совместима с жизненно важными функциями организма и позволяет тренировать регуляторные процессы в их естественном временном диапазоне путем усиления или торможения существующих, воссоздания утраченных или функционально «заторможенных» энергоинформационных связей между отдельными подсистемами организма. Эта методика не предполагает искусственного изменения уровня функции и не затрагивает гомеостатические механизмы, которые противодействовали бы тренингу.

Работа с пациентами показала, что знакопеременная обратная связь полезна при артериальной гипо- и гипертензии, вегето-сосудистой дистонии, тахикардии, ригидности сердечного ритма, бронхиальной астме, головных болях и др.

Включение в сферу произвольной регуляции ЧСС таких факторов индивидуальности, как сознательный контроль поведения, эмоциональная устойчивость в сочетании с азартом, подкрепляемым наглядным положительным результатом тренинга, обуславливают снижение реактивной тревоги и улучшение самочувствия и настроения.

Приведенные результаты подтверждают целесообразность использования интеллектуальных компьютерных комплексов с информационно-управляющей обратной связью для экспресс-оценки, прогноза и коррекции функционального состояния человека в кабинетах диагностики и реабилитации в медсанчастях, поликлиниках и стационарах, в санаториях и профилакториях, в медпунктах в автономных и вахтовых условиях деятельности, в спортивных диспансерах и физкультурно-оздоровительных комплексах, дома или на рабочем месте. Индивидуализированные ЭВМ-методики открывают неограниченные возможности для варьирования условий проведения сеансов — вводить ложную информационную обратную связь, менять частоту смены активационных и тормозных сигналов, тестировать устойчивость биоэффектов на непосредственно тренируемой функции и на совокупности других, сопряженных с нею процессов. Разработка миниатюрных микропроцессорных БТСОС индивидуального пользования в режиме телемедицины значительно расширит возможности профилактического применения знакопеременной

обратной связи как экологически чистой медицинской технологии.

Знакопеременный ЧСС-тренинг с адаптивной информационно-мотивационной обратной связью, отличающийся периодической сменой активации и торможения управляемой функции в пределах индивидуальной физиологической нормы, осуществляет безопасную тренировку симпатических и парасимпатических механизмов кардиоваскулярной системы, расширяет динамический диапазон регуляторных процессов в других системах организма. Эффект знакопеременного тренинга может длительно сохраняться — у 90 % испытуемых положительные результаты сохранялись более года.

Литература

1. **Василевский Н. Н., Суворов Н. Б., Трубачев В. В.** Устойчивые изменения частоты и синхронности разрядов нейронных популяций в экспериментах с обратной связью // Доклады АН СССР. — 1972. — Т. 206. — № 2. — С. 510–512
2. **Биоуправление** — 3. Теория и практика / Под ред. М. Б. Штарк, Р. Калл. — Новосибирск. — 1998. — 300 с.
3. **Надежность и эффективность в технике. Т. 3. Эффективность технических систем** / Под ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. — М.: Машиностроение, 1988. — 328 с.
4. **Суворов Н. Б.** Адаптивные системы знакопеременного биоуправления // В кн.: Телемедицина. Новые информационные технологии на пороге XXI века / Под ред. Р. М. Юсупова и Р. И. Полонникова. — СПб.: СПИИ РАН, 1998. — С. 253–272
5. **Суворов Н. Б.** Биологическая обратная связь и эффективность управления состоянием организма человека // В кн. Биотехнические системы в медицине и биологии. — СПб.: Политехника, 2002. — С. 13–20
6. **Василевский Н. Н., Сидоров Ю. А., Суворов Н. Б.** О роли биоритмологических процессов в механизмах адаптации и коррекции регуляторных дисфункций // Физиология человека. — 1993. — Т. 19. — № 1. — С. 91–98
7. **Дембо А. Г., Земцовский Э. В.** Спортивная кардиология. — Л.: Медицина, 1989. — 464 с.
8. **Машин В. А., Машина М. Н.** Анализ variability сердечного ритма с помощью метода графа при различных функциональных состояниях // Вопросы психологии. — 2002. — № 2. — С. 99–111.

«МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ»: СОВРЕМЕННО И СВОЕВРЕМЕННО

Взяв в руки верстку книги «Микропроцессорные системы» под ред. Пузанкова Д. В., я невольно вспомнил книгу Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: Справочник / С. Т. Хвоща, Н. Н. Варлинский, Е. А. Попов; Под общ. ред. С. Т. Хвоща. — Л.: Машиностроение, 1987. — 640 с.: ил. Конечно, до и после 1987 года издавались и другие книги, но эта в то время удивила не только своим тиражом (87 000 экз.) и объемом, но и полнотой изложения материала по существующим на тот момент отечественным микропроцессорным семействам, процессорам цифровой обработки сигналов, интерфейсам и системам на их основе.

Однако с того времени многое изменилось. К великому сожалению, практически перестала существовать отечественная микропроцессорная база. Развитие же зарубежных микроэлектронных технологий происходило такими стремительными темпами, что трудно найти этому аналогичное сравнение в других областях техники. Следствие этого и одновременно показатель стремительности развития — переход фирм-производителей к выпуску микропроцессорных семейств и целых платформ, появление новых фирм, выпускающих микропроцессоры и микроконтроллеры под малоизвестными, на настоящий момент, торговыми марками.

Неизбежно произошедший переход отечественных производителей микропроцессорной техники на импортную комплектацию повлек за собой необходимость пересмотра подготовки российских инженеров по многим специальностям в области информационных технологий, вычислительной техники, микроэлектроники, систем управления и др. Теперь, если идти в ногу со временем, в реально сложившихся в России условиях необходимо ориентироваться на современные достижения зарубежных производителей, таких как Intel, Motorola, Analog Devices, Microchip и др. Неизбежно появляется необходимость в книгах и особенно учебниках, систематизирующих информацию в этой области вычислительной техники, а также в описании современных тенденций в проектировании микропроцессоров, микроконтроллеров, программируемой логики и систем на их основе.

Именно такой, по моему мнению, может стать упомянутая выше книга под редакцией Пузанкова Д. В., планируемая к печати в 2002 году издательством «Политехника», с содержанием которой мне довелось ознакомиться. Она продолжит длинный перечень книг, издаваемых по традиционной для издательства микропроцессорной тематике, в том числе современной (Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. — СПб.: Политехника, 1998. — 592 с.; Пухальский М. Е. Проектирование микропроцессорных систем. — СПб.: Политехника, 2001. — 544 с.).

Книга не претендует на то, чтобы ее рассматривали как справочник или энциклопедию. Очевидно, что в современных условиях создать и то и другое по микропроцессорной тематике проблематично, имея в виду тот факт, что большинство ведущих фирм-производителей выпускают в год до 50 и более новых микропроцессоров. Для знакомства с ними достаточно среднего знания английского языка и доступа к ресурсам фирм-производителей в сети Internet. Более важная в таких условиях задача — осветить вопросы, связанные с тенденциями и закономерностями развития микропроцессорной базы и средств поддержки разработок на ней с учетом достижений полупроводниковой технологии и требований практики проектирования систем — от универсальных до встраиваемых приложений. Именно поэтому значительное место в книге занимают сведения, ставшие классическими на настоящее время.

При подготовке к публикации книги объемом 78 печ. л. авторский коллектив (Александров Е. К., Грушвицкий Р. И., Куприянов М. С., Панфилов Д. И., Ремизевич Т. В., Татарин Ю. С., Угрюмов Е. П., Шагулин И. И.), очевидно, затратил немало усилий на сбор, систематизацию, детализацию излагаемого материала. Его содержание и характер изложения соответствуют учебникам. В многообразии материала, вошедшего в книгу, авторы нашли удачное сочетание обзора «сверху» и детализации в нужном месте, фокусируя внимание читателя на отдельных достоинствах, а в ряде случаев на тонкостях, при изложении которых чувствуется богатый практический опыт авторов.

Конечно, многие инженерные коллективы не найдут в книге и упоминания о микропроцессорах и микроконтроллерах, на которых они «стоят» при разработках и производстве своих устройств, однако и им книга будет полезна на этапе выбора микропроцессорной платформы для дальнейших разработок и подготовки и переподготовки своих инженерных кадров.

Вызывает некоторое недоумение включение в книгу девятой главы, где менее чем на 30 страницах делается попытка изложения материала, связанного с архитектурами параллельных вычислительных систем. Явно эта тема, даже применительно к микропроцессорной тематике (мультипроцессорные системы, систолические структуры и др.), заслуживает отдельного более детального изложения, да и восемь предыдущих глав оставляют впечатление завершенной, качественно выполненной работы.

Несомненно, книга нужна и своевременна. Она должна пополнить устаревающие (по объективным причинам) фонды библиотек не только технических университетов, но и предприятий, занимающихся разработкой микропроцессорной техники и современных систем управления.

*Д-р техн. наук,
профессор М. Б. Сергеев*

**АСТАПКОВИЧ
Александр
Михайлович**



Начальник СКБ СПбГУАП. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1977 по специальности «Информационно-управляющие системы». Диссертацию по моделированию температурных состояний узлов ядерных энергетических реакторов защитил в 1985 г. Участник 2-й фазы международного проекта «ИТЭР» (исследовательский термоядерный энергетический реактор). Имеет более 90 публикаций, в том числе автор 1 монографии. Область научных интересов: информационно-управляющие системы реального времени.

**БАЛОНИН
Николай
Алексеевич**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей. Окончил Ленинградский электротехнический институт. В 1985 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в области технической кибернетики. Является автором многих научных публикаций, соавтор нескольких монографий, включая «Новый курс теории управления движением», «Управление в условиях неопределенности». Область научных интересов: теория и численные методы идентификации динамических систем; спектральные характеристики линейных операторов на ограниченном интервале времени; компьютерное моделирование динамических систем.

**БУРАКОВ
Михаил
Владимирович**



Доцент кафедры управления и информатики в технических системах СПбГУАП. Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения (ЛИАП) в 1984 г. по специальности «Автоматизированные системы управления», защитил кандидатскую диссертацию в 1994 г. С 1993 г. на преподавательской работе. Победитель конкурса «Сороковский доцент-2001». Автор около 70 научных публикаций. Область научных интересов: системы автоматического управления сложными объектами с элементами искусственного интеллекта; нейронные и нечеткие системы; эволюционные алгоритмы; математическое моделирование.

**ВОСТРИКОВ
Антон
Александрович**



Аспирант кафедры вычислительных машин и комплексов СПбГУАП. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения в 2000 г. по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Автор 21 научной публикации. Область научных интересов: распределенные информационно-управляющие системы; обработка информации в реальном времени.

**ГУЦАЛОВ
Никита
Валерьевич**



Аспирант Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Выпускник кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) им. Ульянова (Ленина) 2001 г. Автор двух научных публикаций. Область научных интересов: операционные системы; программирование систем реального времени и встроенных систем.

**ЕРОШ
Игорь
Львович**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей СПбГУАП. Окончил в 1960 г. Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ). Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук защитил в 1979 г. Автор более 150 научных трудов, в том числе соавтор двух учебников и трех монографий. Член-корреспондент Международной академии информатизации. Область научных интересов: дискретная математика; распознавание образов; защита информации.

**ЖАРИНОВ
Олег
Олегович**



Ассистент кафедры моделирования вычислительных и электронных систем СПбГУАП. Окончил университет в 1996 г. по специальности «Радиоэлектронные системы». Автор 12 научных работ. Область научных интересов: обработка информации в условиях априорной неопределенности

**КАТЕНИН
Александр
Владимирович**



Старший инженер государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Минобороны России (ГНИНГИ МО РФ)

**КАТЕНИН
Владимир
Александрович**



Старший научный сотрудник государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Минобороны России (ГНИНГИ МО РФ)

**КОНОВАЛОВ
Александр
Сергеевич**



Заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах СПбГУАП. Заведующий лабораторией автоматизации института проблем машиноведения РАН. Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1968г. по специальности «Электрооборудование ракет и других летательных аппаратов». Кандидатскую диссертацию защитил в 1981г., докторскую — в 1997 г. Автор более 120 научных публикаций. Области научных интересов: синтез нелинейных систем автоматического управления сложными объектами; системы искусственного интеллекта; системы автоматизированного проектирования.

**ЛУКОВКИН
Андрей
Викторович**



Инженер ЗАО «Электронная компания "ЭЛКУС"». Окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ГЭТУ) в 2000 г. по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Имеет одну публикацию. Область научных интересов: системы обработки информации в реальном масштабе времени.

**ЛЮТОВ
Андрей
Геннадьевич**



Инженер ЗАО «Электронная компания "ЭЛКУС"». Окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ГЭТУ) в 2000 г. по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Имеет одну публикацию. Область научных интересов: системы обработки информации в реальном масштабе времени.

**МИРОНОВСКИЙ
Леонид
Алексеевич**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей СПбГУАП. Выпускник Ленинградского политехнического института. В 1981 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук в области технической кибернетики. Автор более 160 научных работ, соавтор монографии «Функциональное диагностирование динамических систем». — М: МГУ, 1998. Член редколлегии журнала «Автоматика и телемеханика». Действительный член Метрологической академии России, Академии навигации и управления движением. Области научных интересов: техническая диагностика и компьютерное моделирование динамических систем; применение алгебраических инвариантов при диагностике сложных технических систем; использование информационной избыточности для обнаружения и подавления помех.

**ОСИПОВ
Леонид
Андроникович**



Заведующий кафедрой вычислительных машин и комплексов СПбГУАП. Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1968 г. по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Докторскую диссертацию защитил в 1995 году. Имеет более 150 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий. Область научных интересов: компьютерное управление нелинейными объектами.

**ПОЛЯКОВА
Татьяна
Геннадьевна**



Ассистент кафедры Управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1996 году по специальности «Управление и информатика в технических системах». Автор 12 научных публикаций. Область научных интересов: компьютерное управление нелинейными объектами.

**СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей СПбГУАП. Окончил Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) в 1980 г. по специальности «Электронные вычислительные машины». Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук защитил в 2001 году. Автор более 80 научных работ, в том числе двух монографий. Под его редакцией издано пять сборников научных трудов и монографий. Главный редактор журнала «Информационно-управляющие системы». Области научных интересов: теория разрядных вычислений; методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления.

**СУВОРОВ
Николай
Борисович**



Профессор кафедры биомедицинской электроники и охраны среды СПбГЭТУ. Выпускник ЛЭТИ 1964 года. Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук защитил в 1993 году. Имеет около 200 публикаций, соавтор пяти монографий. Научные интересы: управление в биологических системах; разработка компьютерных способов для профотбора, диагностики, прогноза, реабилитации человека. Руководитель лаборатории нейробиологии НИИ экспериментальной медицины РАМН. Действ. член Академии медико-технических наук, член Президиума АМТН РФ.

**ХВОЩ
Сергей
Тимофеевич**



Генеральный директор ЗАО «Электронная компания "ЭЛКУС"». Окончил Таганрогский радиотехнический институт в 1968 году по специальности «Электрические машины». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук защитил в 1976 г., доктора технических наук — в 1991 г. Имеет более 300 публикаций, в том числе четыре монографии. Область научных интересов: системы обработки информации в реальном масштабе времени.

**ЧУДИНОВСКИЙ
Юрий
Геннадьевич**

Аспирант кафедры вычислительных машин и комплексов СПбГУАП. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения в 2001 г. по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Автор 11 научных публикаций. Области научных интересов: распределенные информационно-управляющие системы; обработка информации в реальном масштабе времени.

**ШЕПЕТА
Александр
Павлович**

Декан факультета вычислительных и радиоэлектронных систем СПбГУАП, заведующий кафедрой моделирования вычислительных и электронных систем университета. Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1972 г. по специальности «Радиоэлектронные устройства систем управления». Докторскую диссертацию защитил в 1995 г. Имеет более 170 публикаций, соавтор двух монографий. Академик МАНВШ. Области научных интересов: обработка информации в условиях априорной неопределенности; математическое моделирование стохастических процессов и полей.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья редактируется и рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи, а также фотографию и краткое изложение сведений о себе.

Процедуры согласования текста статьи, предоставления фото (размером 3×4 см) и сведений об авторе могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (электронный вариант фото в виде файла *.tif, *.jpg с разрешением 300 dpi).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию. При необходимости доработать статью — рецензию.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за подбор, достоверность и точность фактов, экономико-статистических и технических показателей, собственных имен и прочих сведений, а также за то, что в материалах не содержится сведений, не подлежащих открытой публикации, несут авторы публикуемых в журнале материалов и рекламодатели.

УДК 519.711

Нейронечеткие системы управления
Бураков М. В., Коновалов А. С. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 2–7.

В статье обобщается опыт проведенных на протяжении ряда лет исследований, формулируются принципы конструирования нейронечетких регуляторов (НР) для широкого круга динамических объектов. К известным достоинствам нечеткого регулятора (НР) относятся: семантическая ясность производственных правил, малая чувствительность к внешним и параметрическим возмущениям. В качестве алгоритма обучения целесообразно использовать мощный генетический алгоритм (ГА), ориентированный на поиск глобального оптимума. Список лит.: 22 назв.

УДК 681.5.013

Синтез нелинейных систем управления методом ортогональных проекций
Осипов Л. А., Полякова Т. Г. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 8–10.

Рассматривается метод синтеза параметров нелинейных систем управления по заданным динамическим характеристикам, рассчитанный на применение ЭВМ. Метод, однако, может быть использован для расчетов вручную. Параметры системы определяются в результате обращения прямого вариационного метода (метода ортогональных проекций) на решение задачи синтеза. Список лит.: 4 назв.

УДК 681.32.5

Информационно-управляющие системы на основе Internet
Астапкович А. М., Востриков А. А., Сергеев М. Б., Чудинский Ю. Г. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 12–18.

Рассматриваются тенденции развития новой области компьютерной науки «встраиваемого Internet». Обозначены проблемы, решение которых позволит в ближайшем будущем всерьез говорить о массовом использовании Internet для реализации взаимодействий типа «человек—устройство» и «устройство—устройство» для передачи команд управления и информации различной природы. Приводятся данные и сформулированные на их основе обобщенные выводы по результатам экспериментов обмена командной, видео- и аудиоинформацией в коммуникациях типа «устройство—устройство». Список лит.: 12 назв.

УДК 629.783.05:629.1.053

Новые возможности комплексного использования спутниковых и ГИС-технологий при навигационно-гидрографическом обеспечении
Катенин В. А., Катенин А. В. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 18–23.

Рассматриваются преимущества комплексного использования спутниковых и ГИС-технологий в автоматизированных информационно-управляющих системах береговых подразделений Гидрографической службы и на подвижных морских объектах. Статья предназначена для специалистов, занимающихся вопросами построения информационно-управляющих систем, сетевыми технологиями, системным анализом и обработкой информации. Список лит.: 5 назв.

УДК 519.711

Neurofuzzy control system
Burakov M. V., Kononov A. S. — IUS, 2002. — № 1. — P. 2–7.

The paper generalizes the experience obtained during several years of research, lays down the neuro-fuzzy controller (NFC) design principles for wide range of dynamic objects. Well-known merits of the fuzzy controller (FC) include semantic clarity of production rules, low external and parametric disturbances sensitivity. In the capacity of the learning algorithm it is expedient to use the powerful genetic algorithm (GA), directed toward global optimum search. Refs: 22 titles.

УДК 681.5.013

Design of nonlinear control system by the method of orthogonal projections
Osipov L. A., Poljakova T. G. — IUS, 2002. — № 1. — P. 8–10.

The paper is devoted to a method for design of nonlinear control system parameters from specified dynamic responses. Though it relies on computers, the method can be used for manual computation. The parameters of system are determined by reversal of the direct variational method (the method of orthogonal projections). Refs: 4 titles.

УДК 681.32.5

Information and control Internet-based systems
Astapkovich A. M., Vostrikov A. A., Sergeev M. B., Thudinovsky J. G. — IUS, 2002. — № 1. — P. 12–18.

This article is devoted to tendencies of "Embedded Internet" development, a new field of computer science. A number of problems, which should be solved in near future in order to use the Internet for "human-device" and "device-device" interactions, are considered. There is also a brief description of the results of carried out experiments with real Internet-devices exchanging control messages, video- and audio information. Generalized conclusions on the results are given as well. Refs: 12 titles.

УДК 629.783.05:629.1.053

New possibilities of complex usage of satellite and GIS-technologies in navigation and hydrographic support
Katenin V. A., Katenin A. V. — IUS, 2002. — № 1. — P. 18–23.

Are esteemed of advantage of complex usage satellite and GIS-technologies in the automated informational-control systems of coast divisions (subdivisions) of a Hydrographic service and on courts. The article is intended for the specialists of engaging problems of construction of informational-control systems, by network technologies, systems analysis and data processing. Refs: 5 titles.

УДК 517.977

Компьютерные модели линейных операторов динамической системы

Балонин Н. А., Мироновский Л. А. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 24–28.

Рассматриваются линейные операторы систем управления на ограниченном интервале времени и исследуются их свойства. Вводится классификация линейных операторов, обладающих разными типами симметрии и указываются их экстремальные качества. Работа является логическим продолжением предыдущих работ авторов и вводит в рассмотрение круг операторов, порождаемых линейной динамической системой. Показано, что операторы, ассоциированные с линейной динамической системой, могут обладать различными видами симметрии: обычная симметрия и кососимметрия (симметрия относительно главной диагонали), симметрия и кососимметрия относительно побочной диагонали, симметрия и кососимметрия относительно вертикальной и горизонтальной осей, ганкелева и теглицева симметрии, симметрия собственных функций и спектра. Список лит.: 8 назв.

УДК 681.325.5

Применение шины CAN-BUS в распределенных системах сбора и обработки информации в реальном масштабе времени

Хвощ С. Т., Луковкин А. В., Лютов А. Г. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 35–39.

Рассмотрены возможные способы организации сети на основе CAN-Bus. Приведены примеры организации сетей с типовыми CAN-узлами. Предложены и описаны аппаратные средства сопряжения интерфейса CAN с другими специализированными шинами и магистралями информационно-управляющих систем реального времени самого разнообразного назначения.

УДК 681.391.1

Защита информационных потоков в системах распределенного контроля и управления

Ерош И. Л. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 40–46.

В работе рассмотрена проблема защиты информации в распределенных системах контроля и управления. В этих задачах число объектов контроля и управления может составлять сотни тысяч единиц, а в перспективе и миллионы. Отмечено, что классические криптосистемы в таких применениях обладают рядом недостатков из-за своей сложности и не обеспечивают реального масштаба времени. Обсуждается вопрос использования простых методов защиты, основанных на преобразовании управляющих, контролирующих и ответных сигналов с помощью булевых преобразований. Отмечается преимущество такого подхода в ряде перспективных приложений. Список лит.: 6 назв.

УДК 517.977

Computer models of dynamic system linear operators
Balonin N. A., Mironovsky L. A. — IUS, 2002. — № 1. — P. 24–28.

The linear operators of control systems on the limited interval of time are considered and their properties are investigated. The classification of linear operators possessing different types of a symmetry is introduced, their extreme qualities and are specified. The work is logic prolongation of the previous works of the authors and introduces into reviewing a circle of operators generated by a linear dynamic system. It is shown, that the operators associated with a linear dynamic system can have various aspects of a symmetry: an usual symmetry and a skew-symmetry (symmetry concerning a principal diagonal), symmetry and skew-symmetry concerning a secondary diagonal, symmetry and skew-symmetry concerning vertical and horizontal axes, Hankel and Toeplitz symmetry, symmetry of singular functions and spectrum. Refs: 8 titles.

УДК 681.325.5

Applying CAN-BUS in distributed systems of information acquisition and processing in real-time
Hvoshch S. T., Lukovkin A. V., Ljutov A. G. — IUS, 2002. — № 1. — P. 35–39.

Possible ways of CAN-BUS based network structures are considered in this article. Examples of networks with typical CAN-nodes are also included. There are a number of hardware offered and described in the article, intended for interfacing CAN-BUS with other specialized buses of information and control systems for wide application.

УДК 681.391.1

Guard of information streams in systems
The distributed monitoring and management
Erosh I. L. — IUS, 2002. — № 1. — P. 40–46.

In the work the problem of a guard of an information in the distributed monitoring systems and management is considered. In these problems the number of objects of monitoring and management can make hundreds thousands of units, and in the long term and millions. It is marked, that the classical cryptosystems in such applications have a number of defects because of the complexity and do not ensure an actual time scale. The problem use of simple methods of a guard based on transformation of the managers, inspecting and answer-back signals with the help of Boolean functions is discussed. The advantage of such approach in a number of perspective appendices is marked. Refs: 6 titles.

УДК 621.317.08; 681.2.001.5; 615.47

Методика обнаружения микропотенциалов ЭКГ
Жаринов О. О., Шепета А. П. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 48–51.

Предлагался новый подход к обнаружению низкоамплитудной составляющей ЭКГ с непостоянными свойствами. Для решения проблемы были использованы методы статистической теории. Рассмотрена и проанализирована дополнительная проблема, обусловленная дыхательной активностью, и предложены некоторые подходы для устранения возможных артефактов. Доказана возможность использования метода максимального правдоподобия для обработки ЭКГ на фоне ряд помех. Список лит.: 5 назв.

УДК 007: 57+007:573

Проблемы информационного обеспечения малоинвазивных интервенционных рентгено-хирургических операций на кровеносных сосудах
Бегун П. И., Сухов В. К. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 52–56.

Рассмотрены проблемы информационного обеспечения внедренных в последнее время в медицинскую практику методов малоинвазивных хирургических операций. Проанализированы причины, при которых в ряде случаев не удается достичь желательного лечебного эффекта, и операции сопровождаются мало прогнозируемыми осложнениями. Поставлены задачи, которые необходимо решить для оптимизации информации при проведении малоинвазивных хирургических операций и намечены пути решения этих задач. Список лит.: 11 назв.

УДК 007: 57+007:573

Информационная составляющая в биоуправлении функциональным состоянием человека
Суворов Н. Б. — Информационно-управляющие системы, 2002. — № 1. — С. 57–64.

На начальном этапе развития биоуправления действие сигнала обратной связи в виде биологически значимого подкрепления носило преимущественно энергетический характер. Информационная составляющая имела значительно меньший вес — в аналитическом блоке биотехнической системы формировались команды на включение стимулов. В биотехнических системах последних поколений, реализующих принцип соответствия параметров сигнала обратной связи характеру физиологической функции (последовательность включения мышц, ритмическая структура сердечного ритма, артериального давления и т. д.), благодаря установке на успешный конечный результат информационно-мотивационная насыщенность сигнала обратной связи чрезвычайно велика. Список лит.: 8 назв.

УДК 621.317.08; 681.2.001.5; 615.47

Method of detection of ECG micropotentials
Zharinov O. O., Shepeta A. P. — IUS, 2002. — № 1. — P. 48–51.

There was offered a new approach to detection of low-amplitude ECG contents with unstable properties. Some methods of statistical theory were adopted to solve the problem. One additional problem due to breath activity was reviewed and outlined some approaches to eliminate possible artifacts caused of. It was proved a possible use of maximum likelihood method to realize procedures of noised ECG processing. Refs: 5 titles.

УДК 007: 57+007:573

Problems of data support low-invasive Intervention X-radiation surgical operations on blood vessels
Begun P. I., Suhov V. K. — IUS, 2002. — № 1. — P. 52–56.

The problems of data support of the methods, introduced recently in medical practice, low-invasive of surgical operations are reviewed. The reasons are parsed, at which one in a series of cases it fails to reach advisable medical effect, and the operations are tracked low-predicable by complications. The problems delivered, which one are necessary for deciding for optimization of the information at conducting low-invasive of surgical operations and the paths of a solution of these problems are marked. Refs: 11 titles.

УДК 007: 57+007:573

Information component in biofeedback control of human functional condition
Suvorov N. B. — IUS, 2002. — № 1. — P. 57–64.

The influence of a biofeedback signal as a biologically significant reinforcement had mainly energetic feature at the initial stage of the development of biofeedback control methods. The biofeedback information component played considerably smaller role — the commands switching on stimulus were formed by the analytical block of a biotechnical system. The energy component practically is absent at last generations of biotechnical systems, which use the principle of conformity of the biofeedback signal parameters to the properties of a physiological function (for example: sequence of muscles contractions, rhythmic structure of cardiorythm and arterial pressure etc.). Refs: 8 titles.