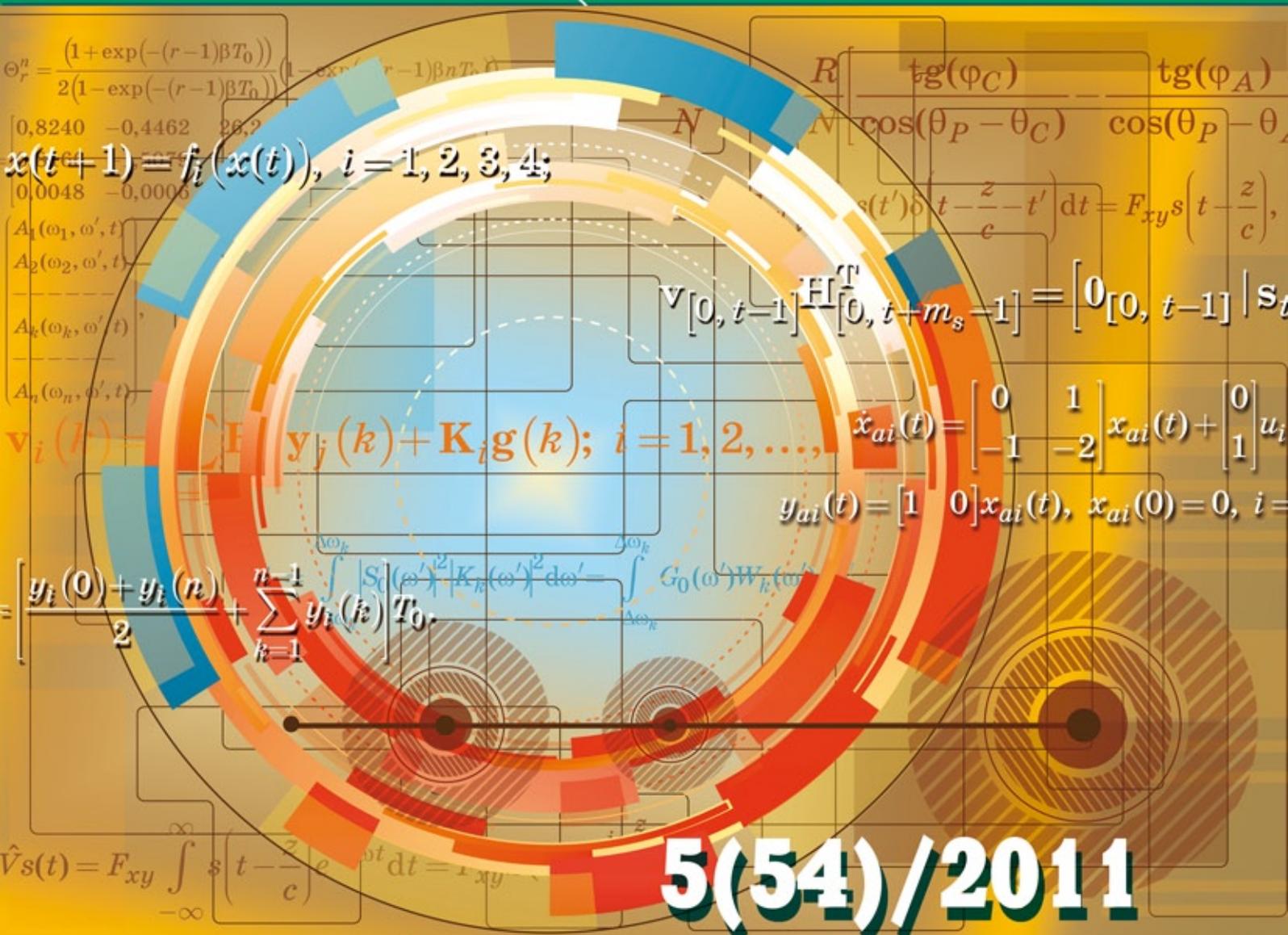


ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



5(54)/2011

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель

ОАО «Издательство «Политехника»»

Главный редактор

М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора

Г. Ф. Мощенко

Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Васильев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подopleкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,
д-р техн. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова

Корректор: Т. В. Звертановская

Дизайн: С. В. Барашкова, М. Л. Черненко

Компьютерная верстка: С. В. Барашкова

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02

E-mail: 80x@mail.ru

Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

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

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов
и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертации на соискание ученой степени доктора
и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через
редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2011

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И.** Прогнозирование угловых координат движущихся объектов в бортовых оптико-механических системах 2
- Муравьев В. С., Муравьев С. И.** Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов на изображениях 8
- Ваганов М. А., Москалец О. Д.** Параллельный анализ спектра динамических сигналов 15

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Фуртат И. Б.** Робастная синхронизация динамической сети с переключающейся структурой 23

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Вульфин А. М., Фрид А. И.** Нейросетевая модель анализа технологических временных рядов в рамках методологии Data Mining 31
- Абдулкадер Б. А., Аль-Шайх Х. А., Лячек Ю. Т.** Установление связей между элементами базовой сети при параметризации чертежей 39

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

- Березкин А. В., Филиппов А. С.** Методика синтеза спецификаций на языке UML для верификации обмена данными в аппаратуре 47

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

- Кондрашов К. А., Зяблов В. В.** Конструкция плетеных сверточных кодов на базе кодов проверки на четность с одним проверочным символом 53

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Атанов В. А., Бритов Г. С.** Устройства функционального диагностирования электроприводов 61

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Артюхина В. А., Ефанов В. Н.** Информационные технологии в задаче анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений 66
- Дубинин Е. А.** Методика получения нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на информационную систему 76
- Федеряков А. С.** Исследование влияния новостного фона на котировки ценных бумаг при различном составе участников рынка 81

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б.** М-матрица 22-го порядка 87
- Тушавин В. А.** Инженерная методика количественной оценки удовлетворенности потребителей 91

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- 94

АННОТАЦИИ

- 99

УДК 681.518.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В БОРТОВЫХ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Б. А. Алпатов,

доктор техн. наук, профессор

О. Е. Балашов,

канд. техн. наук, доцент

А. И. Степашкин,

канд. техн. наук, доцент

Рязанский государственный радиотехнический университет

Предлагается алгоритм прогнозирования направления на сопровождаемый объект, движущийся в пространстве равномерно по линейной траектории, при отсутствии информации о дальности.

Ключевые слова — оптико-механическая система, сопровождение объектов, прогнозирование.

Введение

В последние годы наблюдается значительный интерес к задаче автоматического сопровождения объекта оптико-механическими системами (ОМС). На точностные характеристики системы видеосопровождения влияет множество факторов. Одним из них является возможность кратковременного пропадания информации о положении объекта на изображении, например при заслонении сопровождаемого объекта другими объектами. В данном случае на время пропадания информации требуется организация управления приводами карданного подвеса системы видеосопровождения.

Постановка задачи

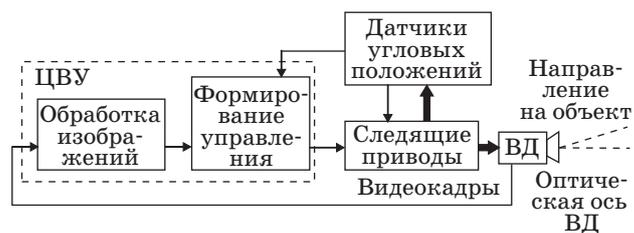
Задача высокоточного автоматического сопровождения движущихся объектов, решаемая в ОМС, является актуальной на современном уровне развития науки и техники. Автоматическое сопровождение объекта по данным видеонаблюдений — это постоянное отслеживание положения объекта в пространстве по последовательности видеок кадров и совмещение оптической оси видеодатчика (ВД) ОМС с направлением на объект [1].

Оптико-механическая система (рис. 1) содержит:

- цифровое вычислительное устройство ЦВУ для оценки координат сопровождаемого объекта на изображении и формирования заданных угловых положений рамок карданного подвеса;
- следящие приводы отработки заданных угловых положений;
- датчики угловых положений рамок опорно-поворотной платформы (карданного подвеса).

Формирование управления приводами ОМС осуществляется по измеренным на изображении, формируемом ВД, координатам сопровождаемого объекта, текущим углам поворота рамок карданного подвеса, а также углам качки носителя (крена, тангажа или дифферента, рыскания) в случае установки системы на подвижном носителе (корабле, летательном аппарате, наземном передвижном носителе и т. п.) и наличия датчиков качки [2].

Для качественного решения задачи непрерывного во времени совмещения оптической оси ВД



■ Рис. 1. Функциональная схема ОМС

с направлением на объект необходимо учесть возможность наличия случаев кратковременного пропадания информации о положении объекта на изображении. В таких ситуациях, чтобы не потерять объект, необходимо переходить в режим управления приводами ОМС по прогнозируемому направлению на объект. Предсказывать угловые координаты объекта можно различными способами:

- путем аппроксимации угловых направлений на объект полиномом невысокой степени, параметры которого определяются по значениям угловых координат в прошлые моменты времени;
- путем вычисления по некоторой математической модели, описывающей пространственное движение объекта относительно носителя ОМС (параметры модели оцениваются по показаниям датчиков угловых координат с учетом положений объекта в последовательности кадров изображений). Данный путь представляется более предпочтительным.

Поскольку практически имеет смысл рассматривать случаи, когда информация о положении объекта на изображении пропадает на непродолжительное время, то будем считать, что это время (с учетом времени предыстории, используемой для определения параметров движения) объект относительно носителя движется по прямолинейной равномерной траектории. В случае отсутствия информации о дальности до объекта условную траекторию движения объекта в пространстве (параллельную действительной с теми же угловыми координатами) можно описать тремя линейными уравнениями, определяющими положение объекта в трехмерном пространстве по начальному положению и проекциям скорости движения объекта вдоль условной траектории на соответствующие координатные оси. При использовании такой математической модели необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений для нахождения параметров движения объекта.

В реальных ОМС в силу ошибок измерения координат объекта на изображении для нахождения оценок параметров движения можно применить методы оценки зашумленных измерений параметров траектории движения с использованием сглаживающих фильтров, описанных, например, в книге [3].

В дальнейшем будем полагать, что угловые направления на объект θ (азимут), φ (угол места) определяются в системе сопровождения как

$$\theta = \theta_d + \varepsilon_\theta + \zeta_\theta^\theta; \varphi = \varphi_d + \varepsilon_\varphi + \zeta_\varphi^\varphi,$$

где θ_d, φ_d — измеренные датчиком значения углов соответственно θ и φ поворота рамки двухосного карданного подвеса; $\varepsilon_\theta, \varepsilon_\varphi$ — ошибки сопровожде-

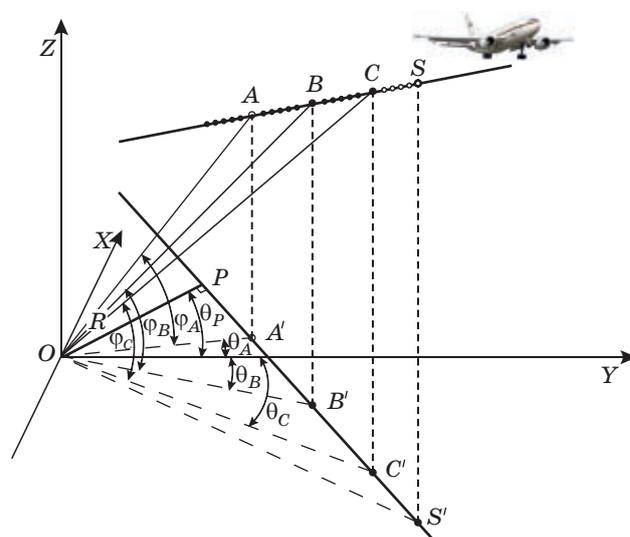
ния объекта системой; $\zeta_\theta^\theta, \zeta_\varphi^\varphi$ — ошибки измерений угловых координат объекта. Значения θ, φ без учета ошибок измерения можно определить по выражениям, приведенным в работах [1, 4].

Алгоритм прогнозирования угла азимута объекта

Предлагается алгоритм прогнозирования угла азимута направления на объект относительно носителя ОМС в предположении, что объект и носитель движутся в пространстве равномерно и прямолинейно. В этом случае можно говорить о таком же характере движения объекта в системе координат, жестко связанной с носителем. Рассмотрим модель прямолинейного равномерного движения объекта в трехмерном пространстве с измерением без ошибок его угловых координат (азимута θ и угла места φ) относительно ОМС. В случае отсутствия информации о расстоянии до объекта (неизмеряемая координата) при наличии измеряемых угловых координат объекта можно говорить о бесконечном множестве параллельных прямых в пространстве траекторий, имеющих в моменты измерения $n_1 = nT, n = 1, 2, \dots$ (n — номер измерения, T — интервал времени между двумя соседними измерениями ($T = \text{const}$)) одинаковые значения измеряемых координат.

Из бесконечного множества траекторий с совпадающими угловыми координатами за основу для дальнейшего рассмотрения примем одну из них (рис. 2). Проекция траектории на плоскость OXY проходит на расстоянии R от начала системы координат $OXYZ$, привязанной к строительным осям носителя ОМС.

Пусть к моменту пропадания информации о положении объекта имеется последователь-



■ Рис. 2. Условная траектория движения объекта

ность вычисленных значений угловых координат $\theta_{n-i}, \varphi_{n-i}, i = \overline{0, N}$, где N — четное число. На рисунке отмечены точки A, B, C траектории, соответствующие начальному, среднему и конечному измерениям из рассматриваемого множества $i = \overline{0, N}$. Закрашенные кружки на траектории соответствуют измеренным значениям координат, незакрашенные — прогнозируемым координатам.

Расстояния между точками траектории, соответствующими соседним измерениям угловых координат объекта, равны в силу прямолинейности и равномерности движения объекта в системе координат носителя. Точка B , соответствующая измерению $N/2$, делит отрезок траектории объекта между измерениями, обозначенными точками A и C , пополам. На рисунке отмечены угловые координаты по азимуту $\theta_A, \theta_B, \theta_C$. Предполагается, что измерение углов азимута осуществляется от оси OY . Точка P на рисунке — ближайшая точка проекции траектории объекта на горизонтальную плоскость от начала системы координат. Точки A', B', C' являются проекциями точек A, B, C и в случае прямолинейности траектории объекта лежат на одной прямой.

Проекцию траектории движения в горизонтальной плоскости можно описать двумя линейными уравнениями:

$$\begin{aligned} X(n-i) &= X(n) - \delta_X i = X_0^n - \delta_X i, \\ \delta_X &= X_i - X_{i-1} = \text{const}, \quad i = \overline{0, N}; \\ Y(n-i) &= Y(n) - \delta_Y i = Y_0^n - \delta_Y i, \\ \delta_Y &= Y_i - Y_{i-1} = \text{const}, \quad i = \overline{0, N}, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_0^n, Y_0^n — координаты конечной точки (точка C) на n -м кадре; δ_X, δ_Y — проекции изменения координат за интервал измерения (период поступления кадров изображения) на координатные оси OX и OY соответственно. Тогда для координат X, Y точек A, B, C можно записать выражения:

$$\begin{aligned} X_C &= X_0^n, \quad Y_C = Y_0^n; \quad X_B = X_0^n - \Delta_X, \quad Y_B = Y_0^n - \Delta_Y; \\ X_A &= X_0^n - 2\Delta_X, \quad Y_A = Y_0^n - 2\Delta_Y; \\ \Delta_X &= \frac{N}{2} \delta_X, \quad \Delta_Y = \frac{N}{2} \delta_Y. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) следует система трех уравнений

$$\begin{cases} \text{tg}(\theta_C) = \frac{X_0^n}{Y_0^n} \\ \text{tg}(\theta_B) = \frac{X_0^n - \Delta_X}{Y_0^n - \Delta_Y} \\ \text{tg}(\theta_A) = \frac{X_0^n - 2\Delta_X}{Y_0^n - 2\Delta_Y} \end{cases} \quad (3)$$

Из бесконечного множества параллельных прямых в пространстве траекторий с заданными угловыми координатами $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ выберем одну траекторию объекта, задавшись некоторым положительным значением координаты Y_C . Координата

$$X_C = Y_C \text{tg}(\theta_C). \quad (4)$$

Из характера движения объекта в пространстве (равномерное и прямолинейное) справедливо выражение

$$\frac{Y_C - Y_A}{X_C - X_A} = \frac{\Delta_Y}{\Delta_X} = \text{tg}\alpha, \quad (5)$$

где α — угол между осью OX и проекцией траектории объекта на плоскость OXY . Для отношения Δ_Y/Δ_X можно с использованием системы уравнений (3) получить следующее выражение:

$$\frac{\Delta_Y}{\Delta_X} = \frac{\text{tg}(\theta_A) - 2\text{tg}(\theta_B) + \text{tg}(\theta_C)}{2T_1 T_2 + \text{tg}(\theta_B) T_3}, \quad (6)$$

где $T_1 = \text{tg}(\theta_A) - \text{tg}(\theta_B)$; $T_2 = \text{tg}(\theta_C) - \text{tg}(\theta_B)$; $T_3 = \text{tg}(\theta_A) - 2\text{tg}(\theta_B) + \text{tg}(\theta_C)$.

С учетом (4)–(6) координаты точки A могут быть вычислены по выражениям

$$\begin{aligned} Y_A &= \frac{Y_C - X_C \frac{\Delta_Y}{\Delta_X}}{1 - \text{tg}(\theta_A) \frac{\Delta_Y}{\Delta_X}}; \\ X_A &= Y_A \text{tg}(\theta_A). \end{aligned}$$

Значения Δ_X, Δ_Y вычисляются как

$$\Delta_X = \frac{X_C - X_A}{2}; \quad \Delta_Y = \frac{Y_C - Y_A}{2}.$$

При пропадании информации об измеряемых координатах объекта (последнее измерение получено в момент времени n (точка C на траектории)) прогнозировать угол азимута направления на объект для момента времени $(n+k)$ можно по выражению

$$\begin{aligned} \theta_{(n+k)} &= \text{atg} \frac{X_{\text{пр}}^{n+k}}{Y_{\text{пр}}^{n+k}} = \text{atg} \frac{X_0^n + k\delta_X}{Y_0^n + k\delta_Y}; \\ \delta_X &= \frac{2\Delta_X}{N}; \quad \delta_Y = \frac{2\Delta_Y}{N}, \end{aligned}$$

где $X_{\text{пр}}^{n+k}, Y_{\text{пр}}^{n+k}$ — прогнозируемые координаты объекта в плоскости OXY ; X_0^n, Y_0^n — значения, вычисленные по данным, полученным на момент поступления последнего видеокadra к моменту потери информации об объекте.

Данный алгоритм применим для прогнозирования направления на объект, если последний движется прямолинейно и равномерно. В других

случаях траектория объекта может быть аппроксимирована отрезками прямых линий.

На практике информация об измеренных угловых координатах объекта поступает в ОМС с некоторой ошибкой, величина которой зависит от точности алгоритма измерения координат объекта на изображении, точности датчиков углов поворота рамок кардана ОМС и т. п. Ошибки измерения угловых координат объекта оказывают значительное влияние на точность вычисления параметров траектории объекта. Особенно это проявляется при небольших изменениях угловых координат объекта в течение N отсчетов. Для повышения точности вычисления параметров движения объекта можно:

- увеличить количество измерений N для расчета параметров движения;
- произвести фильтрацию параметров траектории движения объекта.

Основным параметром, влияющим на точность предсказания угловых координат равномерной прямолинейной траектории объекта, является угол наклона траектории в плоскости OXY , определяемый выражением (6). Для оценки постоянных во времени параметров Δ_Y/Δ_X , δ_X , δ_Y может использоваться экспоненциальный фильтр [4].

Для сдвинутых на один кадр точек A, B, C значение Y_C на $(n + 1)$ -м кадре должно вычисляться с учетом полученной на n -м кадре оценки величины δ_Y .

Алгоритм прогнозирования угла места объекта

При пропадании информации об объекте для указания направления на объект, кроме угла азимута, необходимо вычислить угол места φ . Из рис. 2 вытекают следующие выражения:

$$OA' = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_A)}; \quad OC' = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_C)}.$$

Угол θ_P между осью OY и отрезком OP , перпендикулярным к проекции условной траектории объекта на горизонтальную плоскость, можно вычислить по формуле

$$\theta_P = \text{atg} \left(-\frac{\Delta_Y}{\Delta_X} \right),$$

в которой используется сглаженная оценка отношения Δ_Y/Δ_X .

Координаты объекта по оси OZ в точках A и C равны соответственно

$$Z_A = OA' \text{tg}(\varphi_A) = \frac{R \cdot \text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)};$$

$$Z_C = OC' \text{tg}(\varphi_C) = \frac{R \cdot \text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)}.$$

Приращение координаты Z за один видеокадр может быть определено как

$$\delta_Z = \frac{Z_C - Z_A}{N} = \frac{R}{N} \left[\frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right].$$

Прогнозируемое значение координаты Z на k интервалов времени можно представить как

$$Z_{n+k}^{\text{np}} = Z_C + k\delta_Z = R \left[\frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} + \frac{k}{N} \left(\frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right) \right].$$

Обозначим точкой S прогнозируемую точку на пространственной условной траектории движения объекта, а S' — ее проекцию на горизонтальную плоскость. Длина отрезка OS' может быть выражена как

$$(OS')_{n+k}^{\text{np}} = \frac{R}{\cos(\theta_P - \theta_{n+k}^{\text{np}})}.$$

Для прогнозируемого значения угла места справедливым будет выражение

$$\begin{aligned} \text{tg}\varphi_{n+k}^{\text{np}} &= \frac{Z_{n+k}^{\text{np}}}{(OS')_{n+k}^{\text{np}}} = \\ &= \left[\frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} + \frac{k}{N} \left(\frac{\text{tg}(\varphi_C)}{\cos(\theta_P - \theta_C)} - \frac{\text{tg}(\varphi_A)}{\cos(\theta_P - \theta_A)} \right) \right] \times \\ &\quad \times \cos(\theta_P - \theta_{n+k}^{\text{np}}). \end{aligned}$$

Пример работы алгоритма прогнозирования направления на объект

Рассмотрим в качестве примера движение объекта в пространстве по траектории, описываемой уравнениями:

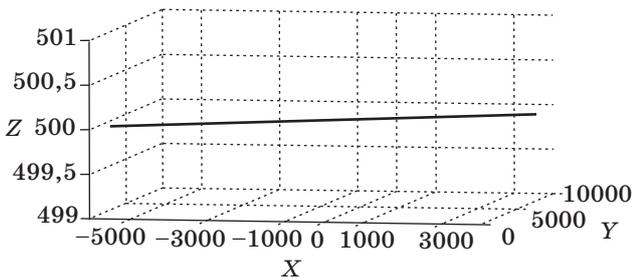
$$X(n) = X_0 + n\delta_X; \quad Y(n) = Y_0 + n\delta_Y;$$

$$Z(n) = Z_0 + n\delta_Z;$$

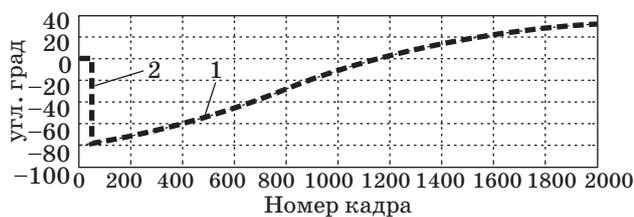
$$\delta_Z = V \sin(\beta_0); \quad \delta_X = V \cos(\beta_0) \cos(\alpha_0);$$

$$\delta_Y = V \cos(\beta_0) \sin(\alpha_0),$$

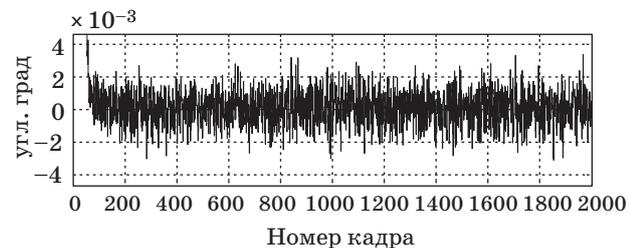
где $X_0 = -5700$ м; $Y_0 = 1000$ м; $Z_0 = 500$ м; $V = 5,7$ м/кадр — скорость объекта; $\beta_0 = 30^\circ$ — угол наклона траектории объекта к горизонтальной плоскости; $\alpha_0 = 0^\circ$ — угол между проекцией траектории объекта на горизонтальную плоскость и осью OX ; $\delta_X, \delta_Y, \delta_Z$ — проекции изменения координат за интервал измерения (период поступления кадров изображения) на координатные оси OX, OY, OZ соответственно; n — номер видеокадра. Результаты моделирования представлены на рис. 3–9. На этих рисунках строб прогнозирована



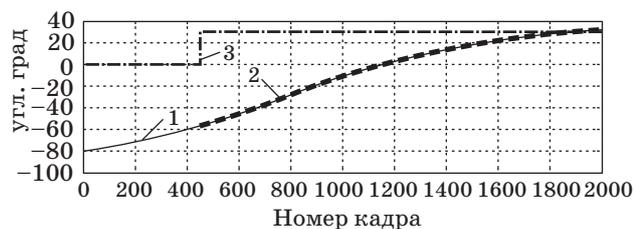
■ Рис. 3. Траектория объекта в системе координат OXYZ (носитель ОМС находится в точке O с координатами (0, 0, 0))



■ Рис. 4. Графики изменения истинного угла азимута объекта (кривая 1) и прогнозируемого на 1 отсчет (кривая 2)

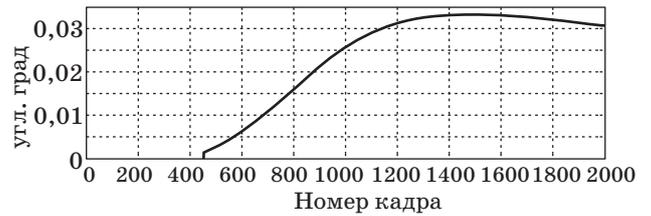


■ Рис. 5. Ошибка прогнозирования угла азимута объекта на 1 отсчет

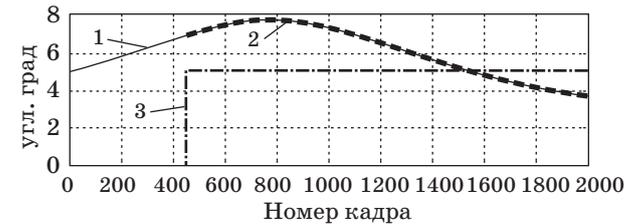


■ Рис. 6. Графики изменения истинного угла азимута объекта (кривая 1), прогнозируемого (кривая 2) и строб прогнозирования (кривая 3)

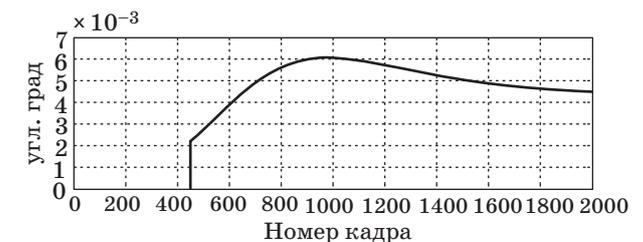
ния указывает на момент времени, в который пропадает информация об объекте, и на интервал времени, внутри которого вычисляются прогнозируемые значения угловых координат объекта. До момента пропадания информации осуществляется текущая оценка параметров условной пространственной траектории объекта, начиная с номера кадра N .



■ Рис. 7. Ошибка прогнозирования угла азимута объекта



■ Рис. 8. Графики изменения истинного угла места объекта (кривая 1), прогнозируемого (кривая 2) и строб прогнозирования (кривая 3)



■ Рис. 9. Ошибка прогнозирования угла места объекта

При моделировании использовались следующие данные:

- шум с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием ($m = 0$) и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,001^\circ$, моделирующий ошибки измерения углов поворота рамок карданного подвеса шестнадцатиразрядными датчиками;

- количество кадров $N = 50$;

- эффективная память экспоненциального фильтра равна 10 отсчетам.

Результаты экспериментов представлены для одной реализации шума, моделирующего ошибки измерения. Однако исследования были проведены для нескольких различных реализаций шума. При этом ошибки прогнозирования имели примерно тот же порядок малости.

Заключение

Результаты моделирования дают основание говорить об эффективности предложенного алгоритма прогнозирования угловых координат сопровождаемого объекта, пространственную траекторию которого на ограниченном интервале

времени с достаточной точностью можно представить прямолинейным равномерным движением. При этом не требуется информация о дальности до сопровождаемого объекта.

Исследования выполнены при поддержке государственного контракта № П1002 от 27.05.2010 г., заключенного с Министерством образования и науки.

Литература

1. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. — М.: Радиотехника, 2008. — 176 с.
2. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Повышение точности сопровождения объектов бортовой оптико-механической системой с двухосным карданным подвесом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. Вып. 9. С. 20–23.
3. Расчет и проектирование цифровых сглаживающих и преобразующих устройств / Под ред. Ю. М. Коршунова. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.
4. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Формирование управления приводами трехосного карданного подвеса в системе сопровождения объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 5. С. 24–28.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации, аннотация (7–10 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подписанные подписи.

Формулы в текстовой строке набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), только в том случае, если средства Word не позволяют набрать формулу или символ (например, простая дробь, символы с «крышками» и т. д.), используйте имеющийся в Word формульный редактор Mathtype или Equation; формулы, стоящие в отдельной строке, могут быть набраны как угодно; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

- рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат *.ai);
- фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

В редакцию предоставляются:

- сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, эл. адрес), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;
- экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

- для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;
- для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;
- ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;
- при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: www.i-us.ru

УДК 621.391.268

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В. С. Муравьев,

канд. техн. наук, научный сотрудник

С. И. Муравьев,

канд. техн. наук, доцент

Рязанский государственный радиотехнический университет

Описан алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, построенный на оценивании параметров авторегрессионной модели фона с помощью процедуры адаптивной пространственной фильтрации. На основе данного подхода разрабатывается модифицированный вариант алгоритма. Приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований.

Ключевые слова — воздушный объект, обнаружение, выделение, адаптивная фильтрация, авторегрессионная модель фона.

Введение

В последние десятилетия комплексы обработки изображений реального времени активно применяются в составе систем автоматического сопровождения воздушных объектов, наблюдаемых на фоне ясного или облачного неба, в целях решения задач их обнаружения и оценки параметров. В качестве объектов интереса могут выступать самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты, ракеты.

Необходимо отметить, что ранее для этих целей использовались преимущественно радиолокационные станции (РЛС). Однако РЛС имеют существенные недостатки, что требует поиска и внедрения новых подходов. Преодолеть многие проблемы можно путем использования современных телевизионных и тепловизионных датчиков для получения изображения объекта с последующей компьютерной обработкой и анализом видеoinформации. Примеры формируемых изображений, содержащих воздушные объекты, приведены на рис. 1.

В ряде работ [1, 2] рассматриваются алгоритмы, позволяющие обнаруживать точечные и малоразмерные воздушные объекты, однако они ориентированы преимущественно на обработку изображений, получаемых с тепловизионных датчиков, и часто не способны эффективно обнаруживать протяженные объекты. Разработанные алгоритмы обнаружения [3] ориентируются либо на случай неподвижного фона при перемещающемся объекте, либо на использование предварительной процедуры компенсации геометрических искажений изображений, вызванных смещением поля зрения видеодатчика. Однако при наблюдении объектов на относительно однородном фоне возникает проблема оценивания параметров геометрических преобразований с требуемой точностью, что в итоге приводит к ухудшению качества решения рассматриваемой задачи.

Таким образом, разработка эффективных алгоритмов выделения, обнаружения и оценки параметров



■ Рис. 1. Примеры изображений, содержащих воздушные объекты

раметров воздушных объектов до настоящего времени остается актуальной задачей.

Постановка задачи

В качестве модели формирования изображения, получаемого с помощью видеодатчика, можно использовать пространственно-временную модель «заслона» [3, 4]. Будем рассматривать только пространственную информацию, тогда, опуская номер кадра, данную модель можно записать в следующем виде:

$$l(i, j) = h(i, j)r(i, j) + g(i, j)(1 - r(i, j)) + \xi(i, j),$$

$$i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1},$$

где N_x, N_y — высота и ширина кадра; $l(i, j)$ — наблюдаемое изображение; $g(i, j)$ и $h(i, j)$ — неизвестные функции, значения которых являются яркостями точек фона и объекта соответственно; $\xi(i, j) \sim N(0, \sigma_\xi^2)$ — шум видеодатчика. Функция $r(i, j)$, которая определяет расположение объекта на изображении, задается правилом

$$r(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если в точке } (i, j) \text{ кадра находится} \\ & \text{объект;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Задача *выделения* объектов заключается в нахождении оценки $\hat{r}(i, j)$ по наблюдаемому изображению $l(i, j)$. Таким образом, выделение объектов состоит в классификации точек исходного изображения на точки, принадлежащие объекту, и точки, принадлежащие фону. Этап выделения объектов, как правило, предшествует этапу *обнаружения* объектов, который заключается в принятии решения о присутствии или отсутствии объекта на изображении $l(i, j)$ [3]. Можно отметить, что многие существующие подходы к решению задачи обнаружения объектов основываются на предварительном получении оценки $\hat{r}(i, j)$, фактически являющейся бинарным изображением. Располагая информацией о $\hat{r}(i, j)$, для каждого объекта можно вычислить такие параметры, как левая, правая, верхняя и нижняя границы. Перечисленные параметры определяют минимального размера прямоугольник, ограничивающий объект. Координатами объекта будем считать координаты центра такого прямоугольника (i_c, j_c), а размерами объекта — высоту и ширину ограничивающего прямоугольника.

При наблюдении воздушных объектов в качестве фоновой составляющей может рассматриваться облачное небо с плавными переходами яркости. Для описания подобного фона предлагается использовать авторегрессионную модель (АР-модель) следующего вида:

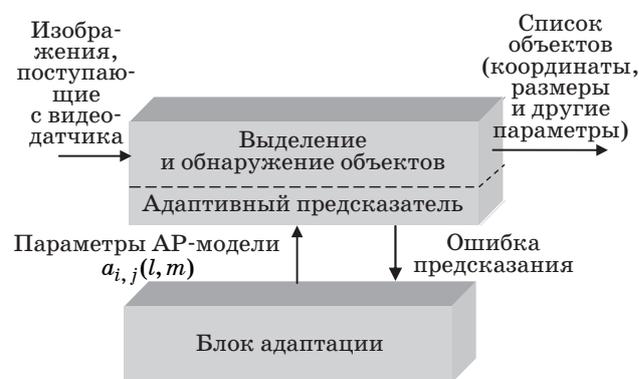
$$g(i, j) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} a(n, m)g(i-n, j-m) + \eta(i, j), \quad (1)$$

$$(n, m) \neq (0, 0)$$

где $a(n, m)$ — коэффициенты авторегрессии; $\eta(i, j)$ — ненаблюдаемый белый формирующий шум с нулевым математическим ожиданием; величина L определяет порядок модели. Фактически модель (1) задает марковское поле на прямоугольной решетке $R = \{(i, j) | i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1}\}$.

Для принятия решения о наличии объектов в кадре необходимо компенсировать фон, описываемый марковским полем, что в свою очередь предполагает нахождение оценок параметров этого поля. С данной целью широко используются подходы, основанные на решении уравнений Юла—Уолкера [5]. Отмеченный метод обладает тем недостатком, что для его реализации необходимо находить оценку корреляционной матрицы фона, что составляет определенные трудности. Во многих случаях для нахождения $a(n, m)$, $n, m = \overline{0, L-1}$ используются алгоритмы линейного предсказания [6]. Классический алгоритм требует решения переопределенной системы линейных уравнений на основе метода наименьших квадратов. Однако в общем случае параметры модели могут зависеть от (i, j) , что существенно усложняет задачу.

В ситуациях, характеризующихся априорной неопределенностью и пространственной изменчивостью наблюдаемых изображений, целесообразно использовать адаптивные методы обработки информации, в которых осуществляется автоматическая оптимизация параметров и структуры алгоритма относительно текущих характеристик фона. Применительно к рассматриваемой ситуации общую структуру адаптивной системы обработки изображений, решающую задачи выделения и обнаружения воздушных объектов, можно представить в следующем виде (рис. 2).



■ Рис. 2. Структура разрабатываемой системы выделения и обнаружения воздушных объектов

На вход системы поступают яркостные изображения от видеодатчика, а выходом является список параметров обнаруженных объектов. Для оценки фона предлагается использовать процедуру линейного предсказания, построенную на основе адаптивной пространственной фильтрации. Компенсировав фоновую составляющую, можно отделить объект от остаточного шума.

Разработка алгоритма выделения и обнаружения воздушных объектов

В литературе [7, 8] описана возможность применения адаптивного метода наименьших средних квадратов для оценки параметров АР-модели фона. Данный подход послужил основой для предлагаемого в данной работе алгоритма (рис. 3), позволяющего повысить качество решения поставленных задач.

В соответствии с алгоритмом значение каждого пикселя отфильтрованного изображения $d(i, j)$ вычисляется по выражению

$$d(i, j) = \sum_{\substack{n=0 \\ (n,m) \neq (0,0)}}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} \hat{a}_s(n, m)l(i-n, j-m),$$

$$i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1}, \quad (2)$$

где $\hat{a}_s(n, m)$ — оценки АР-коэффициентов, вычисленные на s -м шаге. Фактически формула (2) задает некоторый двумерный линейный нестационарный фильтр. Будем считать, что изображение формируется построчно, тогда номер шага s будет определяться как

$$s = i(N_y - 1) + j.$$

Введем в рассмотрение ошибку фильтрации $e(i, j)$, представляющую собой скалярную величину, с помощью выражения

$$e(i, j) = d(i, j) - l(i, j).$$

Результатом работы алгоритма будет являться некоторое бинарное изображение, для нахождения которого осуществляется пороговая обработка $e(i, j)$ по правилу

$$\hat{r}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } |e(i, j)| > T_{s-1}; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где T_{s-1} — пороговое значение, вычисленное на шаге $s - 1$.

На основе $e(i, j)$ на каждом шаге s сформируем значение ошибки адаптации $e_a(i, j)$. За ошибку адаптации $e_a(i, j)$ принимается значение $e(i, j)$ при $\hat{r}(i, j) = 0$, т. е. в случае отнесения элемента (i, j) к фону. Величина e_a фиксируется при переходе от $\hat{r} = 0$ к значению $\hat{r} = 1$.

Следует ожидать, что среднее значение ошибки при использовании процедуры адаптации фильтра будет близко к нулю. Тогда порог T_s можно выбрать в соответствии с выражением

$$T_s = k\sigma_s,$$

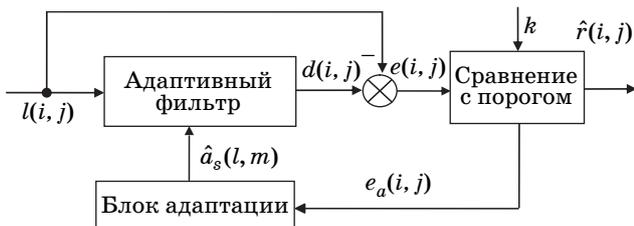
где $\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{s}((s-1)\sigma_{s-1}^2 + e_a^2(i, j))}$ — среднеквадратическое отклонение ошибки адаптации на шаге s ; k — некоторый пороговый коэффициент.

В блоке адаптации на основе $e_a(i, j)$ рекуррентно уточняется весовая функция $\hat{a}_s(n, m)$, $n, m = \overline{0, L-1}$, $(n, m) \neq (0, 0)$ двумерного фильтра в соответствии с выражением

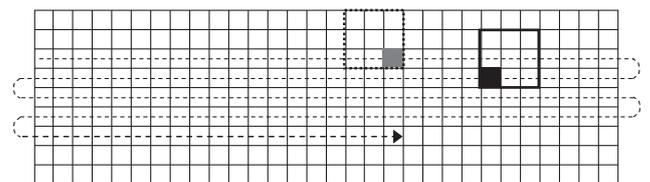
$$\hat{a}_{s+1}(n, m) = \hat{a}_s(n, m) + 2\mu e_a(i, j) l(i-n, j-m), \quad (3)$$

где μ — коэффициент сходимости. Показано [5], что (3) представляет собой численное решение уравнения Юла—Уолкера по методу градиентного спуска. Алгоритм обеспечивает сходимость процесса адаптации при любых начальных значениях коэффициентов $\hat{a}_s(n, m)$ и наложении определенных условий на выбор величины μ [7].

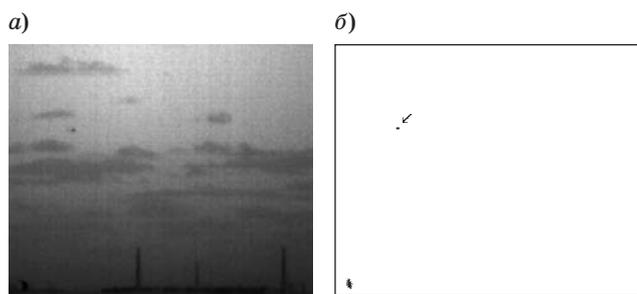
Для простоты реализации в качестве начального приближения $\hat{a}_0(n, m)$ предлагается использовать двумерную усредняющую маску. Вместо последовательного построчного обхода изображения маской фильтра $\hat{a}_s(n, m)$ на практике целесообразным является выбор направления обхода «змейкой» (рис. 4), где маска коэффициентов



■ Рис. 3. Структурная схема предлагаемого алгоритма



■ Рис. 4. Возможное направление обхода изображения



■ Рис. 5. Пример исходного (а) и очищенного инвертированного бинарного (б) изображений

фильтра представлена матрицей 3×3 элемента, а текущий элемент (i, j) затемнен.

Если имеется априорная информация о том, что в первых нескольких строках объект не содержится, то для улучшения сходимости процедуры адаптации в течение первых $s_{\text{доп}}$ шагов целесообразно принять $e_a(i, j) = e(i, j)$, $\hat{r}(i, j) = 0$.

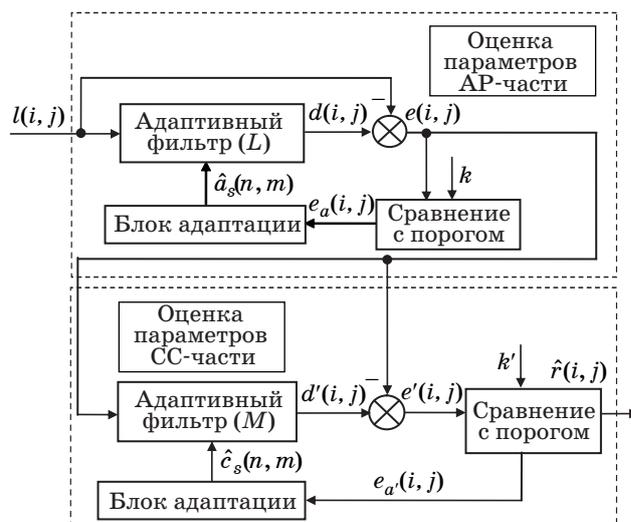
Во многих случаях получаемые бинарные изображения содержат элементы, ложно отнесенные к объектам. Поэтому для улучшения качества обнаружения следует осуществить дополнительную обработку получаемого бинарного изображения. Суть обработки заключается в последовательном применении процедур морфологического закрытия и открытия с квадратным структурирующим элементом заданного размера. Разметка и параметризация связанных элементов итоговой бинарной маски осуществляется с помощью известного алгоритма [3]. В процессе параметризации сегментов вычисляются координаты их центров, габаритные размеры, площадь и другие параметры. Исходя из параметров сегментов и имеющейся априорной информации принимают решение об обнаружении объектов в кадре. Пример исходного и инвертированного бинарного изображений показан на рис. 5.

Модификация разработанного алгоритма

Необходимо отметить, что в общем случае наблюдаемый фон может описываться более сложной авторегрессионной моделью скользящего среднего (АРСС), которую можно представить в виде

$$g(i, j) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} a_{i,j}(n, m)g(i-n, j-m) + \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} b_{i,j}(n, m)\zeta(i-n, j-m),$$

где $\zeta(i, j)$ — некоторый белый шум с нулевым средним и дисперсией σ_{ζ}^2 ; $b_{i,j}(n, m)$ — параметры скользящего среднего.



■ Рис. 6. Структура модифицированного алгоритма выделения объектов

В отличие от имеющегося большого разнообразия алгоритмов вычисления АР-коэффициентов разработано всего лишь несколько подходов, предназначенных для нахождения АРСС-параметров, что объясняется главным образом нелинейным характером получаемых уравнений. Для решения подобных уравнений часто применяются итеративные методы оптимизации, основанные на использовании оценок максимального правдоподобия, и близкие к ним методы [9]. Однако данные подходы требуют больших вычислительных затрат, к тому же они не гарантируют сходимости или даже могут сходиться к неверным решениям, поэтому их нецелесообразно применять для обработки изображений в реальном времени.

В целях существенного снижения вычислительных затрат для получения оценок АРСС-параметров чаще всего применяются субоптимальные процедуры, в большинстве из которых оценки АР- и СС-параметров получают раздельно. Сначала, как правило, вычисляются АР-параметры, а затем эти оценки используются для построения некоторого фильтра, который будет применен к исходным данным. Двумерная последовательность остаточных ошибок на выходе этого фильтра характеризует процесс СС, к которому затем может быть применена процедура оценивания СС-параметров. СС-параметры можно определить, исходя из некоторой эквивалентной АР-модели бесконечного порядка с параметрами $c_{i,j}(n, m)$. На практике порядок модели M часто ограничивают таким, что $M \gg L$.

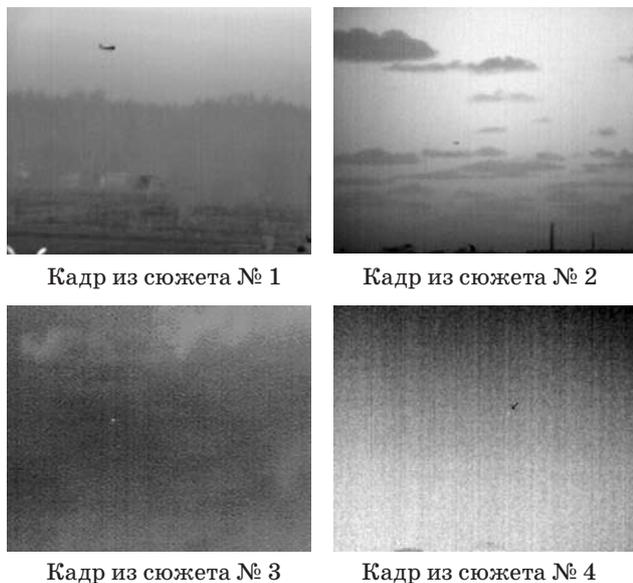
В соответствии с подходом раздельного оценивания коэффициентов структура алгоритма выделения объектов может иметь вид, представленный на рис. 6.

Экспериментальные исследования

Поскольку базовый алгоритм является составной частью модифицированного варианта, то экспериментальной проверке подвергался только последний подход. Исследования производились с использованием четырех естественных видеопоследовательностей продолжительностью от 600 до 800 кадров, снятых в ТВ- и ИК-диапазонах. Характерные кадры из тестовых видеосюжетов представлены на рис. 7.

Фон на выбранных сюжетах был как однородным (сюжет № 3), так и содержал кучевые облака (сюжет № 2), поверхность земли, дома и траву (сюжет № 1). Размеры объектов колебались от 2×2 до 20×15 пикселей. Отношение сигнал/шум тестовых видеосюжетов лежало в диапазоне примерно от 1,5 (сюжет № 4) до 35 (сюжет № 1).

Основные исследования были посвящены анализу эффективности процедуры адаптивной фильтрации. Для изучения влияния описанной выше процедуры адаптивной фильтрации на характеристики разрабатываемого алгоритма оценивалось качество получаемых бинарных изображений. Исходя из анализа рассматриваемого алгоритма можно сделать вывод, что основные преимущества от применения описанной выше обработки следует ожидать на видеопоследовательностях, содержащих сильно коррелированный облачный фон. При проведении сравнительных исследований использовался алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, основанный на применении полосового пространственного фильтра с конечной памятью [10]. Суть данного подхода состоит в применении парал-



■ Рис. 7. Кадры из тестовых видеосюжетов

лельной двумерной фильтрации наблюдаемого изображения двумя фильтрами с масками разного вида и размерности, подстройки размерности маски фильтра для лучшего обнаружения интересующего объекта и сравнения обработанного изображения с глобальным порогом.

Выбор порядка модели осуществлялся эмпирическим путем. В теории для этой цели может быть использован информационный критерий Акаике. Минимум данного критерия по всем возможным размерностям модели характеризует его значения, которые целесообразно использовать [5]. Значение L выбиралось равным 9–13, а M — 27.

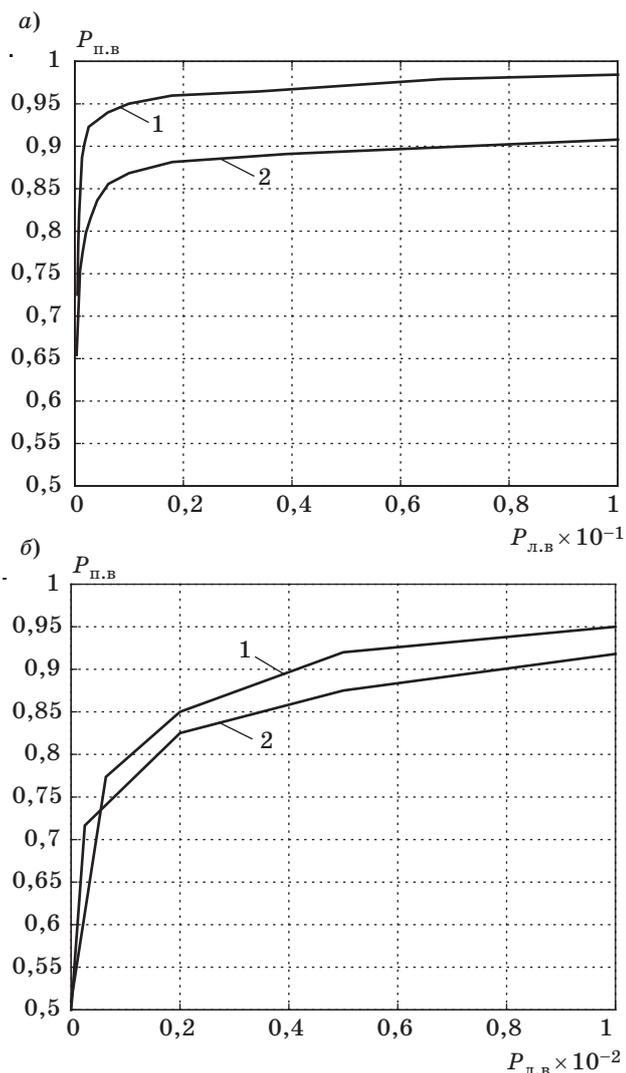
В процессе исследования эффективности алгоритма использовались несколько методик: визуальная оценка качества, вычисление рабочих характеристик выделения, нахождение частоты правильного обнаружения малоразмерного объекта. Остановимся на каждой методике подробнее.

В целях оценки точности выделения объектов для сюжетов № 1 и 2 в работе использовались кривые зависимости частоты правильного выделения точек изображения $P_{п.в}$ от частоты ложного выделения точек изображения $P_{л.в}$. Под частотой правильного выделения $P_{п.в}$ понималось отношение числа точек, правильно отнесенных к объекту, к общему количеству точек объекта. Частота ложных тревог $P_{л.в}$ вычислялась как отношение количества точек, неверно отнесенных к объекту, к общему количеству точек изображения, не принадлежащих объекту.

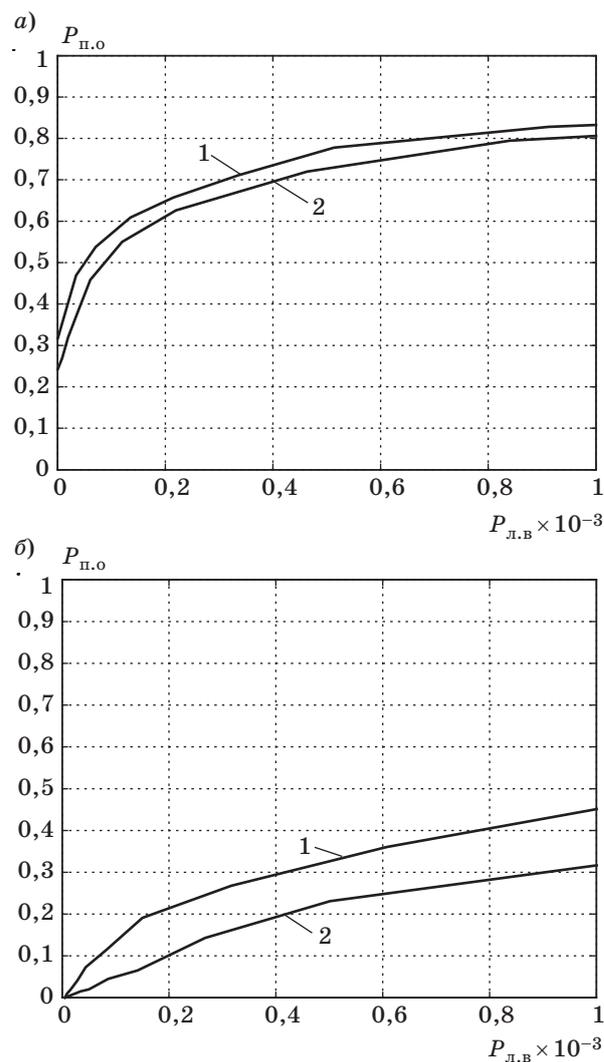
Кривую зависимости $P_{п.в} = f(P_{л.в})$, получаемую при варьировании порогового коэффициента k , назовем рабочей характеристикой выделения. Рабочие характеристики выделения для сюжета № 1 при $L = 13$ представлены на рис. 8, а. Для сравнения рядом приведены результаты для разработанного алгоритма и алгоритма, предложенного в работе [10]. Для каждого сюжета параметры используемого для сравнения алгоритма выбирались наилучшими с точки зрения получаемых характеристик.

Из анализа приведенных графиков видно, что рост $P_{п.в}$ при фиксированном значении $P_{л.в}$ составил до 9 % по сравнению с разработанным ранее алгоритмом. От значения коэффициента сходимости во многом зависит вид получаемых кривых. Так, при больших значениях μ фильтр будет очень чувствителен к шуму и ошибке адаптации, при этом сама процедура вычисления весов фильтра будет расходиться. При малых значениях μ фильтр будет неспособен адаптироваться к изменяющемуся фону.

При анализе полученных результатов можно сделать вывод, что оптимальное значение μ в большой степени зависит от степени неоднородности



■ Рис. 8. Рабочие характеристики выделения, построенные для сюжета № 1 (а) и № 2 (б), для алгоритмов с использованием адаптивной фильтрации (кривая 1) и полосовой пространственной фильтрации (кривая 2)



■ Рис. 9. Графики зависимостей $P_{л.о} = f(P_{л.в})$ для видеосюжетов № 3 (а) и № 4 (б): кривая 1 получена для предлагаемого алгоритма, кривая 2 — для алгоритма, выбранного для сравнения

фона и размерности маски фильтра L . Исходя из этого необходимо отслеживать рост значений весов фильтра, чтобы исключить возможность расхождения итеративного процесса, своевременно скорректировав значение μ . Оптимальные значения μ_1 и μ_2 выбирались экспериментальным путем и для всех сюжетов лежали в диапазонах $\mu_1 = [10^{-3}; 10^{-2}]$, $\mu_2 = [10^{-2}; 10^{-1}]$. Рабочие характеристики выделения для сюжета № 2 представлены на рис. 8, б. Так, значение $P_{п.в}$ при $P_{л.в} = 0,005$ для предлагаемого алгоритма составляет 0,93 против 0,87 у сравниваемого подхода.

Построение характеристик выделения для сюжетов № 3 и 4 некорректно, так как отношение сигнал/шум изменяется от кадра к кадру, а площадь выделяемых объектов незначительна. При

этом важно обнаруживать объект в каждом кадре видеопоследовательности. Поэтому был использован другой подход к количественной оценке характеристик разработанного алгоритма.

В соответствии с данным подходом оценивалась $P_{л.в}$ точек объекта и рассчитывался бинарный параметр правильного обнаружения $N_{п.о}^{(n)}$ на n -м кадре по следующему правилу:

$$N_{п.о}^{(n)} = \begin{cases} 1, & \text{если } |\hat{i}_{ц.э}^n - i_{ц.э}^n| \leq 1, |\hat{j}_{ц.э}^n - j_{ц.э}^n| \leq 1, n = \overline{1, N}; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $(i_{ц.э}^n, j_{ц.э}^n)$ — эталонные значения координат центров объектов на n -м кадре, в качестве которых использовались данные, полученные цело-

веком-экспертом; $(\hat{i}_c^n, \hat{j}_c^n)$ — измеренные значения координат центров объектов; N — число кадров в видеосюжете.

Зная $N_{п.о}^{(n)}$ на каждом кадре, можно вычислить частоту правильного обнаружения

$$P_{п.о} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N N_{п.о}^{(n)}.$$

Построенные зависимости $P_{п.о} = f(P_{л.в})$ для видеосюжетов № 3 и 4 получены при $L = 9$ (рис. 9).

Из графиков видно, что результаты применения адаптивного подхода несколько лучше. Низкие показатели работоспособности, полученные для сюжета № 4, обусловлены большой степенью зашумленности обрабатываемого видеосюжета и малым контрастом объекта. По результатам анализа экспериментальных данных можно сде-

лать вывод, что адаптивный алгоритм выделения и обнаружения объектов работоспособен при отношениях сигнал/шум, больших 2,5.

Заключение

В данной статье предложен алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, основанный на оценивании параметров АРСС-модели фона с помощью процедуры адаптивной пространственной фильтрации. Анализ полученных результатов моделирования и сравнительных исследований позволяет сделать вывод об эффективности использования рассмотренного алгоритма при работе с реальными видеопоследовательностями, содержащими облачный фон.

Исследования выполнены при поддержке гранта для ведущих научных школ НШ-1.2010.10.

Литература

1. Li J., Shen Z., Bao L. Detection of small moving objects in image sequences // Automatic target recognition IV: Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3069. P. 511–517.
2. Deshpande S. D., Er M. H., Ronda V., Chan P. Max-mean and max-median filters for detection of small targets // Signal and data processing of small targets: Proc. of SPIE. 1999. Vol. 3809. P. 74–83.
3. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. — М.: Радиотехника, 2008. — 176 с.
4. Алпатов Б. А., Блохин А. Н. Модели и алгоритмы обнаружения и выделения движущихся фрагментов изображений // Автометрия. 1995. № 4. С. 100–104.
5. Марпл С. Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
6. Джайн А. К. Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 9–39.
7. Nolibе L., Borgnino J., Ducoulombier M., Artaud M. Adaptive multispectral detection of small target using spatial and spectral convergence factor // Signal and data processing of small targets: Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2759. P. 111–120.
8. Soni T., Zeidler J. R., Ku W. H. Adaptive whitening filters for small target detection // Signal and data processing of small targets: Proc. of SPIE. 1992. Vol. 1698. P. 21–31.
9. Kay S. M. Modern Spectral Estimation. — Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. — 543 p.
10. Алпатов Б. А., Блохин А. Н., Муравьев В. С. Алгоритм обработки изображений для систем автоматического сопровождения воздушных объектов // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 4. С. 12–17.

УДК 629.735.33

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРА ДИНАМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

М. А. Ваганов,

ассистент, младший научный сотрудник

О. Д. Москалец,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается измерение энергетических спектров оптических сигналов спектральным прибором нового типа. Разрешающей системой этого анализатора спектра является многоканальная селективная система, включающая в себя набор узкополосных оптических фильтров и группу оптических волокон, служащую линией передачи анализируемых сигналов. Дается теоретический анализ параллельного метода анализа спектра. Приводятся описание лабораторного макета параллельного анализатора спектра оптических сигналов и результаты экспериментальных измерений.

Ключевые слова — многоканальная селективная система, параллельный анализ спектра, комплексный спектр, оценка энергетического спектра, матричная аппаратная функция, оптический фильтр, оптическое волокно.

Введение

Анализ спектра (гармонического) относится к числу важнейших физических измерений. Разнообразие задач, решаемых спектроскопическими методами, приводит к необходимости создания широкой номенклатуры спектральных приборов. Параллельно развиваются как традиционные методы (благодаря внутреннему совершенствованию и оптимизации использования возможности спектральной аппаратуры), так и новые, находящие все более широкое применение.

Данная статья посвящена исследованию возможности внедрять методы параллельного анализа спектров, известных в радиодиапазоне, в теорию и практику оптической спектрометрии. Это потребовало разработки единого подхода, в рамках которого могут быть описаны спектральные приборы как радио-, так и оптического диапазонов. Единый подход разработан в рамках теории линейных систем и устанавливает связь между математическим описанием спектра и аппаратным, т. е. физическим спектром.

Выдающаяся роль спектральных измерений в физике и технике стимулирует дальнейшее совершенствование известных методов анализа спектра и разработку новых принципов построения спектральной аппаратуры.

Спектральные измерения в радио- и оптическом диапазонах

При выполнении спектральных измерений решается задача получения информации о временных изменениях, т. е. о динамике функций источников, или временных частотных спектрах колебаний $s(t)$, а не о пространственных характеристиках сигнала.

В радиодиапазоне в качестве анализируемых сигналов предполагаются колебательные явления (колебания электрического тока или напряжения), чьей моделью является функция $s(t)$. В оптическом диапазоне все сигналы — переносчики информации существуют исключительно в виде излучений. Следовательно, постановке вопроса спектральных измерений соответствует модель анализируемого оптического сигнала в форме однородной плоской усеченной волны (волнового пучка с плоским фронтом):

$$\hat{V}s(t) = F_{xy} \int_{-\infty}^{\infty} s(t') \delta\left(t - \frac{z}{c} - t'\right) dt = F_{xy} s\left(t - \frac{z}{c}\right), \quad (1)$$

где \hat{V} — линейный оператор перехода от колебательного процесса источника $s(t)$ к усеченной однородной плоской волне; F_{xy} — апертурная диафрагма, выполняющая пространственное усечение однородной плоской волны в плоскости, нор-

мальной ее распространению; $\delta(\cdot)$ — дельта-функция; z — расстояние, пройденное волной [1].

В основе действия спектральных приборов, выполняющих анализ спектра аналоговыми методами, лежит одно из следующих физических явлений: интерференция, преломление при наличии дисперсии, резонанс [2], а также дисперсия фазовой скорости в замедляющих системах [3]. Первые два явления используются для создания основного парка спектральных приборов оптического диапазона, тогда как явление резонанса пока применяется довольно редко. На основе этого явления работают перестраиваемые интерферометры Фабри — Перо, выполняющие последовательный анализ спектра оптического излучения [4]. Явление резонанса чаще всего используется для создания аналоговых анализаторов спектра радиодиапазона — последовательных и параллельных (одновременных) [5]. Использование дисперсии фазовой скорости в замедляющих системах, успешно применявшейся для создания спектральных приборов радиодиапазона [3], в оптическом диапазоне не отмечено.

Спектральный прибор, выполняющий параллельный анализ спектра оптических сигналов, действие которого основано на явлении резонанса, впервые предложен авторами настоящей статьи [6].

Анализ спектра в оптическом диапазоне характеризуется измерением энергетических спектров, причем аргументом спектральных функций является длина волны, исключение составляют фурье-спектрометры, где аргументами спектральных функций служат волновые числа. В радиодиапазоне измеряются как комплексные (или амплитудные) спектры, так и энергетические. Для радиодиапазона характерно представление результатов спектральных измерений как функций частоты. Причем основным исходным для радиоспектрометрии соотношением является преобразование Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (2)$$

где $S(\omega)$ — комплексный спектр; $s(t)$ — анализируемый динамический сигнал, представленный в натуральном (временном) пространстве; ω — временная спектральная угловая частота.

Применение преобразования Фурье к последнему выражению цепи (1) дает выражение, которое пропорционально спектру колебаний источника:

$$\hat{F}\hat{V}s(t) = F_{xy} \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t - \frac{z}{c}\right) e^{-i\omega t} dt = F_{xy} S(\omega) e^{-i\omega \frac{z}{c}}. \quad (3)$$

Важнейшей задачей теории спектральных измерений является установление связи между ма-

тематическим и физическим понятием спектра [7], т. е. связи вход-выход спектрального прибора.

Понятие математического спектра дается в рамках теории рядов и интегралов Фурье, где в качестве аргумента спектральной функции используется частота. Изложения этой теории с привлечением понятия длины волны, а не частоты, не существует. Поэтому дальнейшее изложение опирается на частотные представления спектров, а установление связи между математическим и физическим спектром дается с общих позиций теории линейных систем, причем разрешающая система спектрального прибора рассматривается как линейная система, входом которой является комплексный спектр $S(\omega)$, определенный соотношением (2).

В данной работе комплексные спектры рассматриваются как первичные, а энергетические — как вторичные, полученные в результате дальнейшей обработки комплексных спектров.

Все это подразумевает радиооптический подход к решению поставленной задачи и его дальнейшее развитие. Термином «радиооптика» характеризуется определенный подход к решению весьма широкого класса задач, объединяющий хорошо разработанный в радиотехнике аппарат преобразования сигналов и спектрального анализа с традиционными оптическими приложениями и, наоборот, позволяющий перенести известные в оптике схемы и принципы в другие частотные диапазоны, а также на случай волновых полей другой природы, например акустических [8].

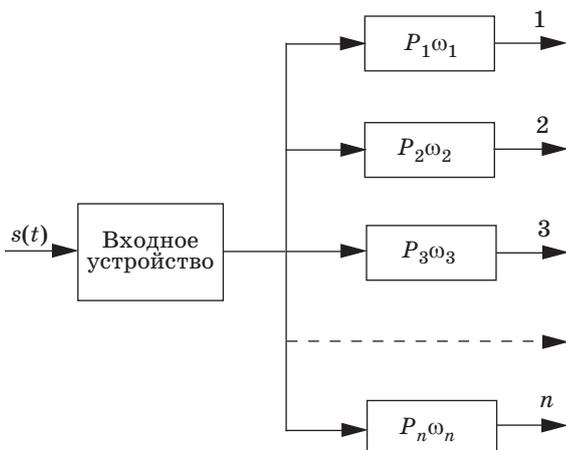
Методология радиооптического подхода применяется авторами для анализа действия параллельных анализаторов спектров.

Параллельный анализ спектра

В радиодиапазоне многоканальная селективная система является набором резонаторов с сосредоточенными параметрами. В оптическом диапазоне такая система образуется совокупностью резонаторов с распределенными параметрами.

Всякую распределенную систему можно рассматривать как сосредоточенную с достаточно большим числом степеней свободы. В отношении частотного спектра любая распределенная колебательная система эквивалентна бесконечному набору сосредоточенных колебательных систем с одной степенью свободы, каждая из которых имеет собственную частоту, совпадающую с одной из собственных частот распределенной системы [9]. Это позволяет описать в рамках единого подхода параллельный анализ спектра в радио- и оптическом диапазонах.

Структурная схема системы, выполняющей параллельный анализ спектра, показана на рис. 1.



■ *Рис. 1. Структурная схема системы, выполняющей параллельный анализ спектра*

Набор резонаторов является разрешающей системой спектрального прибора. При одновременном воздействии исследуемого сигнала на все резонаторы каждый из них будет откликаться на воздействие совокупности спектральных компонент, находящихся в пределах его полосы пропускания. По числу и расположению по оси частот возбужденных резонаторов можно судить о структуре исследуемого спектра.

По сравнению с последовательным анализом спектра, где измерение спектра производится с помощью одного узкополосного фильтра при последовательной перестройке анализатора по всему диапазону анализируемых частот, параллельный анализ имеет намного более высокую скорость анализа и может использоваться при анализе редко повторяющихся и одиночных импульсов.

Преимущества параллельного анализа стимулируют изыскания возможности переноса метода параллельного анализа из радиодиапазона в оптический диапазон. Такой подход следует называть радиооптическим.

Параллельный анализатор спектра как многомерная линейная система

Основной проблемой теории линейных систем является проблема передачи системой сигнала и в связи с этим определение и применение такой характеристики, которая бы наиболее просто и вместе с тем полно устанавливала связь между входом и выходом системы [10]. Под исчерпывающей характеристикой линейной системы в данной работе понимается аппаратная функция, которая является ядром линейного оператора, устанавливающего соотношения вход-выход линейной системы [11]:

$$y(\xi) = \hat{L}x(\xi) = \int_{\Xi} A(\xi, \xi') \cdot x(\xi') d\xi', \quad (4)$$

где $x(\xi)$ — вход линейной системы; $y(\xi)$ — выход линейной системы; \hat{L} — линейный оператор, описывающий преобразование входа $x(\xi)$ в выход $y(\xi)$; (ξ, ξ') — независимые переменные, которые могут быть пространственными, временными и частотными; $A(\xi, \xi')$ — аппаратная функция.

Математический смысл аппаратной функции может быть выражен в форме действия линейного оператора \hat{L} на δ -воздействие:

$$A(\xi, \xi') = \hat{L}\delta(\xi - \xi'). \quad (5)$$

Физически это означает, что аппаратная функция рассматривается как реакция линейной системы на соответствующее δ -воздействие.

Вопрос о действии линейного оператора на δ -функцию рассмотрен в работе [12], там же математически корректно установлена основная интегральная связь теории линейных систем (4).

В общем случае линейной системы в зависимости от определения ее входа и выхода аппаратная функция может иметь разный физический смысл [11]. В данной статье входом и выходом спектрального прибора является комплексный или энергетический спектр анализируемого сигнала, а его выходом — физический (аппаратурный) комплексный спектр $S_a(\omega, t)$, переменный во времени, либо энергетический спектр, зафиксированный за время обработки. Временная зависимость $S_a(\omega, t)$ определяется спецификой действия спектрального прибора, что, в конечном счете, определяется свойствами аппаратной функции.

Под аппаратной функцией оптического спектрального прибора понимается отклик прибора при воздействии на его оптический вход однородной плоской монохроматической волны частоты ω' :

$$s(\vartheta t - x) = \exp[i(\omega' t - k' z)], \quad (6)$$

где k' — волновое число света.

В дальнейшем рассматривается гармоническое колебание в следующей форме:

$$\exp[i(\omega' t)] = \hat{F}^{-1}\delta(\omega - \omega'), \quad (7)$$

где \hat{F}^{-1} — оператор обратного преобразования Фурье.

В случае спектральных измерений оператор \hat{L} в соотношении (4) с учетом соотношения (2):

$$\hat{L} = \hat{S}\hat{V}\hat{F}^{-1}, \quad (8)$$

где \hat{S} — линейный оператор, описывающий действие собственного спектрального прибора.

Таким образом, аппаратная функция, описывающая однократное измерение спектра, определяется как

$$A(\omega, \omega') = \hat{S}\hat{V}\hat{F}^{-1}\delta(\omega - \omega'), \quad (9)$$

откуда виден смысл аппаратной функции спектрального прибора как реакции на δ -воздействие.

Как отмечалось, при реальных измерениях аппаратные спектры являются переменными во времени, и связь вход-выход спектрального прибора записывается в форме

$$S_a(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \omega', t) \cdot S(\omega') d\omega', \quad (10)$$

где $S_a(\cdot)$ — комплексный аппаратный (физический) спектр; $A(\omega, \omega', t)$ — комплексная аппаратная функция, зависящая еще и от времени как от параметра; $S(\cdot)$ — комплексный спектр сигнала на входе анализатора, т. е. математический спектр.

Соотношение (4) и вытекающее из него соотношение (10) описывают преобразование входного сигнала одномерной линейной системой. В случае параллельного анализатора спектра разрешающая система является многомерной линейной системой. Следовательно, для описания действия параллельного спектрального прибора требуется ввести новое понятие комплексной матричной аппаратной функции (матрица-столбец). Матричная аппаратная функция обусловлена совокупностью узкополосных фильтров и является адекватной при рассмотрении метода параллельного анализа спектра сигналов [13]:

$$\|A(\omega, \omega', t)\| = \begin{pmatrix} A_1(\omega_1, \omega', t) \\ A_2(\omega_2, \omega', t) \\ \text{-----} \\ A_k(\omega_k, \omega', t) \\ \text{-----} \\ A_n(\omega_n, \omega', t) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $A_1(\omega_1, \omega', t)$, $A_2(\omega_2, \omega', t)$, ..., $A_k(\omega_k, \omega', t)$, ..., $A_n(\omega_n, \omega', t)$ — «парциальные аппаратные» функции для первого, второго, k -го и n -го каналов анализа спектра сигналов соответственно.

В выражении (11) аппаратная функция k -го канала

$$A_k(\omega_k, \omega', t) = K_k(\omega') e^{i\omega' t}, \quad (12)$$

где $K_k(\omega')$ — передаточная функция k -го канала анализатора спектра.

Подстановка выражения (11) в (10) дает матрицу выходов, которая описывает алгоритм действия разрешающей системы параллельного анализатора спектра:

$$\|S_a(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \|A(\omega, \omega', t)\| \cdot S(\omega') d\omega'. \quad (13)$$

Для определения комплексной аппаратной функции всей системы достаточно рассмотреть

обработку сигнала в одном канале, так как принцип действия всех каналов разрешающей системы параллельного анализатора одинаков.

Комплексный аппаратный (физический) спектр, получаемый на выходе k -го канала разрешающей системы параллельного анализатора спектра сигналов, дается соотношением

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A_k(\omega, \omega', t) \cdot S(\omega') d\omega'. \quad (14)$$

Подставив соотношение (14) в (13), получим

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_k(\omega') \cdot S(\omega') e^{i\omega' t} d\omega'. \quad (15)$$

Применение теоремы о спектре произведения двух функций к соотношению (15) дает

$$S_{ak}(\omega_k, t) = 2\pi \int_0^t h_k(t - \tau) \cdot s(\tau) d\tau, \quad (16)$$

где $h_k(t)$ — импульсная реакция k -го канала (резонатора).

Резонатор является узкополосным, поэтому его импульсная реакция

$$h_k(t) = H_k(t) e^{i\omega_k t}, \quad (17)$$

где $H_k(t)$ — весовая функция.

В таком случае

$$\begin{aligned} S_{ak}(\omega_k, t) &= \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{i\omega_k(t - \tau)} d\tau = \\ &= e^{i\omega_k t} \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \end{aligned} \quad (18)$$

Последнее выражение в цепи (18) представляет комплексный текущий спектр с весовой функцией и совпадает с аналогичным выражением, полученным в работе А. А. Харкевича [2]. Следует отметить, что физически текущий спектр проявляется в форме модуляции несущего колебания $\exp(i\omega_k t)$.

Разложим весовую функцию $H_k(t)$ в ряд Тейлора:

$$H_k(t) = H_k(0) + \frac{H_k'(0) \cdot t}{1!} + \frac{H_k''(0) \cdot t^2}{2!} + \dots \quad (19)$$

В нулевом приближении весовой функции $H_k(t)$ соотношение (18) принимает вид

$$S_{ak}(\omega_k, t) = e^{i\omega_k t} H_k(0) \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \quad (20)$$

Соотношение (20) совпадает с определением текущего спектра, предложенным А. А. Харкевичем [2].

Разложение (19) дает возможность оценить погрешности измерения текущего спектра с реальными резонаторами.

**Спектральные измерения
в оптическом диапазоне**

При оптических спектральных измерениях, как отмечалось выше, оперируют с энергетическими спектрами, поскольку все детекторы в оптическом диапазоне являются квадратичными. Кроме того, при регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника. Поэтому процесс определения энергетического спектра можно задать функциональной схемой (рис. 2).

Математическая форма последовательности операций, представленных на рис. 2, имеет вид

$$G_k = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(\omega, t)|^2 dt = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(\omega, t) S_{ak}^*(\omega, t) dt, \quad (21)$$

где T_R — время интегрирования; $-\frac{T_R}{2} = t_0$.

Подстановка соотношения (15) в (21) дает

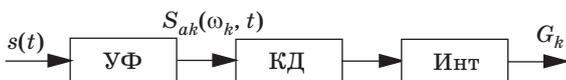
$$\begin{aligned} G_k &= \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} dt \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} S_0(\omega') K_k(\omega') e^{i\omega' t} d\omega' \times \\ &\times \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} S_0^*(\omega'') K_k^*(\omega'') e^{-i\omega'' t} d\omega'' = \\ &= \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} dt \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} S_0(\omega') S_0^*(\omega'') K_k(\omega') \times \\ &\times K_k^*(\omega'') e^{it(\omega' - \omega'')t} d\omega' d\omega'', \quad (22) \end{aligned}$$

где $\Delta\omega_k$ — полоса пропускания k -го резонатора.

Интегрирование по времени в выражении (22) дает

$$\int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} e^{it(\omega' - \omega'')t} dt = \frac{2 \sin \frac{T_R}{2} (\omega' - \omega'')}{(\omega' - \omega'')}. \quad (23)$$

С учетом соотношения (22) соотношение (21) примет вид



■ **Рис. 2.** Функциональная схема вычисления энергетического спектра: УФ — узкополосный фильтр; КД — квадратичный детектор; Инт — интегратор

$$\begin{aligned} G_k &= \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} S_0(\omega') S_0^*(\omega'') K_k(\omega') K_k^*(\omega'') \times \\ &\times \frac{2 \sin \frac{T_R}{2} (\omega' - \omega'')}{(\omega' - \omega'')} d\omega' d\omega''. \quad (24) \end{aligned}$$

Дальнейшие выкладки опираются на теорию вытянутых волновых сфероидальных функций, которые являются собственными функциями усеченного преобразования Фурье [11, 14].

Следуя [11, 14], введем безразмерные переменные: $\xi' = \omega'/\Delta\omega_k$, $\xi'' = \omega''/\Delta\omega_k$, тогда соотношение (22) примет вид

$$\begin{aligned} G_k &= \int_{-1}^1 S_0(\xi') K_k(\xi') d\xi' \times \\ &\times \int_{-1}^1 S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'', \quad (25) \end{aligned}$$

где $c = 0,5T_R\Delta\omega_k$.

Представим $S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'')$ в виде суммы мнимой и вещественной частей и разложим в усеченный ряд по системе вытянутых волновых сфероидальных функций [14]:

$$\begin{aligned} S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'') &= P(\xi'') + iQ(\xi'') = \\ &= \sum_{P=0}^N a_P \Psi_P(\xi'') + i \sum_{Q=0}^N b_Q \Psi_Q(\xi''), \quad (26) \end{aligned}$$

где $\{\Psi_i(\xi)\}$ — ортогональная система вытянутых волновых сфероидальных функций.

Выбирая N , можно получить нужную степень приближения.

Подставим полученное уравнение (26) в (25), преобразуем отдельно один из интегралов соотношения (25)

$$\begin{aligned} &\int_{-1}^1 S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \\ &= \int_{-1}^1 \left[\sum_{P=0}^N a_P \Psi_P(\xi'') + i \sum_{Q=0}^N b_Q \Psi_Q(\xi'') \right] \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \\ &= \int_{-1}^1 \sum_{P=0}^N a_P \Psi_P(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' + \\ &+ i \int_{-1}^1 \sum_{Q=0}^N b_Q \Psi_Q(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi''. \quad (27) \end{aligned}$$

Согласно теории вытянутых волновых сфероидальных функций, имеет место равенство [11, 14]

$$\int_{-1}^1 \Psi(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \frac{1}{\lambda_n} \Psi(\xi'). \quad (28)$$

При спектральных измерениях в оптическом диапазоне всегда выполняется условие $c \gg 1$, тогда $\lambda_n(c) \approx 1$ и соотношение (27) можно переписать в виде [11, 14]

$$\int_{-1}^1 S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \sum_{P=0}^N a_P \psi_P(\xi') + i \sum_{Q=0}^N b_Q \psi_Q(\xi') = P(\xi') + iQ(\xi') = S_0^*(\xi') K_k^*(\xi'). \quad (29)$$

Тогда соотношение (27) примет вид

$$\int_{-1}^1 S_0^*(\xi'') K_k^*(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' \cong S_0^*(\xi') K_k^*(\xi'). \quad (30)$$

Подстановка соотношения (30) в (25) дает

$$G_k = \int_{-1}^1 |S_0(\xi')|^2 |K_k(\xi')|^2 d\xi'. \quad (31)$$

При обратном переходе от безразмерных переменных ξ' к натуральным ω' получаем

$$G_k = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} |S_0(\omega')|^2 |K_k(\omega')|^2 d\omega' = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} G_0(\omega') W_k(\omega') d\omega', \quad (32)$$

где G_k — энергетический спектр на выходе k -го канала параллельного анализатора спектра; $G_0(\omega')$ — энергетический спектр анализируемого колебания (математический спектр); $W_k(\omega') = |K_k(\omega')|^2$.

Соотношение (32) отражает результат измерения спектра оптических сигналов и позволяет описывать действие параллельного анализатора спектра оптических сигналов в матричной форме:

$$\|G_{ak}(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \|W_k(\omega')\| G_0(\omega') d\omega'. \quad (33)$$

В выражении (33) $\|W_k(\omega')\|$ является матричной энергетической аппаратной функцией параллельного анализатора оптических сигналов. С учетом соотношения (12) элемент матричной энергетической аппаратной функции $W_k(\omega') = |A_k(\omega_k, \omega', t)|^2$.

Функциональная схема (см. рис. 2), в соответствии с которой выполнены выкладки (21)–(33), является основой для решения одной из важнейших задач теории статистических измерений [15] — получения оценки энергетического спектра оптических излучений с помощью многоканальной резонаторной системы.

Параллельный анализатор спектра оптических сигналов

В лаборатории акустооптических устройств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения разработан лабораторный макет оптического анализатора спектра параллельного типа (рис. 3, а), реализующий идеи патента РФ [6].

Группа оптических волокон предназначена для передачи анализируемого оптического излучения

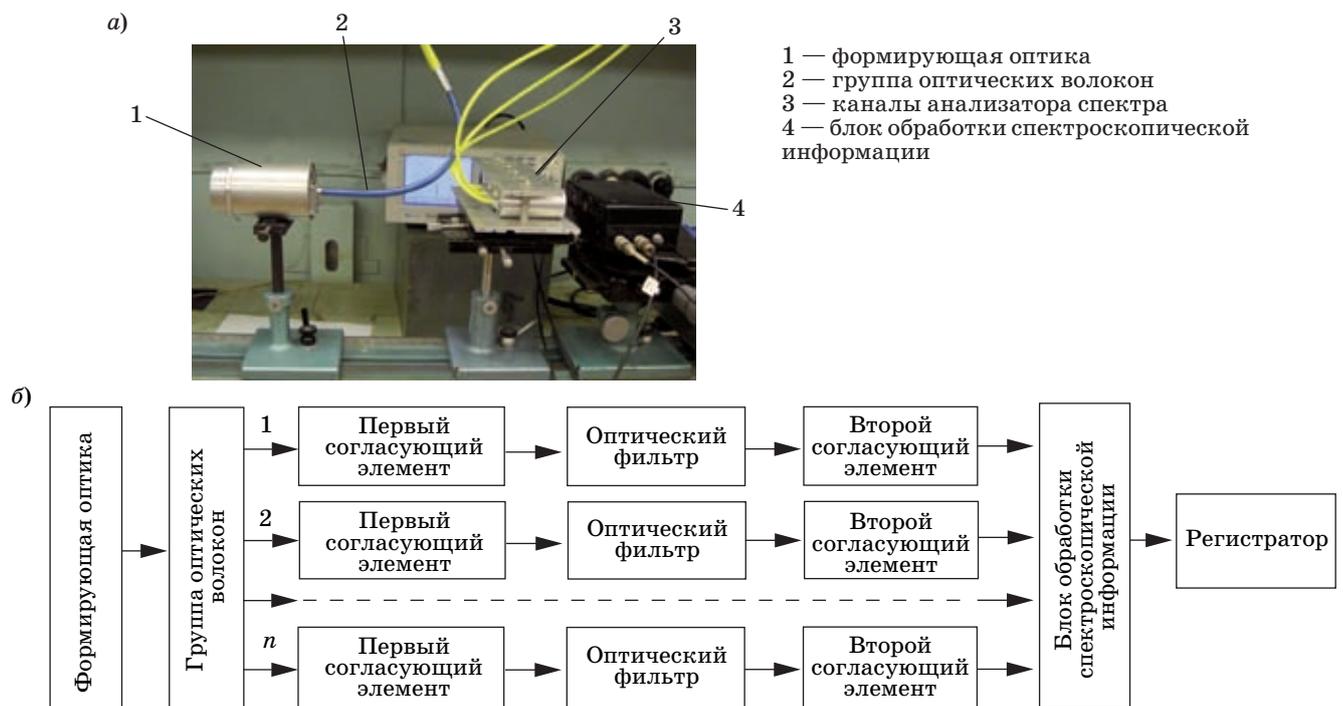
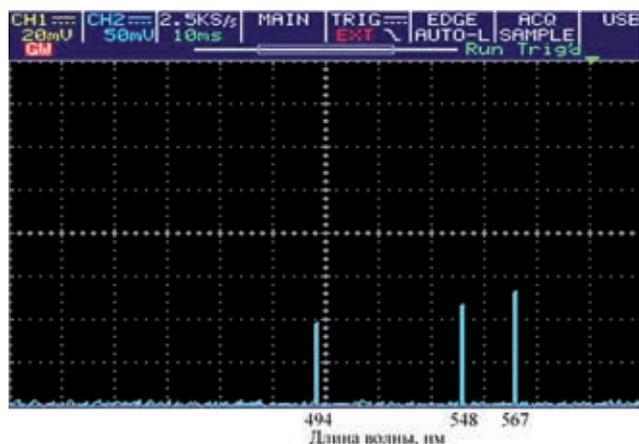


Рис. 3. Лабораторный макет (а) и структурная схема (б) оптического анализатора спектра параллельного типа



■ Рис. 4. Спектральная диаграмма металлогалогенной лампы

на заданное расстояние, безопасное для спектральной аппаратуры. В качестве согласующих элементов используются коллимирующие линзы. Задача блока обработки спектроскопической информации состоит в считывании уровней сигнала, поступающих с каждого канала анализатора спектра, и отображении спектроскопической информации на регистраторе (осциллографе).

В рамках получения предварительных результатов разработки были реализованы формирующая оптика, группа оптических волокон, три канала анализа спектра сигнала и блок обработки спектроскопической информации (рис. 3, б).

При проведении экспериментальных исследований в качестве источника оптического излучения использовалась металлогалогенная лампа мощностью 150 Вт Philips Master Colour CDM-T 150W/942. Полученная спектральная диаграмма представлена на рис. 4.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность измерения энергетических спектров опти-

ческих излучений с помощью многоканальной селективной системы. Вопрос спектральной обработки оптического сигнала в данной системе рассмотрен в терминах общей теории линейных систем. Причем исследование вопроса базируется на нетрадиционных для оптики понятиях комплексных спектральных функций оптических колебаний и комплексных аппаратных функций. Для выполненных исследований характерна тесная связь с математическим аппаратом теории интегралов Фурье, где спектры колебательных явлений представляются функциями частот, а не длин волн, как принято в теории оптических спектральных приборов, что является дальнейшим развитием методов радиооптики.

Все теоретические выкладки одинаково пригодны для описания действия параллельных анализаторов спектра, работающих как в радио-, так и в оптическом диапазонах, поскольку общая методология, опирающаяся на теорию линейных систем, пригодна для описания действия любых спектральных приборов.

Приведенные выкладки показали, что анализатор энергетических спектров может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями — комплексной и энергетической.

Предложенные аналитические выкладки являются теоретической базой для описания действия разработанного экспериментального макета параллельного анализатора спектра оптических сигналов, реализованного по материалам патента [6]. Проведенные экспериментальные исследования дали обнадеживающие результаты и могут служить основой при разработке спектральных приборов этого нового класса для внедрения их в практику оптических спектральных измерений.

Авторы благодарят Е. Н. Котликова за предоставленные оптические фильтры для проведения экспериментальных исследований.

Литература

1. Москалец О. Д. Теоретическое исследование некоторых вопросов анализа комплексного и энергетического спектров акустооптическим устройством // Методы и устройства радио- и акустической голографии: сб. науч. ст. — Л.: Наука, 1983. С. 102–109.
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Изд. 4-е. — М.: ГИФМЛ, 1962. — 236 с.
3. Тверской В. И. Дисперсионно-временные методы измерений спектров радиосигналов. — М.: Сов. радио, 1974. — 240 с.
4. Тарасов К. И. Спектральные приборы. 2-е изд., доп. и перераб. — Л.: Машиностроение, 1977. — 368 с.
5. Мартынов В. А., Селихов Ю. И. Панорамные приемники и анализаторы спектра. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1980. — 352 с.
6. Пат. 86734 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков, Е. Н. Котликов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев,

- В. Н. Прокашев (РФ). № 2009116195/22 // Изобретения и полезные модели. 2009. № 25. С. 2.
7. Горелик Г. С. Колебания и волны. Изд. 2-е. — М.: ГИФМЛ, 1959. — 650 с.
 8. Зверев В. А., Степанов Н. С. Предисловие редакторов // Экспериментальная радиооптика: сб. науч. ст. — М.: Наука, 1979. — 255 с.
 9. Ланда П. С. Автоколебания в распределенных системах. Изд. 2-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. — 320 с.
 10. Солодов А. В., Петров Ф. С. Линейные автоматические системы с переменными параметрами. — М.: Наука, 1971. — 325 с.
 11. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. — М.: Наука, 1971. — 408 с.
 12. Moskaletz O. D. Physical signal theory as a part of quantum laser theory // Proc. of SPIE. 2002. Vol. 5066. P. 213–224.
 13. Vaganov M. A., Moskaletz O. D. Parallel measurement method of spectrum of signal // Wave electronics and Its Applications in the Information and Tel. Systems: Proc. of XII Intern. conf. for young researchers. St. Petersburg, 2009. P. 26.
 14. Размахнин М. К., Яковлев В. П. Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике. пер. и науч. обр. — М.: Сов. радио, 1971. — 256 с.
 15. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.

**V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ»- МЭС-2012**

8–12 октября 2012 г.

Место проведения: Подмоскowie

Организатор

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Соорганизатор

Московское Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи (МНТОРЭС) им. А. С. Попова

Направления работы

Теоретические аспекты проектирования микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)

Методы и средства автоматизации проектирования микро- и нанoeлектронных схем и систем МЭС (САПР СБИС)

Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифро-аналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС

Особенности проектирования СБИС для нанометровых технологий

Системы на кристалле перспективной РЭА

Выставка и презентация коммерческих продуктов

Тематика

Схемы и системы нанометровых технологий

Системы на кристалле

Проектирование цифровых СБИС

Проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС

Проектирование СБИС со смешанными сигналами

Методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков

Микромеханические системы

Специализированные (стойкие к спецвоздействиям, фоточувствительные и т. п.) СБИС

Фоточувствительные СБИС

Методы цифровой обработки информации

Методы высокоуровневого моделирования

Методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС

Методы электрического моделирования в САПР СБИС

Методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования

Методы моделирования радиотехнических СБИС

Методы генерации моделей для САПР СБИС

Методы автоматического топологического проектирования в САПР СБИС

Методы приборно-технологического моделирования

Методы моделирования межсоединений

Методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем нанoeлектроники

Язык конференции

Рабочим языком конференции является русский язык

Оргвзнос

Целевой взнос включает расходы на подготовку и издание информационных материалов и трудов конференции, аренду помещений и оргтехники, транспортные расходы (приезд 8 октября 2012 г., отъезд 12 октября 2012 г.), прием Оргкомитета.

Докладчик (автор или любой соавтор) в случае принятия доклада обязан оплатить целевой взнос до 1 июля 2012 г., в противном случае доклад будет снят с программы конференции.

Подробная информация на сайте конференции:

<http://www.mes-conference.ru>

Публикация трудов

Все доклады, принятые на конференцию, будут опубликованы в трудах конференции.

Сборник трудов конференции МЭС включен в Перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Контрольные сроки

Регистрация и представление докладов — до 31 января 2012 г. на сайте конференции.

Извещение авторов о решении программного комитета — до 15 апреля 2012 г.

Прием финальной версии доклада — до 1 июня 2012 г.

Дополнительная информация и справки

124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. 3

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Оргкомитет МЭС-2012

Ученый секретарь Оргкомитета МЭС-2012 Борискин Вячеслав Степанович

Тел.: 8 (499) 729-95-69

Факс: 7 (499) 729-92-08

Эл. адрес: boriskin@ippm.ru

Сайт: <http://www.mes-conference.ru>

УДК 519.7

РОБАСТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ

И. Б. Фуртат,

канд. техн. наук, доцент

Астраханский государственный технический университет

Получен алгоритм робастного управления динамической сетью с переключающейся структурой, когда измерению доступны только выходы локальных подсистем, но не их производные. Предполагается, что математические модели подсистем сети описываются линейными дифференциальными уравнениями, подверженными действию внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. Полученная схема управления обеспечивает синхронизацию сети с требуемой точностью. Работоспособность полученной схемы проиллюстрирована на численном примере сети, состоящей из четырех узлов.

Ключевые слова — динамическая сеть, орграф, граф, синхронизация сети, компенсация возмущений.

Введение

В последнее время наблюдается рост интереса к проблемам управления динамическими сетями [1–6], вызванный появлением новых задач в биологии, физике, робототехнике, энергетических и телекоммуникационных сетях и т. п. Одним из способов управления динамической сетью является консенсусное управление, цель которого состоит в поиске управляющего устройства, способного синхронизировать подсистемы сети, в которой нет лидера. При этом траектории локальных объектов стремятся к некоторой общей величине, зависящей от их параметров и межузловых связей.

На сегодняшний день уже предложено достаточное количество решений по проблеме управления динамическими сетями. Так, для обеспечения консенсуса в мультиагентных системах с измеряемыми векторами состояния локальных объектов предложен статический закон управления [1]. При измерении выходов локальных подсистем вводится наблюдатель, на базе оценок которого формируется динамический закон регулирования. Получены условия расчета настраиваемых параметров в регуляторе, учитывающие топологию графа и орграфа сети. На базе подхода H^∞ -оптимизации предложен способ синхронизации сети в предположении, что измерению доступны векторные входы и выходы каждой подсистемы [2]. Однако для расчета регулятора необходимо решить матричное уравнение Риккати,

зависящее от параметров параметрически неопределенных локальных объектов. Было впервые исследовано статическое консенсусное управление по выходу сетевыми объектами произвольного порядка [3]. Для решения задачи использовалась теорема о пассивации [7] и результаты работы [1].

Особый интерес представляет управление сетью, топология которой может изменяться в процессе ее функционирования. Такие задачи возникают, например, при управлении группой мобильных роботов [6], связь между которыми ограничена, или при управлении электроэнергетической сетью [8], где связь между электрическими генераторами зависит от параметров линий передачи и нагрузки. Так, в работах [4, 5] консенсус в сети, состоящей из интеграторов или устойчивых линейных дифференциальных уравнений, предложено осуществлять с использованием статического закона регулирования и в предположении, что граф сети сбалансированный. В статье [6] описано решение для сети интеграторов при условии, что орграф, ассоциированный с сетью, содержит ориентированное остовное дерево. Под ориентированным остовным деревом понимается ориентированное дерево, составленное из ребер орграфа и такое, что в нем существует путь из корня в любую другую вершину [6, 9]. Стоит отметить, что многие результаты, касающиеся свойств орграфа с ориентированным остовным деревом [6], были получены ранее [9].

Как правило, в вышеперечисленных работах не рассматривались вопросы управления сетью неидентичных объектов, когда измерению доступны только скалярные выходы подсистем. На практике задачи управления неидентичными объектами возникают, например, при управлении сетью электрических генераторов различных мощностей. Возможность измерения только скалярных выходов подсистем сети связана с отсутствием соответствующих измерительных устройств. Так, авторы работы [8] отмечают, что при управлении сетью электрических генераторов устойчивыми измерениями, особенно в аварийных ситуациях, являются измерения только относительных угловых скоростей вращения роторов генераторов.

В настоящей статье предложено робастное управление динамической сетью с переключающейся структурой, где каждая ее подсистема описывается линейным дифференциальным уравнением, подверженным действию внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. Предполагается, что измерению доступны только выходы локальных подсистем. При решении задается орграф, каждая вершина которого ассоциирована с соответствующей подсистемой сети. Для компенсации неконтролируемых возмущений используется подход [10], основанный на введении вспомогательного контура, позволяющего выделить неконтролируемые возмущения в замкнутой системе. Полученный алгоритм обеспечивает синхронизацию сети с требуемой точностью. Показано, что результаты, предложенные для сети, ассоциированной с орграфом, справедливы и для сети, ассоциированной с графом.

Постановка задачи

Рассмотрим орграф $\Gamma_l = (V, E_l)$, ассоциированный с сетью S , где каждой вершине орграфа Γ_l соответствует подсистема S_i , $i = 1, \dots, k$; $V = \{v_1, \dots, v_k\}$ — множество вершин; $E_l \subseteq V \times V$ — множество ребер. Пусть $C = (c_{ij}) \in R^k$ — взвешенная матрица смежности орграфа Γ_l такая, что $c_{ij} > 0$, если $j \in N_i$, иначе $c_{ij} = 0$, $N_i = \{v_j \in V: (v_i, v_j) \in E_l\}$ — множество смежных вершин для узла v_i . Запись $(v_i, v_j) \in E_l$ означает, что информация поступает от подсистемы S_j к подсистеме S_i [11]. Считается, что в процессе функционирования системы структура связей орграфа может изменяться. Обозначим $\Gamma = \{\Gamma_l: l = 1, \dots, m\}$ — множество возможных значений топологий орграфа сети.

Например, при решении задач управления сетью электрических генераторов предполагается, что в каждом узле сети расположен генератор. При введении орграфа, ассоциированного с се-

тью, полагается, что каждый узел сети (электрический генератор) ассоциирован с вершиной орграфа. Линии связи между генераторами сети ассоциированы с дугами орграфа.

Рассмотрим подсистему S_i , соответствующую i -й вершине орграфа Γ_l сети S , динамические процессы в которой описываются следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i u_i(t) + \mathbf{D}_i f_i(t), \\ y_i(t) &= \mathbf{L}\mathbf{x}_i(t), \quad \mathbf{x}_i(0) = \mathbf{x}_{0i}, \quad i = 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i(t) \in R^n$ — вектор состояния i -й подсистемы; $u_i(t)$ и $y_i(t)$ — скалярные вход и выход, доступные измерению; $f_i(t)$ — неконтролируемое внешнее ограниченное возмущение; элементы матрицы $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ и векторов $\mathbf{B}_i \in R^n$, $\mathbf{D}_i \in R^n$ — неизвестные числа; $\mathbf{L} = [1, 0, \dots, 0]$ — матрица соответствующей размерности; \mathbf{x}_{0i} — неизвестные начальные условия. Так, при описании электроэнергетической сети модели электрических генераторов могут быть представлены уравнениями (1). Например, в работе [8] $\mathbf{x}_i(t) = [\delta_i(t), \omega_i(t), P_i(t)]^T$, где $\delta_i(t)$ — угол поворота ротора i -го генератора относительно синхронной оси вращения [рад]; $\omega_i(t)$ — относительная скорость ротора i -го генератора [рад/с]; $P_i(t)$ — разность электрической входной мощности, поступающей на i -й генератор, и входной механической мощности i -го генератора [отн. ед.].

Требуется синтезировать непрерывный закон управления, обеспечивающий ε -синхронизацию [12, 13] сети S с заданной точностью, т. е. необходимо обеспечить выполнение условия

$$|y_i(t) - y_j(t)| < \varepsilon \quad (2)$$

по истечении времени $t = T$, где ε — заданное число. При управлении электроэнергетической сетью целевое условие (2) является условием синхронизации сети генераторов. Решим сформулированную задачу при следующих *предположениях*.

1. Орграфы Γ_l , $l = 1, \dots, m$ содержат ориентированное остовное дерево.

2. Неизвестные элементы матриц \mathbf{A} , \mathbf{B}_i , \mathbf{D}_i и \mathbf{C} зависят от вектора неизвестных параметров $\zeta \in \Xi$, где Ξ — известное множество. Пары $(\mathbf{A}, \mathbf{B}_i)$ управляемы и пара (\mathbf{L}, \mathbf{A}) наблюдаема.

3. Выполнены условия: $\mathbf{A} = \mathbf{A}_N + \mathbf{B}_N \mathbf{h}^T(\zeta)$, $\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_N + \mathbf{B}_N \tau_i(\zeta)$, $\mathbf{D}_i = \mathbf{B}_N k_i(\zeta)$, где $\mathbf{A}_N \in R^{n \times n}$, $\mathbf{B}_N \in R^n$ — известные номинальные постоянные матрицы, причем \mathbf{A}_N — гурвицева; $\mathbf{h}(\zeta) \in R^n$, $\tau_i(\zeta) \in R$, $k_i(\zeta) \in R$ — неизвестные вектор и числа.

4. Локальные подсистемы (1) сети S — минимально фазовые объекты.

Метод решения

Принимая во внимание предположение 3, составим уравнение для ошибки

$$\tilde{\mathbf{x}}_i(t) = \sum_{j \in N_i} c_{ij} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))$$

в виде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) &= \mathbf{A}_N \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{B}_N \sum_{j \in N_i} c_{ij} [u_i(t) + \varphi_{ij}(t)], \\ \tilde{y}_i(t) &= \mathbf{L} \tilde{\mathbf{x}}_i(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_{ij}(t) = \mathbf{h}^T(\boldsymbol{\zeta})(\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) + \tau_i(\boldsymbol{\zeta})u_i(t) - (\tau_j(\boldsymbol{\zeta}) + 1) \times \times u_j(t) + k_i(\boldsymbol{\zeta})f_i(t) - k_j(\boldsymbol{\zeta})f_j(t)$ — функция, содержащая в себе неопределенности i -й подсистемы и смежных ей подсистем.

Чтобы выделить данные неопределенности [10], введем вспомогательный контур

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{ai}(t) &= \mathbf{A}_N \mathbf{x}_{ai}(t) + \alpha \mathbf{B}_N u_i(t), \\ y_{ai}(t) &= \mathbf{L} \mathbf{x}_{ai}(t), \quad \mathbf{x}_{ai}(0) = \mathbf{x}_{ai0}, \\ i &= 1, \dots, k. \end{aligned} \quad (4)$$

Принимая во внимание уравнения (3) и (4), составим функцию рассогласования $\sigma_i(t) = \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{x}_{ai}(t)$ в виде

$$\dot{\sigma}_i(t) = \mathbf{A}_N \sigma_i(t) + \mathbf{B}_N \psi_i(t), \quad \zeta_i(t) = \mathbf{L} \sigma_i(t). \quad (5)$$

Здесь $\psi_i(t) = \sum_{j \in N_i} c_{ij} [u_i(t) + \varphi_{ij}(t)] - \alpha u_i(t)$ — новая функция возмущения, содержащая в себе неопределенности i -й локальной подсистемы и смежных ей подсистем, а также неопределенности связей между ними. Преобразуем уравнение рассогласования (5) к форме вход-выход

$$\mathbf{Q}_N(p) \zeta_i(t) = \mathbf{R}_N(p) \psi_i(t), \quad (6)$$

где $\mathbf{Q}_N(p)$, $\mathbf{R}_N(p)$ — линейные стационарные дифференциальные операторы, полученные при переходе от (5) к (6), $\deg \mathbf{Q}_N(p) = n$, $\deg \mathbf{R}_N(p) = m$, $p = d/dt$ — оператор дифференцирования. Ради простоты положим $\mathbf{Q}_N(p) = \mathbf{Q}_m(p) \mathbf{R}_N(p)$.

Из уравнения (6) видно, что сигнал $\zeta_i(t)$ содержит информацию о возмущениях, которые присутствуют в функции $\psi_i(t)$. Если бы производные входа и выхода каждой локальной подсистемы были доступны измерению, то закон управления $u_i(t) = -1/\alpha_i \mathbf{Q}_m(p) \zeta_i(t) = -1/\alpha_i \psi_i(t)$, $i = 1, \dots, k$ обеспечил бы точную компенсацию возмущений. Однако из постановки задачи производные сигналов $y_i(t)$ и $u_i(t)$ не доступны измерению. Поэтому управляющее воздействие $u_i(t)$ сформируем в виде

$$u_i(t) = -\alpha^{-1} \mathbf{Q}_m(p) \bar{\zeta}_i(t), \quad i = 1, \dots, k. \quad (7)$$

Здесь $\bar{\zeta}_i(t)$ — оценка функции $\zeta_i(t)$. Принимая во внимание идеальное управление $u_i(t) = -1/\alpha_i \mathbf{Q}_m(p) \zeta_i(t)$ и реальное уравнение (7), перепишем (3) в виде

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = \mathbf{A}_N \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{B}_N \bar{\Delta}_i(t), \quad \tilde{y}_i(t) = \mathbf{L} \tilde{\mathbf{x}}_i(t), \quad (8)$$

где $\bar{\Delta}_i(t) = \bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)$.

Для оценки производных сигнала $\bar{\zeta}_i(t)$ в (7) рассмотрим наблюдатель [14]

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i(t) &= \mathbf{G}_0 \xi_i(t) + \mathbf{D}_0 (\bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)), \\ \bar{\zeta}_i(t) &= \mathbf{L} \xi_i(t), \quad i = 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\xi_i(t) \in R^\gamma$, $\gamma = n - m$; $\mathbf{G}_0 = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_{\gamma-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{I}_{\gamma-1}$ — единичная матрица порядка $\gamma - 1$; $\mathbf{D}_0 = -[d_1 \mu^{-1}, d_2 \mu^{-2}, \dots, d_\gamma \mu^{-\gamma}]^T$, коэффициенты $d_1, d_2, \dots, d_\gamma$ выбираются так, чтобы матрица $\mathbf{G} = \mathbf{G}_0 - \mathbf{D}\mathbf{L}$ была гурвицевой, $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_\gamma]^T$, $\mu > 0$ — достаточно малая величина.

Введем вектор $\bar{\eta}_i(t) = \bar{\mathbf{D}}(\xi_i(t) - \theta_i(t))$, который характеризует точность оценки производных сигнала $\zeta_i(t)$, где $\bar{\mathbf{D}} = \text{diag}\{\mu^{\gamma-1}, \mu^{\gamma-2}, \dots, \mu, 1\}$, $\theta_i(t) = [\zeta_i(t), \dot{\zeta}_i(t), \dots, \zeta_i^{(\gamma)}(t)]^T$. Продифференцировав $\bar{\eta}_i(t)$ по времени с учетом уравнения (9), получим $\dot{\bar{\eta}}_i(t) = \mu^{-1} \mathbf{G} \bar{\eta}_i(t) + \bar{\mathbf{b}} \zeta_i^{(\gamma)}(t)$; $\bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1} \mathbf{L} \bar{\eta}_i(t)$, где $\bar{\mathbf{b}} = [0; \dots; 0, 1]^T$. Преобразуем предпоследние уравнения в эквивалентные относительно выхода $\bar{\Delta}_i(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i(t) &= \mu^{-1} \mathbf{G} \eta_i(t) + \mathbf{b} \dot{\zeta}_i(t); \\ \bar{\Delta}_i(t) &= \mu^{\gamma-1} \mathbf{L} \eta_i(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\eta_i(t) \in R^\gamma$, причем первые компоненты векторов $\eta_i(t)$ и $\bar{\eta}_i(t)$ равны $\mathbf{b} = [1, 0, \dots, 0]^T$.

Принимая во внимание (10), перепишем (8) как

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) &= \mathbf{A}_N \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mu^{\gamma-1} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \Delta_i(t); \\ \tilde{y}_i(t) &= \mathbf{L} \tilde{\mathbf{x}}_i(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta_i(t) = [\eta_i^1(t), \dot{\eta}_i^1(t), \dots, (\eta_i^1(t))^{(\gamma)}]^T$; \mathbf{g} — вектор, составленный из коэффициентов оператора $\mathbf{Q}_N(p)$, записанных в обратном порядке.

Утверждение. Пусть выполнены предположения 1–4. Тогда система управления (4), (7), (9) при $\mu \leq \mu_0$ обеспечивает выполнение ε -синхронизации (2), где $\mu_0 > 0$ и

$$\begin{aligned} \mu_0 < \min \left\{ \|\mathbf{Q}_2\|^{-1} \|\mathbf{H}\mathbf{b}\|^2; \right. \\ \left. \gamma^{-1} \sqrt{0,125(k-1)^{-1} \rho \varepsilon^{-1} c} \|\mathbf{Q}_1\| \|\mathbf{P}\mathbf{B}_N \mathbf{g}^T\|^{-2} \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\rho = \min_{l=1, \dots, m} \{\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l))\}$, $\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l))$ — наименьшее ненулевое собственное число (алгебраиче-

ская связность [11]) нормированного симметризованного лапласиана $L(\Gamma_l)$ орграфа Γ_l , матрицы P и H являются решением уравнений

$$A_N^T P + P A_N = -Q_1, \quad G^T H + H G = -Q_2,$$

$$Q_1 = Q_1^T > 0, \quad Q_2 = Q_2^T > 0. \quad (13)$$

Под нормированным симметризованным лапласианом понимается симметризованный лапласиан, соответствующий орграфу Γ_l , у которого $c_{ij} = 1$, если $j \in N_i$, иначе $c_{ij} = 0$. Понятие симметризованного лапласиана $L(\Gamma_l)$ и его свойства подробно рассмотрены в работе [11].

Следствие. Утверждение справедливо, если $\Gamma_l, l = 1, \dots, m$ — графы, у которых есть остовное дерево. Причем параметр μ_0 можно выбирать из условия

$$\mu_0 < \min \left\{ \|Q_2\|^{-1} \|Hb\|^2; \right.$$

$$\left. \gamma^{-1} \sqrt{0,125(k-1)^{-1} \tilde{\rho} \underline{c}^{-1} \bar{c} \|Q_1\| \|PB_N G^T\|^{-2}} \right\}, \quad (14)$$

где $\tilde{\rho} = \lambda_2(L(\Gamma_{ls}))$, Γ_{ls} — любой подграф из множества графов Γ_l , содержащий остовное дерево и состоящий из k вершин и $k - 1$ ребер.

Пример

Рассмотрим орграфы $\Gamma_l, l = 1, \dots, 6$ (рис. 1), описывающие информационные связи сети S , состоящей из четырех подсистем $S_i, i = 1, \dots, 4$.

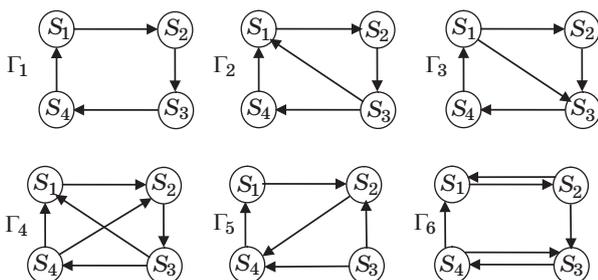
Рассмотрим подсистему S_i , которая описывается следующим уравнением:

$$\dot{x}_i(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix} u_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_i \end{bmatrix} f_i(t);$$

$$y_i(t) = [1 \quad 0] x_i(t), \quad i = 1, \dots, 4.$$

Класс неопределенности Ξ задан неравенствами: $|a_j| \leq 10; j = 1, 2; 0 < b_i \leq 10; |d_i| \leq 10; |f_i(t)| \leq 10; 0,1 < c_{ij} \leq 10$.

Цель управления состоит в синтезе алгоритма, обеспечивающего выполнение ε -синхронизации (2).



■ Рис. 1. Орграфы Γ_l сети S

Выберем в (4) $\alpha = 1, A_N = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, B_N = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

и сформируем вспомогательный контур в виде

$$\dot{x}_{ai}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_{ai}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i(t);$$

$$y_{ai}(t) = [1 \quad 0] x_{ai}(t), \quad x_{ai}(0) = 0, \quad i = 1, \dots, 4.$$

Пусть в (9) $D = [2 \quad 1]^T$. Для выбора параметра μ в (9) воспользуемся условиями (12) и (13). Пусть в (13) $Q_1 = Q_2 = 0,1I_2$. Из структур орграфов сети S (см. рис. 1) наименьшая алгебраическая связность ρ соответствует орграфу Γ_1 и равна 1,708. Из условий (12) и (13) определим интервал для μ_0 : $\mu_0 < 0,05$. Выберем $\mu = 0,01$. Тогда уравнения наблюдателя производных сигнала $\zeta_i(t)$ примут вид

$$\dot{\xi}_i^1(t) = \xi_i^2(t) - 2 \cdot 100 (\xi_i^1(t) - \zeta_i(t));$$

$$\dot{\xi}_i^2(t) = -100^2 (\xi_i^1(t) - \zeta_i(t)),$$

$$\xi_i(0) = 0, \quad i = 1, \dots, 4.$$

В результате закон управления (7) можно сформировать как

$$u_i(t) = -(\dot{\xi}_i^2 + 2\xi_i^2 + \xi_i^1), \quad i = 1, \dots, 4.$$

Рассмотрим пример [2–5], где каждый узел сети S задан двойным интегратором, т. е. $a_1 = a_2 = 0$. Остальные параметры для каждой подсистемы $S_i, i = 1, \dots, 4$ сети S выберем следующими:

$$S_1: b_1 = 1, d_1 = 1, f_1(t) = 1 + \sin t, x_1(0) = [1 \quad 1]^T;$$

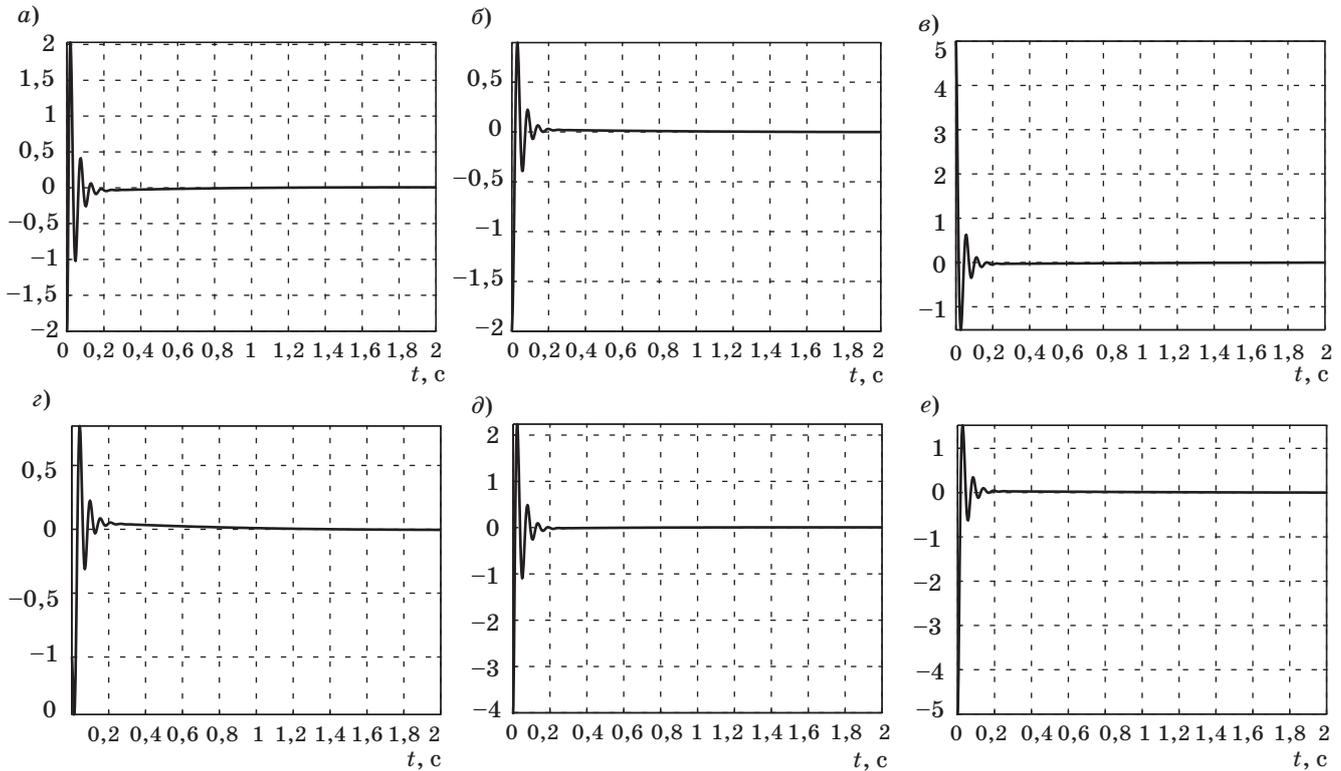
$$S_2: b_2 = 2, d_2 = 3, f_2(t) = 2 + \sin 2t, x_2(0) = [-1 \quad 2]^T;$$

$$S_3: b_3 = 3, d_3 = 2, f_3(t) = 1 + 2\sin 1,2t, x_3(0) = [-2 \quad 3]^T;$$

$$S_4: b_4 = 2, d_4 = 5, f_4(t) = 1 + 3\sin 0,8t, x_4(0) = [3 \quad 4]^T.$$

Пусть в процессе функционирования системы топология сети S (см. рис. 1) изменяется последовательно каждые 0,3 с. Элементы взвешенной матрицы смежности C зададим в виде $c_{ij} = 0,4ij(0,2 + 0,1 \sin(ijt))$. На рис. 2, $a-e$ представлены результаты переходных процессов по ошибкам $\tilde{y}_{12}(t) = y_1(t) - y_2(t), \tilde{y}_{13}(t) = y_1(t) - y_3(t), \tilde{y}_{14}(t) = y_1(t) - y_4(t), \tilde{y}_{23}(t) = y_2(t) - y_3(t), \tilde{y}_{24}(t) = y_2(t) - y_4(t)$ и $\tilde{y}_{34}(t) = y_3(t) - y_4(t)$ соответственно.

Результаты моделирования показали, что предложенная система управления обеспечивает условие ε -синхронизации с заданной точностью. Причем с уменьшением числа μ в наблюдателе (9) уменьшается значение ε в целевом условии (2), что подтверждает результаты аналитических расчетов.



■ Рис. 2. Переходные процессы: а — по $\tilde{y}_{12}(t)$; б — по $\tilde{y}_{13}(t)$; в — по $\tilde{y}_{14}(t)$; г — по $\tilde{y}_{23}(t)$; д — по $\tilde{y}_{24}(t)$; е — по $\tilde{y}_{34}(t)$

Заключение

Предложен алгоритм робастного управления динамической сетью с переключающейся структурой. Каждая подсистема сети описывается линейным дифференциальным уравнением, подверженным действию внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. Предполагалось, что измерению доступны только выходы локальных подсистем, но не их производные. При решении рассматривался орграф, вершины которого ассоциированы с соответствующими подсистемами сети. На базе метода вспомогательного контура [10] синтезирован алгоритм, позволяющий обеспечить синхронизацию сети с заданной точностью ϵ , которая зависит от выбора параметров в системе управления.

Получены условия, позволяющие выбирать параметр μ в наблюдателе производных (9) с учетом топологии орграфа сети. Алгоритм обобщен на случай, если узлы сети ассоциированы с вершинами графа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения

Для доказательства утверждения рассмотрим две вспомогательные леммы.

Лемма 1. Пусть задан орграф Γ_l , у которого есть ориентированное остовное дерево. Рассмотрим квадратичную форму

$$W(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) = 0,5 \mathbf{x}^T(t) (\mathbf{B}^T \otimes \mathbf{I}_n) (\mathbf{B} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{x}(t), \quad (П1)$$

где $\mathbf{x}_i(t) \in R^n$; $\mathbf{x}(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_k^T(t)]^T \in R^{kn}$; \mathbf{B} — лапласиан орграфа Γ_l ; \otimes — произведение Кронекера (прямое произведение). Тогда для $k > 1$ квадратичную форму (П1) можно оценить снизу и сверху:

$$W(t) \geq 0,25(k-1)^{-1} \lambda_2(L(\Gamma_l)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t));$$

$$W(t) \leq \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)). \quad (П2)$$

Понятия лапласиана, произведения Кронекера и их свойства подробно рассмотрены в работах [6, 9, 11, 15].

Доказательство леммы 1: Докажем сначала оценку снизу. Для этого осуществим преобразование

$$W(t) = 0,5\mathbf{x}^T(t)(\mathbf{B}^T \otimes \mathbf{I}_n)(\mathbf{B} \otimes \mathbf{I}_n)\mathbf{x}(t) = 0,5\mathbf{x}^T(t)(L(\Gamma_l) \otimes \mathbf{I}_n)\mathbf{x}(t).$$

Известно [6, 9, 11], что симметризованный лапласиан $\mathbf{L}(\Gamma) = \mathbf{B}^T\mathbf{B}$ — неотрицательная матрица. Так как орграф $\mathbf{L}(\Gamma)$ содержит ориентированное остовное дерево, то $0 = \lambda_1(\mathbf{L}(\Gamma)) < \lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma)) \leq \dots \leq \lambda_k(\mathbf{L}(\Gamma))$, т. е. наименьшее собственное число $\lambda_1(\mathbf{L}(\Gamma)) = 0$ имеет единичную кратность [6, 9, 11]. Тогда последнее выражение для $W(t)$ оценим снизу как

$$0,5\mathbf{x}^T(t)(L(\Gamma_l) \otimes \mathbf{I}_n)\mathbf{x}(t) \geq 0,5\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l))\mathbf{x}^T(t)\mathbf{x}(t). \quad (\text{П3})$$

Для $k > 1$, воспользовавшись неравенством

$$\mathbf{x}^T(t)\mathbf{x}(t) \geq 0,5(k-1)^{-1} \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))$$

и подставив его в (П3), получим оценку снизу (П2) для квадратичной формы (П1).

Оценка сверху очевидна, так как это равносильно введению в орграфе дополнительных ребер, которые соединяют все пары вершин, т. е. орграф Γ_l дополнен до полного орграфа.

Лемма 2. Пусть орграф Γ_l содержит ориентированное остовное дерево. Рассмотрим квадратичную форму

$$W(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} c_{ij} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T \mathbf{K} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)), \quad (\text{П4})$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{K}^T$; $0 < \underline{c} < c_{ij} < \bar{c}$. Тогда для $k > 1$ справедливы следующие оценки снизу и сверху:

$$W(t) \geq 0,25\underline{c}(k-1)^{-1}\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T \mathbf{K} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t));$$

$$W(t) \leq \bar{c} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T \mathbf{K} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)). \quad (\text{П5})$$

Доказательство леммы 2: Докажем оценку

снизу. Введем преобразование $\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{w}_i(t)$ и подставим его в (П4):

$$W(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k c_{ij} (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t))^T \times \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{K} \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t)) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k c_{ij} (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t))^T (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t)).$$

Тогда с учетом (П1) и (П2)

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} c_{ij} (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t))^T (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t)) \geq \underline{c} \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t))^T (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t)) \geq 0,25\underline{c}(k-1)^{-1}\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t))^T (\mathbf{w}_i(t) - \mathbf{w}_j(t)).$$

Осуществив в последнем выражении обратную замену $\mathbf{w}_i(t) = \mathbf{K}^{\frac{1}{2}}\mathbf{x}_i(t)$, получим

$$0,25\underline{c}(k-1)^{-1}\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T \mathbf{K}^{\frac{1}{2}} \mathbf{K}^{\frac{1}{2}} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) \geq 0,25\underline{c}(k-1)^{-1}\lambda_2(\mathbf{L}(\Gamma_l)) \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))^T \mathbf{K} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)).$$

Как и в лемме 1, оценка сверху следует из того, что орграф дополнен до полного орграфа.

Перейдем теперь к доказательству утверждения. Рассмотрим систему, составленную из уравнений (10), (11) и записанную в виде

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = \mathbf{A}_N \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mu_2^{\gamma-1} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \Delta_i(t),$$

$$\mu_1 \dot{\boldsymbol{\eta}}_i(t) = \mathbf{G} \boldsymbol{\eta}_i(t) + \mu_2 \mathbf{b} \zeta_i(t). \quad (\text{П6})$$

Для исследования поведения ее решений воспользуемся первой леммой [16]. Согласно [16], положим в (П6) $\mu_2 = 0$. Очевидно, что в этом случае система (П6) асимптотически устойчива в силу матриц \mathbf{A}_N и \mathbf{G} . Следовательно, векторы $\tilde{\mathbf{x}}_i(t)$, $\boldsymbol{\eta}_i(t)$ ограничены вместе со своими первыми производными. Тогда в (П6) ограничены сигналы $\Delta_i(t)$, $\zeta_i(t)$ [16]. Из ограниченности $\Delta_i(t)$ следует, что в (9) $|\xi_i(t)| < \infty$, а значит из (7) $|u_i(t)| < \infty$. Однако необходимо определить μ_0 , при котором исходная система будет диссипативной. Пусть $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$. Выберем функцию Ляпунова

$$V(t) = \sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \sum_{i=1}^k \boldsymbol{\eta}_i^T(t) \mathbf{H} \boldsymbol{\eta}_i(t). \quad (\text{П7})$$

Принимая во внимание (13), возьмем от (П7) производную по времени вдоль траекторий (П6):

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^k \left[-\tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{Q}_1 \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + 2\mu_0^{\gamma-1} \tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \Delta_i(t) \right] + \sum_{i=1}^k \left[-\mu_0^{-1} \boldsymbol{\eta}_i^T(t) \mathbf{Q}_2 \boldsymbol{\eta}_i(t) + \boldsymbol{\eta}_i^T(t) \mathbf{H} \mathbf{b} \zeta_i(t) \right]. \quad (\text{П8})$$

Для оценки первого и второго слагаемых в (П8) воспользуемся (П5):

$$\begin{aligned} -\sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) &= -\sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} c_{ij} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) \leq \\ &\leq -0,25c(k-1)^{-1} \rho \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t), \end{aligned}$$

где $\tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)$;

$$\begin{aligned} 2\mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \Delta_i(t) &\leq 2\mu_0^{\gamma-1} \times \\ &\times \sum_{i=1}^k \left[\tilde{\mathbf{x}}_i^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \mathbf{g} \mathbf{B}_N^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + |\Delta_i(t)|^2 \right] \leq \\ &\leq 2\mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} c_{ij} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \mathbf{g} \mathbf{B}_N^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) + \\ &+ 2\mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k |\Delta_i(t)|^2 \leq 2\bar{c} \mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \times \\ &\times \mathbf{g} \mathbf{B}_N^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) + 2\mu_0^{\gamma-1} \sum_{i=1}^k |\Delta_i(t)|^2. \end{aligned}$$

Четвертое слагаемое в (П8) оценим в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) \mathbf{H} \mathbf{b} \dot{\zeta}_i(t) &\leq \\ &\leq \sum_{i=1}^k \left[\mu_0^{-1} \eta_i^T(t) \mathbf{H} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{H} \eta_i(t) + \mu_0 |\dot{\zeta}_i(t)|^2 \right]. \end{aligned}$$

Примем $\chi = \sup_t \left\{ 2\mu_0^{\gamma-2} |\Delta_i(t)|^2 + |\dot{\zeta}_i(t)|^2 \right\}$. Тогда

выражение (П8) можно переписать как

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \left(0,25c(k-1)^{-1} \rho \mathbf{Q}_1 - \right. \\ &\quad \left. - 2\bar{c} \mu_0^{\gamma-1} \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \mathbf{g} \mathbf{B}_N^T \mathbf{P} \right) \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) - \\ &\quad - \mu_0^{-1} \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) \left(\mathbf{Q}_2 - \mathbf{H} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{H} \right) \eta_i(t) + k\mu_0 \chi. \end{aligned}$$

Очевидно, если выполнено условие (12) и $\mathbf{Q}_2 - \mathbf{H} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{H} > 0$, то $\dot{V}(t) \leq -\beta V(t) + k\mu_0 \chi$, $\beta > 0$. Пусть

$$\begin{aligned} 0,25c(k-1)^{-1} \rho \mathbf{Q}_1 - 2\bar{c} \mu_0^{\gamma-1} \times \\ \times \mathbf{P} \mathbf{B}_N \mathbf{g}^T \mathbf{g} \mathbf{B}_N^T \mathbf{P} = \mathbf{R}_1 > 0 \end{aligned}$$

и $\mathbf{Q}_2 - \mathbf{H} \mathbf{b} \mathbf{b}^T \mathbf{H} = \mathbf{R}_2 > 0$. Перепишем последнее неравенство как

$$\dot{V}(t) \leq -\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{R}_1 \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) - \mu_0^{-1} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) \mathbf{R}_2 \eta_i(t) + k\mu_0 \chi. \quad (\text{П9})$$

В силу (П5) оценим функцию (П7) в виде

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{i=1}^k \sum_{j \in N_i} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) + \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) \mathbf{H} \eta_i(t) \leq \\ &\leq \bar{c} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \tilde{\mathbf{x}}_{ij}^T(t) \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_{ij}(t) + \sum_{i=1}^k \eta_i^T(t) \mathbf{H} \eta_i(t). \quad (\text{П10}) \end{aligned}$$

Выберем число β из условия

$$\begin{aligned} \beta &= \min \left\{ \bar{c} \lambda_{\max}^{-1}(\mathbf{P}) \lambda_{\min}(\mathbf{R}_1), \right. \\ &\quad \left. \mu_0^{-1} \lambda_{\max}^{-1}(\mathbf{H}) \lambda_{\min}(\mathbf{R}_2) \right\}. \end{aligned}$$

Тогда, с учетом (П9), перепишем (П10) как $\dot{V}(t) \leq -\beta V(t) + k\mu_0 \chi$. Решив последнее неравенство, получим $V(t) \leq V(0)e^{-\beta t} + (1 - e^{-\beta t})k\mu_0 \chi$, откуда для фиксированного значения времени $t = T$ следует оценка величины ε в целевом условии (2):

$$\begin{aligned} \varepsilon &\leq \sqrt{\lambda_{\min}^{-1}(\mathbf{P}) V(T)} \leq \\ &\leq \sqrt{\lambda_{\min}^{-1}(\mathbf{P}) \left[V(0)e^{-\beta T} + (1 - e^{-\beta T})k\mu_0 \chi \right]}. \quad (\text{П11}) \end{aligned}$$

Оценки (12) и (П11) достаточно грубые. Но из них видно, что уменьшением числа μ_0 можно получить требуемую точность ε в (2).

Доказательство следствия: Действительно, граф, у которого есть остовное дерево, можно ассоциировать с симметричным оргграфом, у которого есть ориентированное остовное дерево. Поэтому система управления (4), (7), (9), (11) с расчетом параметра μ в (12) справедлива в случае, если сеть ассоциирована с графами Γ_l , $l = 1, \dots, m$.

Известно [11], для того чтобы граф Γ_l , состоящий из k вершин, содержал остовное дерево, необходимо, чтобы он содержал как минимум $k - 1$ ребер. Пусть $\Gamma_{l_1}, \dots, \Gamma_{l_r}$ — подграфы графа Γ_l , содержащие k вершин, $k - 1$ ребер и остовное дерево графа Γ_l . Лапласианы, а значит и симметризованные лапласианы подграфов $\Gamma_{l_1}, \dots, \Gamma_{l_r}$ — симметричные матрицы, отличающиеся только расположением соответствующих строк. Следовательно, их характеристические многочлены идентичны, т. е. они имеют одинаковые собственные числа. Причем алгебраическая связность графов $\Gamma_{l_1}, \dots, \Gamma_{l_r}$ не превосходит алгебраической связности любых подграфов графа Γ_l , которые содержат остовное дерево, k вершин и более чем $k - 1$ ребер (лемма 13.6.1 [11]). Следовательно, для расчета числа μ_0 можно воспользоваться выражением (14).

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург) при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00237, 10-08-90707) и при поддержке Федеральной целе-

вой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проводимой в Российском государственном университете нефти и газа им. И. М. Губкина (г. Москва).

Литература

1. Yoshioka C., Namerikawa T. Observed-based consensus control strategy for multi-agent system with communication time delay // 17th IEEE Intern. Conf. on Control Applications. San Antonio, 2008. P. 1037–1042.
2. Liu Y., Jia Y., Du J., Shiyong Y. Dynamic output feedback control for consensus of multi-agent systems: an H^∞ approach // American Control Conf. St. Louis, 2009. P. 4470–4475.
3. Джунусов И. А., Фрадков А. Л. Синхронизация по выходам в сетях линейных объектов // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Сб. докл. XI Междунар. конф. / ИПУ им. В. А. Трапезникова. М., 2010. С. 1–2.
4. Scardovi L., Sepulchre R. Synchronization in networks of identical linear systems // Automatica. 2009. Vol. 45. P. 2557–2562.
5. Xie G., Liu H., Wang L., Jia Y. Consensus in networked multi-agent systems via sampled control: switching topology case // American Control Conf. St. Louis, 2009. P. 4525–4530.
6. Ren W., Beard R. W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies // IEEE Trans. on Automatic Control. 2005. Vol. 50. N 5. P. 655–661.
7. Фрадков А. Л. Квадратичные функции Ляпунова в задаче адаптивной стабилизации линейного динамического объекта // Сиб. мат. журн. 1976. № 2. С. 436–446.
8. Dib W., Barabanov A., Ortega R., Lamnabhi-Lagarigue F. On transient stability of multi-machine power systems: a «globally» convergent controller for structure-preserving models // Proc. of the 17th World Congress IFAC. Seoul, 2008. P. 9398–9403.
9. Агаев Р. П., Чеботарев П. Ю. Матрица максимальных исходящих лесов орграфа и ее применения // Автоматика и телемеханика. 2000. № 9. С. 15–43.
10. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103–115.
11. Godsil C., Royle G. Algebraic graph theory. – N. Y.: Springer-Verlag, 2001. – 232 p.
12. Фрадков А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
13. Фрадков А. Л., Андриевский Б. Р., Андриевский А. Б. Оценка состояния пассивизируемых нелинейных систем при коммуникационных ограничениях // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 28–33.
14. Atassi A. N., Khalil H. K. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1999. Vol. 44. N 9. P. 1672–1687.
15. Ланкастер П. Теория матриц. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
16. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно возмущенных адаптивных систем. 1 // Автоматика и телемеханика. 1995. № 4. С. 119–127.

УДК 004.896

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В РАМКАХ МЕТОДОЛОГИИ DATA MINING

А. М. Вульфин,

аспирант

А. И. Фрид,

доктор техн. наук, профессор

Уфимский государственный авиационный технический университет

Решается задача выявления и распознавания технологических событий и состояний узла инженерной сети на основе анализа временных рядов, характеризующих протекающие на объекте процессы. Поэтапно решаются задачи предобработки исходных данных, сегментации временных рядов, кластеризации и классификации имеющихся данных и построения нейросетевой модели для анализа состояния объекта в рамках методологии Data Mining.

Ключевые слова — адаптивная сегментация, распределенная нейронная сеть с временной задержкой, метод обобщенного отношения правдоподобия, временной ряд.

Введение

В данной работе технологический сигнал рассматривается как последовательность следующих друг за другом участков, обладающих на некотором временном интервале постоянными свойствами (структурная модель сигнала) [1]. Технологический временной ряд представляет собой совокупность значений какого-либо параметра исследуемого технологического процесса, последовательно измеренных через некоторые (равные) промежутки времени. Следовательно, задача обработки сигнала заключается в выделении отдельных сегментов временных рядов с последующей их кластеризацией и сопоставлении полученных кластеров с имеющимися классами событий.

Подобное построение модели сигнала является обобщением задачи выделения особенностей [1]. Выделение в технологических сигналах особенностей, повторяющихся процессов, скрытых аномалий и закономерностей в автоматическом режиме может быть выполнено с помощью технологий интеллектуального анализа данных (Data Mining) [2]. Применение таких технологий лежит в основе диагностики состояния узла инженерной сети.

Целью работы является повышение эффективности интеллектуальной автоматизированной си-

стемы распознавания ситуаций, возникающих на объектах инженерной сети, в рамках методологии Data Mining и на основе нейронных сетей. Для ее достижения поставлены три задачи, решение которых представлено в данной статье.

Анализ технологических процессов в узлах инженерной сети с помощью методов интеллектуального анализа данных

Основной проблемой, возникающей при анализе динамических систем и недетерминированных сигналов различной природы, является определение их временных и частотных характеристик, поскольку любой недетерминированный сигнал и динамическая система, как правило, являются нестационарными объектами. Большинство технологических сигналов, описывающих динамические системы, являются нестационарными [3–7].

Исследование сигналов методами Data Mining является процессом, состоящим из нескольких этапов [2, 3].

Этап I. Сбор и хранение исходных данных. Этот этап включает два синхронных процесса:

- 1) регистрацию сигналов и подготовку их цифровых записей;
- 2) регистрацию событий и их описание.

Этап II. Применение методов Data Mining. Данный этап является ключевым и состоит из нескольких процессов.

1. Использование методов выделения особенностей сигналов на основании применения методов сегментации.

2. Унификация выделенных сегментов.

3. Классификация событий и кластеризация сегментов. После получения подготовленного материала необходимо его систематизировать с выделением классов, которые соответствуют основным группам:

— сервисные события, связанные с регламентированным воздействием на систему регистрации (пропуски данных);

— внешние воздействия на дочерних узлах инженерной сети;

— внутренние события на узле инженерной сети.

Поскольку для сегментов не существует априори заданных классов, то к ним требуется применить методику кластеризации.

4. Сопоставление событий кластерам сегментов. Сопоставление производят в хронологическом порядке, основываясь на гипотезе, что в один момент времени происходит одно событие [5, 6].

5. Построение модели, способной в реальном времени обрабатывать данные технологического временного ряда и классифицировать события и состояния узла инженерной сети.

6. Тестирование и оценка работоспособности модели выявления и распознавания технологических ситуаций.

Описанная концепция Data Mining показывает, что определенную сложность представляет этап сегментации исходного сигнала. Согласно работе [1], задача сегментации сводится к построению детектора, который по данной реализации сигнала $f(t)$ устанавливает истинность одной из вероятностных гипотез.

Практически всегда можно выделить некоторый временной интервал Δt , на котором параметры объекта изменяются несущественно, т. е. в пределах некоторого значения с пороговым отклонением ε . Такой интервал называют интервалом квазистационарности, а параметры объекта на этом интервале считаются постоянными. Таким образом, задача сегментации может быть сформулирована как задача поиска границ сегментов или задача поиска моментов изменения свойств сигнала [1].

Рассмотрим временной ряд $\{x_t\}$. Требуется построить детектор, выбирающий одну из двух гипотез H_0 и H_1 . Гипотеза H_0 предполагает, что исследуемый сигнал $\{x_t\}$ соответствует модели M_1 . Гипотеза H_1 предполагает, что существует момент времени τ , в который исследуемый сигнал

$\{x_t\}$ соответствует модели M_1 при $t < \tau$ и модели M_2 при $t \geq \tau$, где τ — граница сегмента:

$$[x_t | t < \tau], H_0: f(x) \leftarrow M_1;$$

$$[x_t | t \geq \tau], H_1: f(x) \leftarrow M_2.$$

Из сформулированной задачи следует, что основой разрабатываемых алгоритмов сегментации является гипотеза о виде модели M , описывающей исследуемый сигнал. Выбор модели определяется прикладной задачей, в данной работе рассматриваются линейные авторегрессионные модели (АР-модели) и нелинейные нейросетевые модели.

По характеру смены одного квазистационарного участка другим временные ряды, характеризующие рассматриваемые технологические процессы, можно разделить на две группы:

— временные ряды с переключающейся динамикой;

— временные ряды с дрейфовой динамикой.

Для анализа таких процессов придется разрабатывать специальные методы [3–7].

Разработка нейросетевой структуры адаптивной сегментации и обработки временных рядов

В работах [3–5] описано моделирование различных типов нестационарного поведения сигналов и систем, а также их недостатки, для преодоления которых предложено использовать [3]:

— распределенную нейронную сеть (НС) прямого распространения с задержкой по времени (distributed Time lagged Feedforward Network — dTLFN) для построения модели квазистационарного сегмента;

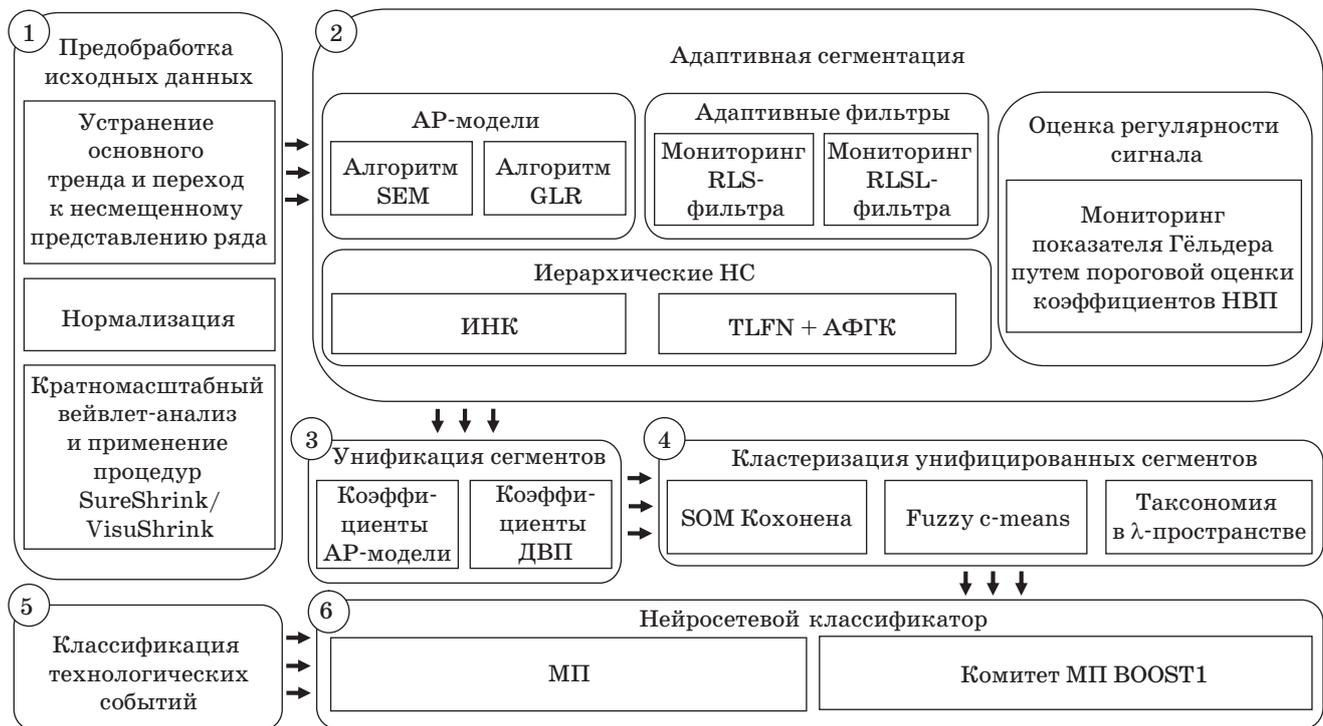
— метод обобщенного отношения правдоподобия (ООП) для адаптивной пороговой сегментации;

— модифицированный алгоритм формирования групп классов (АФГК) для кластеризации и классификации сегментов [7].

Это позволяет объединить несколько этапов анализа в рамках методологии Data Mining.

Построить модель технологических сигналов, руководствуясь технологией Data Mining, можно различными методами — как с применением предобработки исходных данных, так и с помощью разнообразных алгоритмов кластеризации на дальнейших этапах моделирования. Различные подходы к построению нейросетевой модели [3–5] представлены на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

РНК (RLS) — адаптивный фильтр, построенный по рекурсивному методу наименьших квадратов (Recursive Least Squares); МСО (SEM) — мера спектральной ошибки (Spectral Error Mea-



■ *Рис. 1. Методы построения нейросетевых систем анализа временных рядов*

sure); ООП (GLR) — обобщенное отношение правдоподобия (Generalized Likelihood Ratio); ПРНК (RLSE) — адаптивный фильтр, использующий алгоритм решетчатого рекурсивного метода наименьших квадратов с задержками (Recursive Least-Squares Lattice); НВП — непрерывное вейвлет-преобразование; ИНК — иерархический нейросетевой классификатор; МП — многослойный перцептрон; SOM Кохонена — самоорганизующиеся карты (self-organizing map) Кохонена; Fuzzy c-means — алгоритм нечеткой кластеризации с-средних; BOOST1 — алгоритм обучения комитета НС.

Исходный временной ряд приводится к нулевому среднему и единичному среднеквадратическому отклонению. В ходе подбора оптимальной схемы подготовки некоторых видов технологических данных для очистки сигнала от высокочастотных шумов были использованы процедуры предобработки данных с помощью пороговой фильтрации SureShrink/VisuShrink [4] коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) в целях выявления значимых компонент. Данная процедура была использована совместно с некоторыми методами адаптивной сегментации за исключением иерархических нейросетевых структур и методов оценки регулярности сигнала.

В работе [4] описаны базовые алгоритмы адаптивной сегментации с помощью АР-моделей,

а в [5] — адаптированная реализация методов для решения некоторого набора задач. Используются методы оценки МСО и метод ООП. Показано, что методы, использующие АР-модели, реагируют на «длительные» изменения и менее чувствительны к «быстрым» изменениям временного ряда, описывающего технологический процесс. Авторы [5] предлагают применять гетерогенную нейросетевую структуру, использующую dTLFN для построения модели квазистационарного сегмента, и метод ООП для адаптивной пороговой сегментации. Это позволяет расширить возможности систем адаптивной сегментации и повысить их чувствительность к «быстрым» изменениям технологического сигнала. Алгоритм адаптивной сегментации нестационарных временных рядов с помощью dTLFN и расширенного метода ООП является развитием методов, предложенных в работе [7].

Следующим этапом обработки временного ряда является этап унификации разнородных по длине сегментов и последующая их кластеризация. В качестве векторов признаков, характеризующих выделенные сегменты, могут быть использованы [3]:

- коэффициенты АР-модели, соответствующей каждому сегменту;
- k наиболее значимых коэффициентов ДВП данного сегмента.

В работе авторов [3] используются три метода кластеризации совокупности унифицированных сегментов для сравнения эффективности по критериям производительности и характеристикам полученных кластеров.

По имеющейся легенде, описывающей совокупность технологических событий, происходящих на узле инженерной сети, формируют классы, сопоставляемые с теми или иными кластерами сегментов, основываясь на временной последовательности событий.

Заключительным этапом является создание и обучение комитета НС, способного обрабатывать данные технологического временного ряда и классифицировать события и состояния узла. В работе [3] описан комитет НС, каждая из которых представляет собой МП, обучаемый согласно алгоритму BOOST1, а также проведено сравнение с одиночным МП.

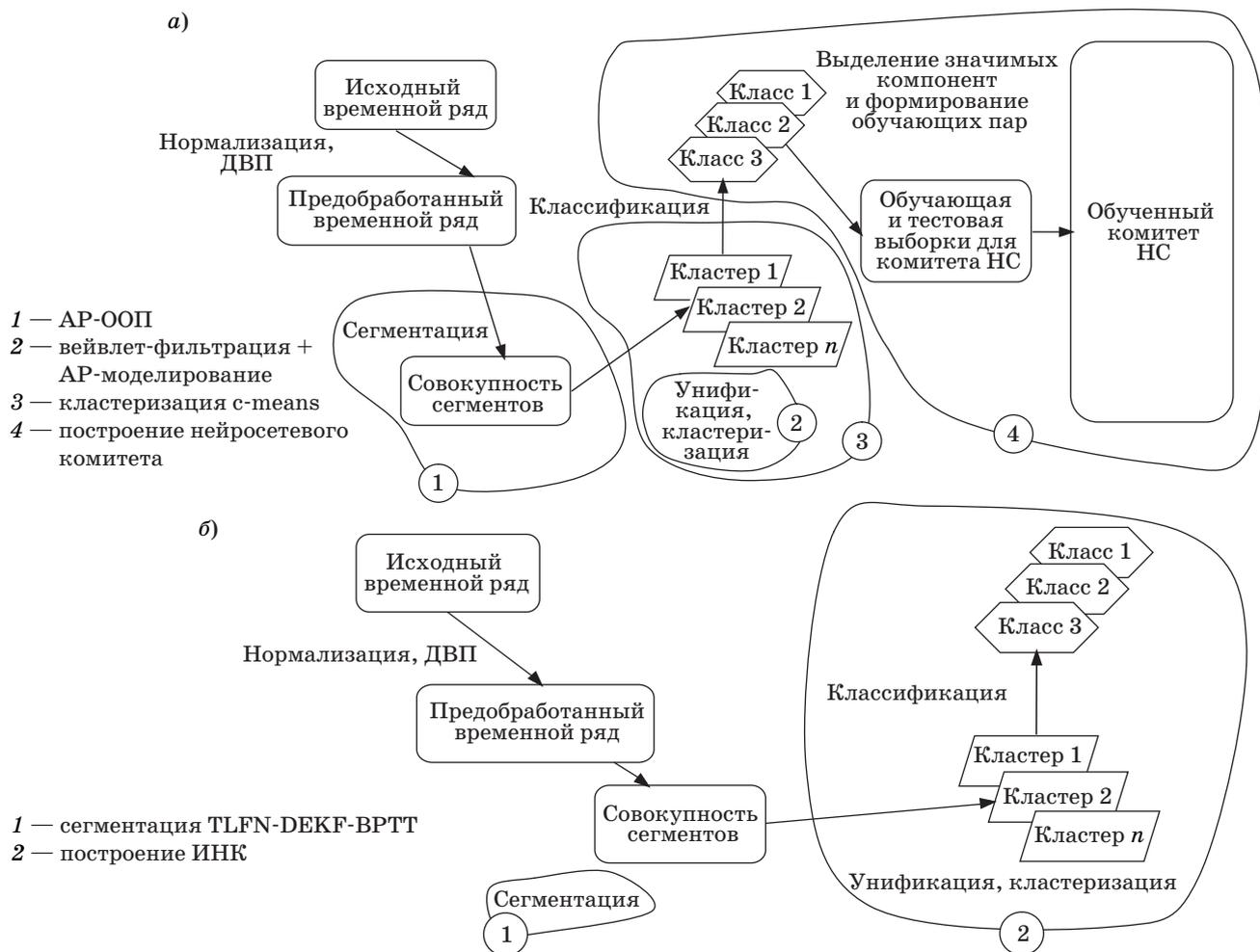
В работах [3–5] представлено несколько моделей анализа технологических временных рядов,

■ Таблица 1. Этапы и соответствующие алгоритмы анализа временного ряда

Номер метода	Используемый алгоритм			
	Предварительная сегментация	Унификация	Кластеризация	Классификация
1	AP-ООП	ДВП	Fuzzy c-means	Комитет МП BOOST1
2	ИНК			
3	dTLFN-ООП	АФГК		

комбинирующих алгоритмы различных этапов Data Mining. Этапы анализа временного ряда и соответствующие им алгоритмы приведены в табл. 1.

Для обучения dTLFN применены алгоритмы ВРТТ (Backpropagation Through Time, обратное распространение ошибки во времени) и DEKF



■ Рис. 2. Обобщенная схема работы системы выявления и идентификации событий с использованием AP-моделей (а) и dTLFN (б)

(Decoupled Extended Kalman Filter, несвязанный расширенный фильтр Калмана).

Представлена обобщенная схема (рис. 2, а) работы системы выявления и идентификации событий для первого метода (см. табл. 1).

Поскольку второй и третий методы анализа временных рядов, приведенные в табл. 1, включают помимо сегментации временного ряда этапы кластеризации-классификации согласно методологии Data Mining (рис. 2, б), то они не требуют использования дополнительных шагов и процедур, в отличие от AP-ООП, что позволяет сократить количество подстраиваемых параметров и упростить последующий анализ.

Анализ работоспособности нейросетевых систем обработки технологических временных рядов

Для оценки работоспособности гетерогенных нейросетевых систем обнаружения событий и описания текущего состояния технологического процесса рассмотрен ряд модельных задач.

В первой задаче моделирование нестационарного сигнала выполнено с помощью двухполюс-

■ **Таблица 2. Параметры методов адаптивной сегментации с помощью AP-моделей**

Параметры модели		Эксперимент 1
AP-модель	Порядок	8
Параметры алгоритма ООП	Длина опорного окна	20
	Длина тестового окна	10
Результаты сегментации	Количество выделенных/исходных сегментов	4/4
	Средневзвешенная оценка попадания	3,87
	Процент успешной классификации подвижным тестовым окном	94–98

ной AP-системы [3]. Параметры алгоритмов сегментации приведены в табл. 2, 3 (эксперимент 1) и 4 (эксперимент 1).

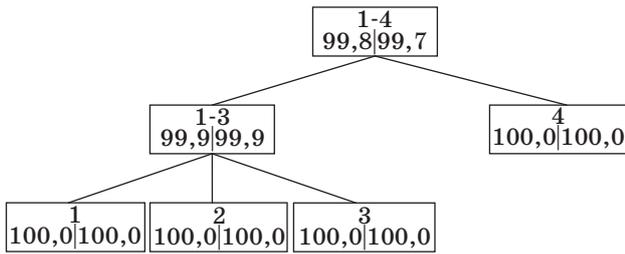
В результате работы алгоритма построения ИНК [7] сформирована иерархическая структура следующего вида (рис. 3). На каждом уровне показаны объединенные в классы сегменты и их изначальная принадлежность, процент распознавания на обучающей и тестовой выборках.

■ **Таблица 3. Параметры методов адаптивной сегментации с помощью ИНК**

Параметры модели		Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
Архитектура МП узла, параметры АФГК	Количество нейронов по слоям	5-2-64	5-2-40	5-20-48	5-20-128	5-20-256
	Изначальное количество сегментов	64	40	48	128	256
	Шаг анализа	5	5	200	200	200
	Скорость обучения	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01
	Момент	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Результаты сегментации	Количество выделенных/исходных сегментов	4/4	20/20	20/20	41/24	5-20-256
	Средневзвешенная оценка попадания	3,96	17,04	–	–	–
	Процент успешной классификации подвижным тестовым окном	99–100	96,1	98,0	72,1–75,0	–

■ **Таблица 4. Параметры методов адаптивной сегментации с помощью dTLFN(DEKF-BPTT)-ООП-АФГК**

Параметры модели		Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
Архитектура dTLFN	Количество нейронов по слоям	5-10-1	5-20-1	5-25-1	5-25-1	5-25-1
Архитектура МП узла, параметры АФГК	Количество нейронов по слоям	5-2-4	5-2-4	5-20-4	5-20-52	5-20-52
	Шаг анализа	2	2	50	50	50
	Скорость обучения	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Момент	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Результаты сегментации	Количество выделенных/исходных сегментов	4/4	20/20	20/20	35/24
Средневзвешенная оценка попадания		3,97	17,10	–	–	–
Процент успешной классификации подвижным тестовым окном		99-100	96,2	98,0	74,4–81,0	–



■ *Рис. 3. ИНК для сегментации псевдохаотического сигнала АР-системы*

В табл. 2–4 приводятся следующие данные:

- количество выделенных сегментов и количество исходных квазистационарных участков (доступно на модельных задачах);
- средневзвешенная оценка попадания — рассчитывается среднее значение отношения полученных и истинных длин сегментов;
- процент успешной классификации подвижным тестовым окном — на вход системы сегментации-кластеризации-классификации подается k последовательных отсчетов временного ряда. Принадлежность последовательности к определенному классу определяется по $(k + 1)$ -й точке. Приводится процент успешного распознавания типа текущей динамики участка временного ряда.

Как видно из табл. 2–4 (эксперимент 1), данный нестационарный ряд успешно сегментирован и выделенные сегменты распределены по классам в соответствии с типом динамики.

Следующий рассмотренный нестационарный сигнал имел переключающуюся динамику. Псевдохаотический временной ряд определяется последовательностью [7]

$$x(t + 1) = f_i(x(t)), \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

$$f_1(x) = 4x(1 - x), \quad x \in [0, 1]; \text{ logistic map};$$

$$f_2(x) = 2x, \quad x \in (0, 0,5]; \quad 2(1 - x), \quad x \in [0,5; 1); \text{ tent map};$$

$$f_3(x) = f_1(f_1(x)); \text{ double logistic map};$$

$$f_4(x) = f_2(f_2(x)); \text{ double tent map}.$$

Эти последовательности, чередуясь, генерировали по $S_L = 100$ точек, процесс повторился 5 раз. Общая длина L псевдохаотического временного ряда составила 2000 точек. Далее ряд приводится к нулевому среднему и единичному среднеквадратичному отклонению.

Архитектура, параметры алгоритмов и результаты сегментации псевдохаотического временного ряда приведены в табл. 3 (эксперимент 2) и 4 (эксперимент 2).

Для сегментации этого временного ряда неприменим метод АР-ООП, так как ряд содержит квазистационарные сегменты, порожденные не-

линейными моделями. Результаты сегментации колебались в пределах 40–50 % успешно распознанных сегментов.

Далее был рассмотрен аналогичный сигнал с участками дрейфа между соседними сегментами. Описанные ранее псевдохаотические последовательности, чередуясь, генерировали по $S_L = 100$ точек с переходными участками шириной $D_L = 50$ точек, процесс повторился 5 раз [7], $L = 2400$ точек. Результаты адаптивной сегментации и параметры алгоритмов указаны в табл. 3 (эксперимент 3) и 4 (эксперимент 3).

Рассмотрим нестационарный временной ряд, порождаемый тремя источниками вида Makey–Glass. Исходные данные описываются следующим дифференциальным уравнением [5]:

$$\frac{dy}{dt} = -0,1y(t) + \frac{0,2y(t - t_d)}{1 + y(t - t_d)^{10}}.$$

Каждый из трех последовательно работающих источников использовал соответствующее значение параметра $t_d = 17, 23, 30$. Итоговая последовательность содержит квазистационарные сегменты длиной $S_L = 300$ точек с переходными участками длиной $D_L = 100$ точек, $L = 4800$ точек.

Данный временной ряд содержит участки с дрейфовой динамикой. Из табл. 3 (эксперимент 4) и 4 (эксперимент 4) видно, что применение dTLFN, по сравнению с исходным ИНК, оправдано. Удалось избежать излишней сегментации, тем самым повысив успешность классификации. Отметим полученный разброс результатов серии экспериментов, что связано с псевдохаотической природой порождающего соотношения.

Для анализа работоспособности систем идентификации технологических событий на узле инженерной сети были использованы данные об изменении параметров узла учета нефти СИКН (система измерения и контроля качества нефти) [3–5] инженерной сети за 9 дней. На узле СИКН каждые 5 с замеряется давление на выходе узла и расход нефти по 5 измерительным линиям. Для дальнейшего анализа использован временной ряд, описывающий давление на выходе узла. Общая длина ряда составляет 155 520 отсчетов.

Построение нейросетевой модели узла приема-сдачи нефти с помощью АР-моделей (см. табл. 1) и выявление технологических ситуаций описано в работе [3].

Архитектура нейросетевых систем, использованных для анализа технологического временного ряда, приведена в табл. 3 (эксперимент 5) и 4 (эксперимент 5).

Общие результаты работы систем с различной структурой приведены в табл. 5. Используются как гетерогенные нейросетевые модели на основе

■ Таблица 5. Результаты сегментации технологического временного ряда

Метод / Этап		Количество выделенных сегментов/ классов	Процент успешной классификации	
			подвижным окном известных событий	подвижным окном смеси известных и неизвестных событий
АР-ООП	Сегментация	548/19	78,7	61,9
wavelet-разложение/ АР-моделирование	Унификация сегментов			
Fuzzy c-means	Кластеризация			
Комитет МП BOOST1	Классификация			
ИНК	Сегментация	471/20	82	69
	Унификация сегментов			
	Кластеризация			
	Классификация			
dTLFN(DEKF- BPTT)	Сегментация	230/29	87	73
АФГК	Унификация сегментов			
	Кластеризация			
	Классификация			

АР-моделирования на этапе сегментации, так и более однородные сети ИНК и АФГК.

Нейросетевая модель на основе dTLFN (см. табл. 1, метод 3) функционирует в рамках методологии Data Mining, что позволяет осуществлять наиболее эффективный анализ технологических временных рядов. Модель объединяет сразу несколько этапов обработки данных в рамках единой нейросетевой парадигмы и использует адаптированные базовые алгоритмы обучения НС.

Анализ временных рядов с помощью однородных нейросетевых структур предпочтительнее, чем поэтапное построение многоуровневой системы обработки, что видно из сравнения результатов в табл. 5. К первой группе относятся методы, включающие различные алгоритмы поэтапной реализации схемы анализа данных, согласно концепции Data Mining. В ходе модельных и натурных экспериментов выбраны наиболее эффективные методы: АР-ООП для предварительной сегментации; коэффициенты АР-модели, описывающей каждый сегмент, для унификации; Fuzzy c-means для кластеризации унифицированных сегментов и комитет МП для сопоставления кластеров сегментов и классов событий. Недостатками метода являются сложность и неформализуемость подбора параметров каждого из ал-

горитмов, излишняя сегментация исходного сигнала, что ведет к частому переключению сигнализирующей о типе текущей динамики системы. Как ИНК, так и dTLFN позволяют сократить количество настраиваемых параметров и автоматизировать процесс построения конечной нейросетевой системы. Использование гибридной АФГК и сети dTLFN дает возможность избежать излишней сегментации и переключения сигнализирующей системы, а также расширить количество выделяемых классов событий путем обнаружения переходных состояний.

Заключение

В работе предложены некоторые подходы к анализу технологических временных рядов с помощью нейросетевых структур и в рамках методологии Data Mining.

На основе модельных испытаний и натурных данных разработана интеллектуальная модель распознавания технологических ситуаций, возникающих на объектах инженерной сети. Модель основана на нейросетевой обработке временных рядов и включает в себя нелинейный фильтр на базе распределенной сети dTLFN в совокупности с расширенным методом оценки ООП и моди-

фицированный ИНК. Применение разработанной модели позволило повысить достоверность описания технологических ситуаций.

Разработана структура адаптивной сегментации технологических временных рядов с помощью гомогенных и гетерогенных нейросетевых структур различной архитектуры, что расширяет возможность выбора наиболее подходящей по совокупности факторов сложности и производительности модели для анализа временных рядов различной природы.

Протестирована работоспособность предлагаемой модели на имеющихся исторических данных реальной задачи распознавания ситуаций на узле приема-сдачи нефти и на ряде модельных задач.

Показана эффективность данного подхода применительно к задачам разработки интеллектуальных автоматизированных систем, так как разработанная система позволяет:

— увеличить количество классов выявляемых событий на 30 % путем введения субклассов, описывающих участки смены типа динамических параметров квазистационарных сегментов;

— получить количественное описание и характеристики технологических событий, как то: временные границы приходящих событий и квазистационарных сегментов, тип и параметры динамики таких сегментов;

— увеличить на 11 % количество выявляемых технологических событий.

Литература

1. **Тристанов А. Б., Геппенер В. В., Фирстов П. П.** Применение методов сегментации к обработке геофизических данных. — СПб.: ЛЭТИ, 2007. http://www.emsd.iks.ru/konf060117lib/pdf/25_geppener_tristanov.pdf (дата обращения 12.11.2010).
2. **Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В.** Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — С. 67–93.
3. **Вульфин А. М., Гиниятуллин В. М., Фрид А. И.** Нейросетевая модель выявления и распознавания технологических ситуаций в рамках методологии Data Mining // XII Всерос. науч.-техн. конф. «Нейроинформатика — 2010»: сб. науч. тр.: В 2 ч. Ч. 1. М.: МИФИ, 2010. С. 75–84.
4. **Vulfin A. M., Giniyatullin V. M., Frid A. I.** Neural-base Model for Detection and Recognition of Technological Situations within the Scope of Data Mining Strategy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. Vol. 19. N 3. P. 207–212.
5. **Вульфин А. М., Фрид А. И.** Интеллектуальная автоматизированная система поддержки принятия решений для технологического комплекса приема-сдачи нефти // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 29–34.
6. **Зозуля Ю. И.** Интеллектуальные нейросистемы. Науч. сер. Нейрокомпьютеры и их применение. Кн. 12. — М.: Радиотехника, 2003. — С. 14–51.
7. **Орлов Ю.** Разработка и исследование алгоритмов построения иерархических нейросетевых комплексов для классификации данных физических измерений: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук // НИИЯФ МГУ. М., 2003. С. 23.

УДК 681.3

УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ БАЗОВОЙ СЕТИ ПРИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЧЕРТЕЖЕЙ

Б. А. Абдулкадер,

аспирант

Х. А. Аль-Шайх,

аспирант

Ю. Т. Лячек,

канд. техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассмотрены проблемы создания параметрической модели любого чертежа путем определения количественных связей между элементами базовой сети, образованной характерными точками основных графических примитивов. Создание модели ведется на основе обработки размерных обозначений, установленных на этом чертеже в соответствии с методом аналитико-синтетической параметризации. Изложены особенности алгоритмов обработки различных размерных обозначений, имеющихся на чертеже. Установление связей служит для обеспечения модификации чертежа с учетом задания новых значений параметров.

Ключевые слова — параметризация, модификация, чертеж, электронное представление, базовая сеть, графические примитивы, размерное обозначение, связь элементов сети.

Введение

При параметризации ранее созданных чертежей, представленных в виде файлов векторного описания графических примитивов, составляющих чертеж, необходимо вычислить координаты всех точек, определяющих эти примитивы, в зависимости от используемых значений размерных обозначений. Это требование обусловлено тем, что автоматически перерисовать (модифицировать) чертеж детали, задав для этой детали другие значения размеров, можно только при условии знания того, как при этом изменяются координаты точек каждого графического примитива, входящего в описание чертежа. Эта задача решается при использовании аналитико-синтетического метода параметризации [1], в основе которого лежит понятие опорной (базовой) сети чертежа. Каждый элемент этой нерегулярной координатной сети определяется положением (координатами) характерных точек всех графических примитивов *исходного* изображения детали. При этом вся сеть включает в себя основные ортогональные составляющие — горизонтальную и вертикальную, а также вспомогательную — угловую — составляющую. Все их можно рассматривать относительно независимыми друг от друга

сетями (подсетями). Введение такой опорной сети существенно упрощает создание параметрической модели чертежа, так как действие сети распространяется на все поле изображения чертежа (и по горизонтали, и по вертикали, и в угловом представлении). При этом опорная сеть с установленными количественными или функциональными связями между всеми ее элементами через используемые в чертеже размерные обозначения и является, по сути, параметрическим описанием такого чертежа. В случае наличия таких описаний легко определить новые координаты всех графических примитивов детали при ее модификации в соответствии с заданными новыми значениями размерных обозначений и автоматически перерисовать чертеж.

Использование опорной сети чертежа облегчает определение связей между ее элементами, т. е. создание параметрической модели чертежа, при этом процесс создания оказывается унифицированным и практически независимым от конкретного представления изображенной на чертеже детали. Он не зависит от системы координат, в которой представлен чертеж, от количества используемых в нем видов, от типа используемых размерных обозначений и места их установки, от количества и типа графических примитивов и усло-

вий их взаимного отношения и расположения. Процесс параметризации и модификации изображений при таком подходе требует минимального участия конструктора (пользователя). Вмешательство конструктора осуществляется только на начальном этапе для задания (ввода в систему) новых значений размерных обозначений и на заключительном этапе для графического редактирования построенного чертежа. При этом редактирование требуется только в случаях редко встречающейся необходимости изменить схему простановки размерных обозначений и откорректировать внутренние параметры (данные) используемых в чертеже технологических обозначений. Однако эти операции достаточно просто автоматизировать, так что они не требуют много времени и усилий от конструкторов.

Определение связей между элементами ортогональной опорной сети

Процесс определения связей между всеми элементами опорной сети по горизонтали DW:X, вертикали DW:Y и по углу DW:A (процесс создания параметрической модели чертежа) базируется на:

- выявлении в чертеже основных видов детали и определении расстояний между этими видами в целях установления параметров связи между элементами опорных сетей этих видов — так для элементов сети, соответствующих видам сверху и снизу, устанавливается связь с видами слева, справа и сзади, и наоборот;

- определении базовой точки исходного чертежа;

- последовательной обработке всех установленных (имеющихся в чертеже) размерных обозначений;

- выявлении точек, породивших те элементы опорной сети чертежа, для которых после обработки размерных обозначений не были установлены связи с другими элементами сети. Это делается путем выявления графических примитивов, к которым эти точки относятся, и отношений между примитивами в этих точках (в точках их соединения). На основе этого находятся связи этих точек с другими характерными точками примитивов, т. е. связи для соответствующих элементов опорной сети.

Выявление видов. В основе алгоритма выявления в чертеже представленных видов детали лежит принцип автоматического нахождения габаритов охватывающих прямоугольников, соответствующих отдельным видам. Эти прямоугольники формируются на основе анализа геометрических параметров основных графических примитивов, входящих в описание чертежа, с точки зрения их непосредственной связи (касания или

пересечения) друг с другом. В результате определяется общее количество и взаимное расположение отдельных прямоугольников, соответствующих видам чертежа. Соответственно, на основе параметров выделенных прямоугольников, которые охватывают виды, определяются виды, присутствующие в чертеже, и положение главного вида, а также устанавливаются параметры связи между элементами опорных сетей, относящимися к разным видам. Эти параметры связей между видами необходимы для взаимного дополнения сетей DW:X и DW:Y за счет параметров, определенных в одной из них. Так, часть сети DW:X, которая относится к видам слева или справа, должна дополняться связями, определенными для сети DW:Y и относящимися к видам сверху или снизу, и наоборот. Кроме того, значения межвидовых параметров необходимы для учета взаимного влияния размерных обозначений главного вида на элементы сети DW:X вида сзади, и наоборот.

Определение базовой точки. В качестве базовой точки всего чертежа (x_6, y_6), положение которой не меняется при его модификации, принимается точка главного вида, которая либо лежит на оси его симметрии, либо является точкой центральной симметрии этого вида, либо с ней связано наибольшее количество линейных размеров, установленных параллельно осям координат. При этом элементам сети $dw:x_6$ и $dw:y_6$, которые связаны с этой точкой, сразу же присваивают значения, соответствующие ее координатам в исходном описании (чертеже). Таким образом, при модификации чертежа положение этой точки не будет меняться, а все остальные элементы опорной сети, соответствующие задающим точкам графических элементов, рассчитываются (непосредственно или опосредованно) относительно этой точки. При этом связи должны быть определены между всеми элементами опорных сетей.

Обработка простых связей. Определение связей между всеми элементами опорной сети начинается с выявления так называемых явных (простых) связей за счет последовательной обработки всех линейных вертикальных и горизонтальных, а также радиальных и диаметральных размерных обозначений. Это обусловлено тем, что подобные размерные обозначения непосредственно устанавливают связи между элементами соответствующих сетей, связанных с этими размерами. При этом составляются параметрические модели в виде списков (или массивов) связей по соответствующей координате DW:X и DW:Y, в которые заносятся попарно те элементы сетей, для которых связь установлена после обработки каждого размерного обозначения. Элементы этих списков параметрической модели (далее списков модели) представляются в виде записей типа

$$(dw:x_i \ dw:x_j \ VV_{ij}) \text{ или } (dw:y_a \ dw:y_b \ VV_{ab}), \quad (1)$$

где VV_{ij} и VV_{ab} — величины, соответствующие **новым** значениям размерных обозначений, задающие значение связи между соответствующими элементами ортогональных сетей по оси X или Y; $dw:x_i < dw:x_j$, $dw:y_a < dw:y_b$, т. е. и VV_{ij} , и VV_{ab} — положительны (больше нуля).

Для контроля и оптимизации процесса формирования параметрической модели чертежа необходимо постоянно отслеживать, какие из элементов опорных сетей DW:X и DW:Y еще не обработаны, т. е. не включены в списки связей.

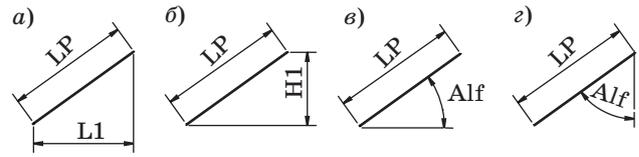
В случае обработки симметричных размерных обозначений по соответствующей координате соответствующий список параметрической модели дополняется не одной, а двумя подобными (1) записями — между каждой из точек, к которым привязано размерное обозначение, и элементом сети, соответствующим оси симметрии.

При обработке радиальных и диаметральных размерных обозначений связи устанавливаются между элементами сетей, которые соответствуют положению центров всех дуг и окружностей и квадрантным точкам этих графических примитивов чертежа с учетом новых значений радиусов (диаметров). Следует подчеркнуть, что при обработке каждого размерного обозначения связи устанавливаются для элементов сетей, связанных соответствующими точками для всех дуг и окружностей чертежа такого же радиуса (диаметра).

Не следует забывать, что одновременно с установлением связи между элементами опорной сети за счет обработки каждого из размерных обозначений необходимо устанавливать связи между элементами по противоположной сети, если они обусловлены влиянием видов чертежа друг на друга.

Обработка параллельных размеров. Дальнейший процесс установления отношений между элементами опорной сети связан с обработкой линейных параллельных и угловых размерных обозначений. Для решения задачи обработки параллельных размерных обозначений все имеющиеся в текущем чертеже параллельные размеры в соответствии с возможными способами их алгоритмической обработки [2] целесообразно разбить на четыре группы:

- одиночные размеры, устанавливаемые на отдельные наклонные отрезки;
- попарно связанные размеры, устанавливаемые на два отрезка, имеющих общую точку;
- связанные в тройки, в которые входят размеры, установленные на три связанных друг с другом отрезка, в совокупности образующие треугольники;

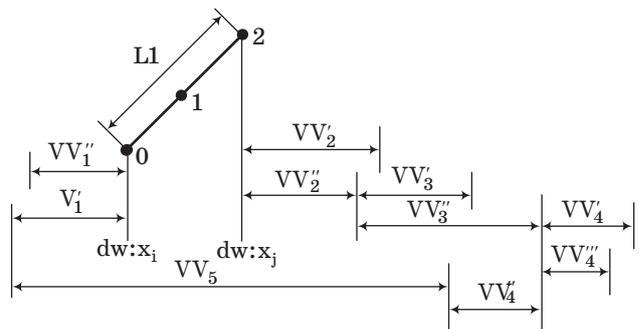


■ **Рис. 1.** Варианты установки простых для обработки параллельных размерных обозначений: а — горизонтальный; б — вертикальный; в, г — угловые

— особые случаи, куда следует отнести размеры, поставленные на отрезки, на конце (концах) которых находятся одна или две дуг сопряжения.

Отдельные параллельные размеры, установленные на наклонные отрезки, можно отнести к наиболее простым вариантам определения соответствующих им параметров базовой сети. В этих вариантах для выявления параметров сетей часто вместе с параллельным размером используется дополнительный размер одного из следующих типов: горизонтальный, вертикальный или угловой (рис. 1, а—г). Эти случаи можно отнести к явному заданию элементов опорной сети. Элементы опорной сети, которые соответствуют концам таких отрезков, как правило, уже определены по одной из координат через значение горизонтального или вертикального размера. Тогда по второй координате они определяются на основе теоремы Архимеда. Если обрабатываемому параллельному размеру сопутствует угловой размер, связи по обеим координатам определяются на основе обрабатываемого размера и связанного с ним углового параметра с использованием тригонометрических функций ($\sin(\text{Alf})$ и $\cos(\text{Alf})$).

При неявном задании обрабатываемому параллельному размерному обозначению непосредственно не сопутствует ни горизонтальный, ни вертикальный, ни угловой размер (рис. 2). Однако для успешной обработки такого размера оба конца отрезка, на который поставлен этот раз-

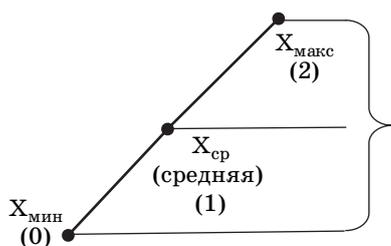


■ **Рис. 2.** Неявное задание параллельного размера $L1$ в сети DW:X (по координате X)

мер, должны быть обязательно связаны с элементами опорной сети ($DW:X_i$ или $DW:Y_j$), которые уже находятся в соответствующих списках параметрической модели. Иными словами, эти элементы опорной сети должны присутствовать в списках уже установленных связей с другими элементами по этой составляющей. Тогда связь для отрезка по координате (Y или X) определяется через цепочку известных связей между элементами опорной сети по этой координате. Такие цепочки, в которые может входить произвольная совокупность связей, определенных ранее через уже обработанные размерные обозначения, достаточно часто встречаются в реальных чертежах. Таким образом, при параметризации подобных случаев приходится вначале автоматически разрешить возникшую неопределенность и привести эти случаи к явному заданию связи между концами обрабатываемого параллельного размера, т. е. к предыдущим вариантам (см. рис. 1). Алгоритм выявления значения неявной связи заключается в нахождении суммарного значения для цепочки элементов сети с установленными связями, подсоединенных к анализируемому параллельному размеру, и состоит из следующих этапов.

На начальном этапе определяется совпадение элементов основной сети, которые соответствуют точкам 0 (начальной), 1 (средней для отрезка с осью симметрии) или 2 (конечной) отрезка, на который поставлен параллельный размер (рис. 3), с одним из первых двух элементов в записях созданного к этому моменту **дублирующего** списка параметрической модели. Это может быть список по координате X или Y , например по координате X : $((dw:x_a dw:x_b VV_{ab}) \dots (dw:x_i dw:x_j VV_{ij}) \dots (dw:x_m dw:x_n VV_{mn}))$.

В случае совпадения элементов (например, $dw:x_i$ или $dw:x_j$ по оси X), по крайней мере, для двух из трех точек отрезка, начинают формироваться вспомогательные списки (массивы) для соответствующего совпадающего элемента сети в виде



■ Рис. 3. Характерные точки отрезка, определяющие обработку параллельного размера (их координаты должны присутствовать в уже выявленных связях — в сетях $DW:X$ или $DW:Y$)

$$(dw:x_i - VV_{ij}) \text{ или } (dw:x_j + VV_{ij}), \quad (2)$$

где в записи $dw:x_i$ или $dw:x_j$ первый параметр соответствует свободному (не совпадающему) элементу записи из списка параметрической модели ($dw:x_i dw:x_j VV_{ij}$);

— запись $-VV_{ij}$ (рис. 4, а) делается в том случае, если совпадение характерной точки привязки происходит с элементом, который является **вторым** в выявленной записи списка параметрической модели (второй элемент записи в модели совпадает с элементом сети рассматриваемой точки отрезка, на котором установлен параллельный размер);

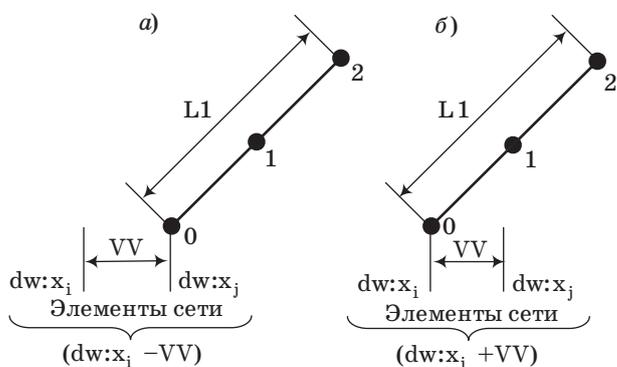
— запись $+VV_{ij}$ (рис. 4, б) создается в случае, если запись в модели привязана к характерной точке отрезка своим первым элементом.

При этом из дублирующего списка параметрической модели **исключают** те записи, для которых выявлено совпадение элементов.

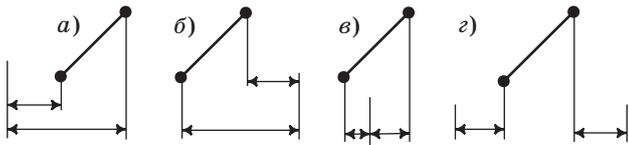
Если в параметрической модели имеется не одна запись, элемент которой по соответствующей координате совпадает с анализируемой точкой, а несколько, то формируемый вспомогательный список Sp для рассматриваемой точки (например, 0) должен включать в себя соответствующее число аналогичных записей: $Sp_0 = ((dw:x_i - VV_{ij}) (dw:x_c + VV_{ic}) \dots (dw:x_u - VV_{uv}))$.

Таким образом, при обработке каждого параллельного размера может создаваться до трех вспомогательных списков в соответствии с количеством характерных точек отрезка, на котором установлен обрабатываемый параллельный размер (Sp_0, Sp_1, Sp_2).

На втором этапе осуществляется определение значения неявной связи при обработке вспомогательных списков с записями, которые непосредственно связаны с характерными точками отрезка. Для этого выявляется совпадение первых параметров в записи одного списка с записью друго-



■ Рис. 4. Примеры привязки к характерной точке отрезка вторым (а) и первым (б) параметром и соответствующие им записи во вспомогательном списке



■ Рис. 5. Примеры определения значения неявной связи на этапе обработки первых записей вспомогательных списков: а — в — вторые параметры обеих записей в параметрической модели, привязанные к разным точкам отрезка, совпадают (имеют одно и то же значение), и значение неявной связи может быть определено; г — вторые параметры не совпадают, и поиск неявной связи должен быть продолжен

го списка (рис. 5) и осуществляется вычитание значения V_{ij} , соответствующего точке с большим номером Sp_i из меньшего, например: $V_{S_2} = V_{S_{p0}} - V_{S_{p1}}$, так как координата точки $0 < 1$.

Если совпадение установлено (см. рис. 5, а—в), можно считать, что параметр связи V_{S_2} между элементами базовой сети определен, и осуществляют пополнение параметрической модели по этой координате. Одновременно обеспечивается обработка текущего параллельного размера и дополнение сети по другой координате в соответствии с тем, как это делалось для вариантов, представленных на рис. 1, а, б. Иначе (см. рис. 5, г) переходят к следующему, третьему этапу.

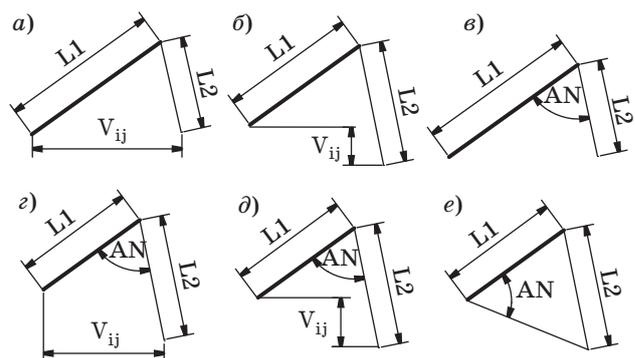
На третьем этапе в циклах по всем записям вспомогательного второго и третьего списка осуществляется поиск совпадения первых значений каждой записи с одним из первых двух элементов в записях дублирующего списка параметрической модели так, как это делалось на первом этапе. В случае выявления совпадения осуществляется корректировка соответствующей записи вспомогательного списка — меняется первый элемент записи на свободный (не совпадающий) элемент записи модели, а новое значение V_{S_2} определяется алгебраической суммой элемента в записи вспомогательного списка и в записи модели в соответствии с правилом (2). После этого работа алгоритма возвращается на второй этап. Подобные переходы со второго на третий этап и обратно осуществляются до тех пор, пока не будет выявлено значение неявной связи или не будет полностью вычищен дублирующий список параметрической модели. В последнем случае считается, что неявная связь не определена, и данный параллельный размер необходимо перенести в конец списка необработанных размеров, временно отложив его обработку, и продолжить пополнять параметрическую модель за счет обработки других размерных обозначений.

Попарно связанные параллельные размеры представляют более сложную конструкцию для

определения функциональных связей опорной сети, так как в этих случаях необходимо одновременно устанавливать связь для общей точки двух отрезков сразу по обеим координатам.

Если свободные концы связанных параллельных размеров находятся на одной координате (рис. 6, а, в), то определение параметров связи необходимо выполнять только для общей точки обоих размеров. Процесс определения значений таких связей достаточно очевиден и не представляет особой трудности в плане вычисления — он базируется на решении уравнения, составленного на основе равенства катетов для двух прямоугольников, образованных перпендикуляром, опущенным из общей точки на линию, соединяющую свободные концы отрезков, расстояние между которыми должно быть известно благодаря явному или неявному заданию. Для случая, представленного на рис. 6, в, это расстояние находится на основе теоремы косинусов [3].

Сложность выявления связей для общей точки двух отрезков и соответствующих ей элементов базовой сети несколько возрастает, когда свободные концы отрезков не лежат на одном уровне (значения их координаты по оси X или Y отличаются), как это представлено на рис. 6, б, г—е. В подобных вариантах необходимо вначале определять расстояние между свободными концами связанных отрезков исходя из известных для них значений координат, а далее находить связи для общей точки с другими точками этих треугольников по координате X (Δx_{ij}) и координате Y (Δy_{ik}) так, как будто бы их концы находятся на одном уровне (см. рис. 6, а, в). Затем, исходя из наклона



■ Рис. 6. Варианты установки попарно связанных параллельных размеров с различными вариантами их связи, которые установлены в параметрической модели: а, в — свободные концы находятся на одном уровне, есть связь в одной сети ($DW:X$ ($DW:Y$) или угловой); б, е — свободные концы находятся на разных уровнях, есть связь только в одной сети ($DW:X$ ($DW:Y$) или угловой); г, д — свободные концы находятся на разных уровнях, но связь есть в двух сетях из трех ($DW:X$, $DW:Y$ или угловой)

линии связи свободных концов к соответствующей оси координат (например, на угол Alf к оси абсцисс), следует определять реальные значения связи общей точки с другими точками треугольника путем разворота треугольника вокруг общей точки на соответствующий угол. Нахождение реальных значений Δx_{ij}^* и Δy_{ik}^* осуществляется путем умножения значений Δx_{ij} и Δy_{ik} на матрицу поворота на угол Alf [4].

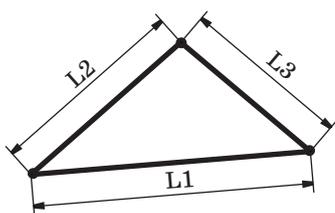
После определения реальных значений связи по каждой координате осуществляется пополнение параметрической модели по обеим координатам.

Сложность выявления связей для размерных и опорных сетей возрастает, когда для двух связанных отрезков (параллельных размеров) известен не угол, лежащий между ними, а угол наклона одного из этих отрезков (например, рис. 6, е). Здесь вначале для нахождения расстояния между свободными концами приходится использовать теорему косинусов, после чего этот вариант сводится к тем, которые рассмотрены ранее.

При неявном задании свободных концов двух связанных параллельных размеров (отрезков) очевидно, что задача решения параметризации, соответственно, усложняется, так как необходимо вначале разрешить эту неопределенность, как это описывалось ранее. Только после этого можно приступить к решению основной задачи — нахождению связи для общей точки этих отрезков (размеров).

Параллельные размеры, связанные в тройки, установленные на три связанных друг с другом отрезка, в совокупности образуют треугольники (рис. 7). Этот случай должен рассматриваться тогда, когда программа не смогла выявить явную или опосредованную (неявную) связь между свободными концами двух связанных параллельных размеров. Особенность этого варианта заключается в том, что вершины образованного этими отрезками и параллельными размерами треугольника могут быть как связаны, так и не связаны с размерной сетью остальных графических примитивов чертежа.

В первом случае ориентация такого треугольника должна определяться этими связями, а во



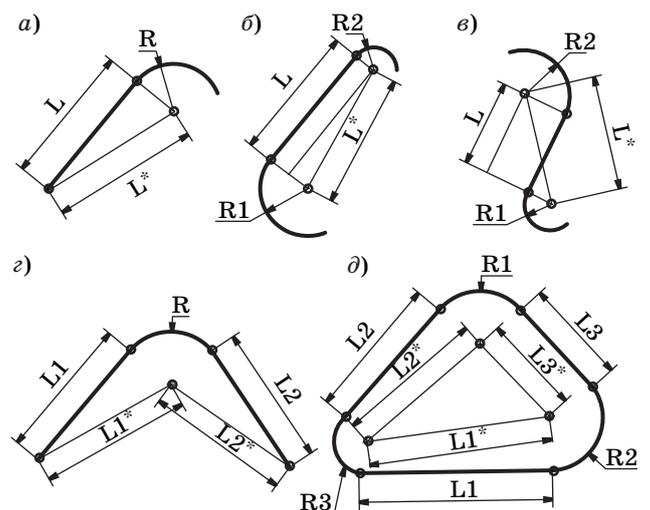
■ Рис. 7. Три связанных параллельных размера

втором она может быть произвольной. Однако и в первом, и во втором случаях задача определения величин параметра связи может быть сведена к выполнению двух этапов:

— определению связей подобно варианту, представленному на рис. 6, а;

— коррекции значений параметров связи с учетом разворота треугольника в системе координат до требуемого положения на определенный угол вокруг одной из вершин этого треугольника. Величина угла должна определяться либо условиями привязки треугольника к опорной сети остальных графических элементов чертежа, либо, если таких условий не выявлено, она может определяться исходным наклоном одного из отрезков (размеров) к осям координат.

Размеры, поставленные на отрезки с дугами сопряжения, подсоединенные к этим отрезкам на одном или обоих концах. В этих случаях на параметры отрезков влияют не только установленные непосредственно на них параллельные размеры, но и параметры дуг сопряжения, в частности, положение центра дуг и значения их радиусов. Все эти параметры одновременно влияют на положение конца отрезка (точки его сопряжения с дугой) и его наклон. Это приводит к тому, что решение проблемы параметризации (нахождения связей между координатами характерных точек отрезка и центрами дуг сопряжения) для таких объектов в различных вариантах их сочетания (рис. 8) оказывается нетривиальной зада-



■ Рис. 8. Размеры, поставленные на отрезки с дугами сопряжения: а — $L^* = \sqrt{L^2 + R^2}$; б — $L^* = \sqrt{L^2 + (R1 - R2)^2}$; в — $L^* = \sqrt{L^2 + (R1 + R2)^2}$; г — $L1^* = \sqrt{L1^2 + R^2}$, $L2^* = \sqrt{L2^2 + R^2}$; д — $L1^* = \sqrt{L1^2 + (R2 - R3)^2}$, $L2^* = \sqrt{L2^2 + (R1 - R3)^2}$, $L3^* = \sqrt{L3^2 + (R2 - R1)^2}$

чей. Для выхода из этой трудной ситуации предлагается вводить вместо пар из параллельного и радиального размеров объединенные, так называемые фиктивные параллельные размеры. Эти размеры являются как бы порождением этой пары и должны определяться величинами как радиусов дуг сопряжения, так и связанных с ними параллельных исходных размеров (рис. 9). Введение таких размеров позволяет разделить задачу автоматического нахождения параметрических связей характерных точек подобных фигур на два этапа.

На первом этапе должна решаться задача определения связей координат центра дуги (дуг) с элементами сети, для которых связи уже установлены. Эта задача решается аналогично рассмотренным ранее вариантам при анализе обычных параллельных размеров, которые установлены на отрезки (см. рис. 1, 6, 7).

На втором этапе устанавливается связь между координатами центра дуги и точкой сопряжения соответствующей дуги и отрезка на основании значения радиуса дуги и значений исходного и фиктивного параллельных размеров (см. рис. 9, 10). На первый взгляд, процесс нахождения координат точек сопряжения и, главное, установление

связей их с другими элементами сети (включение в модель параметризации) достаточно сложен. Однако его можно существенно упростить, если предварительно решать эту проблему с использованием локальной системы координат, начало которой совпадает с центром рассматриваемой дуги сопряжения, а ось X (или Y) совпадает с отрезком, на котором устанавливается фиктивный размер. Иными словами, ось должна проходить через центр дуги и свободный конец отрезка сопряжения при наличии одной дуги (см. рис. 9) либо через центры дуг сопряжения, если дуги находятся на обоих концах (см. рис. 10).

В соответствии с рис. 9, б и на основании подобия треугольников определение величин смещения координат точек сопряжения 1 и 2 относительно центра дуги (окружности) осуществляется следующим образом:

$$\Delta x^*/R = \Delta y_1^*/L = R/L^*, \Delta y_2^* = \Delta y_1^*,$$

откуда

$$\Delta x^* = -R^2/L^*, \Delta y_1^* = L^*R/L^*, \Delta y_2^* = -L^*R/L^*.$$

В этом случае смещение координат точек сопряжения 1 и 2 относительно центра в исходном состоянии (см. рис. 9, а) определяется с использованием матрицы поворота на угол β против часовой стрелки:

$$\begin{bmatrix} \Delta x^* & \Delta y_1^* \\ \Delta x^* & \Delta y_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}.$$

В результате перемножения матриц получаем смещение координат точек касания (левой 1 и правой 2) относительно центра дуги (окружности) по координате X и Y:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \Delta x^* \cos \beta - \Delta y_1^* \sin \beta, \\ \Delta y_1 &= \Delta x^* \sin \beta + \Delta y_1^* \cos \beta, \\ \Delta x_2 &= \Delta x^* \cos \beta - \Delta y_2^* \sin \beta, \\ \Delta y_2 &= \Delta x^* \sin \beta + \Delta y_2^* \cos \beta. \end{aligned}$$

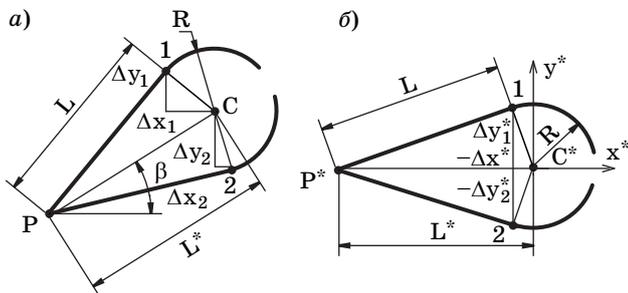
Нахождение смещения точек сопряжения отрезка с двумя дугами, расположенных по одну сторону от отрезка, относительно координат центра соответствующей дуги (окружности) не представляет никакой сложности (см. рис. 10, б), так как

$$\Delta x_1 / \text{abs}(R_1 - R_2) = \Delta y_1 / L = R_1 / L^*.$$

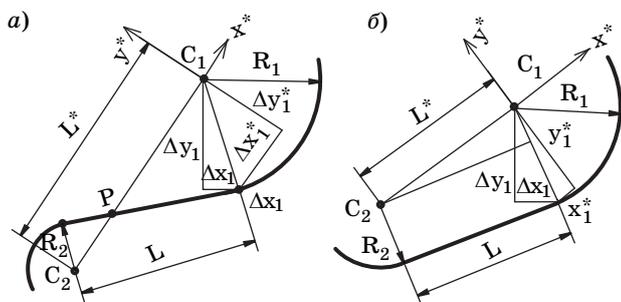
Отсюда:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \text{abs}(R_1 - R_2) R_1 / L^*, \Delta y_1 = R_1 L / L^*, \\ \Delta x_2 &= \text{abs}(R_1 - R_2) R_2 / L^*, \Delta y_2 = R_2 L / L^*. \end{aligned}$$

При этом знак приращения по каждой координате точек сопряжения для каждой дуги дол-



■ Рис. 9. Вычисление смещения точки сопряжения для одной дуги (слева или справа) относительно ее центра: а — для исходного положения на чертеже; б — в локальной системе координат



■ Рис. 10. Вычисление смещения точек сопряжения для двух дуг: а — дуги расположены по обе стороны от отрезка; б — дуги расположены по одну сторону от отрезка

жен выявляться в зависимости от расположения центров окружностей (дуг) друг относительно друга.

Определение параметров смещения точек сопряжения отрезка с дугами, расположенных по разные стороны отрезка, относительно координат центра соответствующих дуг следует осуществлять в следующем порядке.

Последовательно определяются:

— координаты точки Р пересечения отрезка сопряжения с отрезком, соединяющим центры окружностей обеих дуг, на основе параметрического уравнения для второго отрезка

$$P = P_1 + (P_2 - P_1)R_1 / (P_1 + P_2);$$

— наклон отрезка, соединяющего центры дуг, к оси абсцисс ($\sin \beta$ и $\cos \beta$);

— расстояния L_1^* и L_2^* от этой точки до соответствующего центра дуги;

— величины смещения каждой точки сопряжения относительно центра рассматриваемой дуги вначале в одной, а затем в другой локальной координатной сети, начало каждой из которых совпадает с центром соответствующей дуги;

— реальное смещение точек сопряжения (в исходной координатной системе). Оно находится в соответствии с алгоритмом обработки соединения, представленного на рис. 9.

Заключение

Параметрические модели конструкторского чертежа имеют важное значения для автоматического получения модифицированных комплектов документации, однако построение таких мо-

делей представляется достаточно трудно решаемой задачей.

В работе на примере ряда алгоритмов, обеспечивающих обработку самых разнообразных линейных размеров, наглядно показана возможность эффективного построения численной параметрической модели, устанавливающей связи между элементами базовой сети чертежа через эти параметры.

Вместе с тем в представленном материале не рассмотрены многие вопросы параметризации, связанные с обработкой условий параллельности, перпендикулярности, постоянства толщины, дополнительных видов, центральной симметрии и т. д. Полагаем, что эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Литература

1. Аль-Шайх Х., Лячек Ю. Т. Параметризация конструкторских чертежей // Информационно-управляющие системы. 2010. № 1(44). С. 18–24.
2. Лячек Ю. Т., Гольшев И. В., Смирнов С. В. Обработка параллельных размеров в описаниях чертежей // Системы и средства передачи и обработки информации: тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 4–9 сентября 2001 г. / УГАС им. А. С. Попова. Одесса, 2001. С. 111–113.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1980. — 976 с.
4. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001. — 604 с.

УДК 004.4'244

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СПЕЦИФИКАЦИЙ НА ЯЗЫКЕ UML ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ОБМЕНА ДАННЫМИ В АППАРАТУРЕ

А. В. Березкин,

магистр техники и технологии, аспирант

А. С. Филиппов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Разработанная ранее авторами методика синтеза спецификаций на UML для тестирования потока управления позволяет определять поведение устройства на уровне последовательности управляющих сигналов. Созданные в соответствии с ней спецификации могут быть преобразованы в наблюдающие тесты, которые проверяют соответствие спецификаций реальному поведению устройства. В настоящей статье методика развивается и дополняется для реализации возможности специфицирования и тестирования потока данных в аппаратных системах.

Ключевые слова — UML, моделирование аппаратуры, верификация, тестирование.

Введение

Унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language — UML) в настоящее время часто используется для проектирования и моделирования вычислительных систем. Созданный для проектирования программного обеспечения, UML успешно применяется и в других областях, в том числе в области проектирования аппаратуры.

В статье [1] предложена методика, дающая возможность с помощью UML создавать спецификации аппаратного обеспечения. Полученные спецификации являются, с одной стороны, рабочим документом проектирования, с другой — формальными описаниями, позволяющими преобразовывать их в тесты системы, которые проверяют ее функциональность на предмет соответствия ранее созданной спецификации.

Благодаря разработанной методике можно описывать поведение систем и модулей в терминах логических связей между внутренними и внешними управляющими сигналами (причина и следствие). Для создания этих описаний используется подмножество диаграмм UML: диаграмма классов и диаграмма последовательности. Эти диаграммы, представляющие собой формальные спецификации, являются материалом для автоматизированной генерации тестов. Разработан ряд правил для генерации из таких диаграмм тестов в конкретном формате — VHDL Testbench.

Задача данной работы — дополнить методику новыми правилами таким образом, чтобы можно было специфицировать и тестировать не только управляющие сигналы, но и данные.

Для того чтобы разработать правила описания потока данных в спецификациях, необходимо выявить общие признаки организации обмена данными в цифровых устройствах. Эти признаки напрямую влияют на способ описания потоков данных с помощью диаграмм UML.

Признаки организации обмена данными в цифровых устройствах

Обработка данных в цифровых устройствах состоит в их копировании с преобразованием или без него. Копирование данных можно условно разделить на два шага: 1) выставление данных отправителем и 2) фиксация данных получателем. В различных устройствах эти действия выполняются по разным правилам. Набор правил для осуществления какого-либо обмена называют протоколом. При проектировании цифровых устройств разработчики определяют, по какому протоколу будут обмениваться данными узлы системы. Как правило, внутренние узлы обмениваются по простым протоколам (шина данных плюс строб), а внешние реализуют один из стандартных протоколов. Можно показать, что простые протоколы для внутреннего обмена — это сильно упрощенные стандартные протоколы.

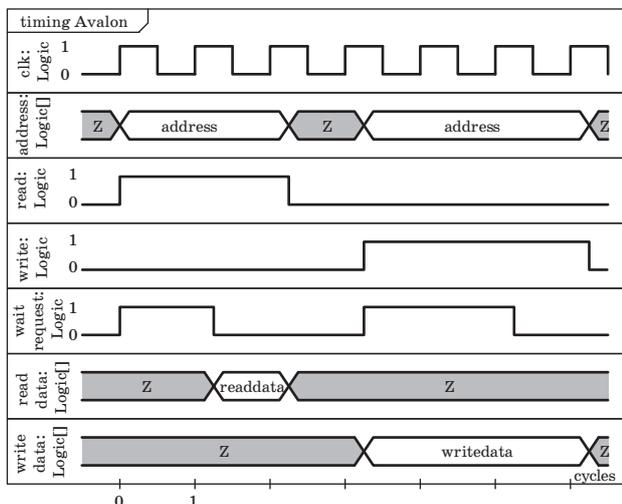
Учитывая все сказанное, можно сделать вывод, что для выделения общих признаков организации обмена данными необходимо рассмотреть несколько наиболее типичных стандартных протоколов передачи данных. Признаки, выделенные нами для них, будут актуальны и для внутренних специфических протоколов обмена данными.

Мы рассмотрим три несложных протокола — Altera Avalon, RS-232, Manchester II. Можно показать, что обмены данными в более сложных протоколах (таких как PCI, DDR, Ethernet) обладают примерно теми же признаками, однако их реализация будет существенно сложнее.

В процессе рассмотрения признаков мы будем выявлять функциональность, которой должно обладать верифицирующее устройство (верификатор) для контроля соответствующей части протокола обмена данными.

Altera Avalon

Altera Avalon — простой параллельный интерфейс, используемый в системах на кристалле с процессором NIOS [2]. Интерфейс Avalon является шинным, он предназначен не просто для передачи данных, а для чтения и записи в адресное пространство целого устройства. Устройства на шине Avalon могут быть ведущими и ведомыми. Первые могут только инициировать транзакции, вторые — только отвечать на запросы. Пример временной диаграммы, включающей чтение и запись, представлен на рис. 1. В примере тип Logic соответствует одиночному сигналу, а Logic[] — шине, т. е. массиву логических сигналов. Состояния Z — шина свободна (драйверы отключены), состояния address, readdata и writedata соответствуют передаче данных по шине.



■ Рис. 1. Временные диаграммы чтения и записи на шине Avalon

Алгоритм работы ведомого устройства.

1. Транзакция начинается в момент готовности слова для записи или в момент запроса чтения. В обоих случаях интерфейс запускается по сигналу внутреннего управляющего устройства.

2. В зависимости от вида транзакции (запись, чтение) выставляются разные стробы. В обоих случаях выставляется адрес. При записи также выставляются данные, которые читаются из внутренних регистров и передаются (возможно, с преобразованием) на внешние (т. е. управляющие драйверами линий шины).

3. При наличии сигнала waitrequest со стороны ведомого устройства данные удерживаются, в противном случае снимаются, линия освобождается.

Алгоритм работы ведущего устройства.

1. Транзакция начинается в момент получения внешнего управляющего сигнала chipselect.

2. Устройство захватывает адрес и в случае записи — данные, которые читаются с линии (или с буферов) и переписываются во внутренние регистры устройства (возможно, с преобразованием).

3. В случае необходимости устройство выставляет сигнал waitrequest.

4. В случае чтения устройство выставляет данные, т. е. переписывает их из внутренних регистров во внешние.

Выделим основные принципы выставления и захвата данных с точки зрения того, как контролировать эти процессы.

- Выставление и захват данных выполняются по управляющим сигналам. Следовательно, верификатор данных должен управляться этими же сигналами.

- Управляющие сигналы могут иметь различную длину, однако «рабочей» частью этого сигнала является только его фронт. Следовательно, верификатор должен пропускать управляющие сигналы через выявитель фронта.

- Выставление и захват данных могут выполняться как на следующий такт после прихода управляющего сигнала, так и через определенное количество тактов после этого.

- Захват данных состоит в переписывании информации с линии во внутренние регистры, выставление данных — тоже переписывание, но в другую сторону. Следовательно, проверка этого процесса состоит в сравнении значения на линии со значением на внутреннем регистре.

RS-232

RS-232 — один из самых простых протоколов передачи данных [3]. В наиболее простом варианте интерфейс состоит из двух каналов, которые обеспечивают дуплексную передачу данных. Рас-

смотрим пример передачи одного байта по каналу. Временная диаграмма приведена на рис. 2. В примере приняты следующие параметры передачи: 8 информационных бит, контроль четности выключен, один стоповый бит. На диаграмме *tx* — это информационный сигнал, *st* — внутреннее состояние передатчика, приводится здесь для пояснения фаз передачи (ожидание, стартовый бит и т. д.).

С точки зрения *передатчика* процесс происходит в следующем порядке.

1. В момент готовности слова для передачи соответствующий управляющий сигнал инициирует передачу.

2. Если в передатчике отсутствует внешнее управление скоростью передачи, запускается таймер для отсчета интервалов времени, соответствующих передаче одного бита. В этот же момент, возможно, выставляется стартовый бит.

3. В моменты срабатывания таймера (или по внешним сигналам) на линию данных выставляется очередной бит слова данных, либо бит контроля четности, либо стоповый бит. Выбор происходит либо путем подсчета количества срабатывания сигналов, либо путем активизации другого (или вспомогательного) управляющего сигнала.

С точки зрения *приемника* прием происходит в следующем порядке.

1. Приемник ожидает перепада $1 \rightarrow 0$ на информационной линии.

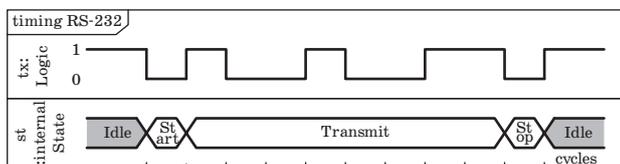
2. Запускается таймер (или настраивается внешний источник сигналов), который выдает импульсы в середине временного интервала, соответствующего очередному принимаемому биту.

3. При поступлении сигнала таймера принимается очередной бит данных, либо бит контроля четности, либо стоповый бит.

Выделим особенности передачи данных, дополняющие указанные выше.

- Значение выставляемого или принимаемого бита зависит от количества управляющих сигналов, пришедших до данного момента времени. Следовательно, проверяющие устройства должны подсчитывать пришедшие управляющие сигналы.

- В моменты начала и окончания транзакции верифицирующие устройства должны очистить все свои внутренние регистры истории.



■ Рис. 2. Пример временной диаграммы RS-232

Manchester II

Manchester II, как и RS-232, является последовательным протоколом, и канал связи в простейшем случае также состоит из трех линий [4]. Manchester II является самосинхронизирующимся протоколом, что позволяет передавать за одну транзакцию большое число бит. На рис. 3 приведен пример передачи 8 бит. Показаны следующие сигналы:

clk — тактовая частота передающего устройства (внутренний сигнал);

bytes — передаваемые байты (внутренний сигнал);

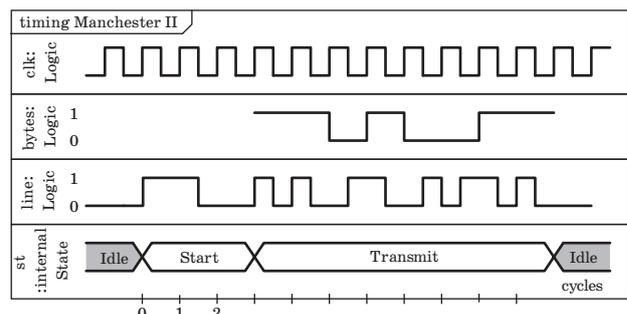
line — информационный сигнал (внешний сигнал, передается на шину);

st — состояние передатчика (внутренний сигнал).

Как правило, передача начинается со стартовой последовательности. Далее один информационный бит представляется последовательностью из двух равных по длительности сигналов («полубитов»), первый из которых соответствует информационному биту, второй — его инверсии (в некоторых случаях может использоваться обратный порядок полубитов).

Алгоритм передачи данных схож с рассмотренным в предыдущем разделе: сначала выставляется стартовая последовательность для синхронизации, затем информационные биты, затем (возможно) бит (или биты) контроля ошибок. Однако выставление данных имеет свою особенность: в середине интервала передачи бита происходит инвертирование информационного сигнала на линии (перепад синхронизации). Для этого может использоваться дополнительный таймер. То есть инверсия также выполняется под влиянием управляющего сигнала, но конечное состояние линии зависит не только от него, но и от предыдущего состояния самой линии. Таким образом:

- верифицирующее устройство должно иметь доступ к предыстории не только управляющих сигналов, но и линий данных.



■ Рис. 3. Пример временной диаграммы Manchester II

Прием данных также схож с алгоритмом RS-232, но обладает своей особенностью: таймер приема перезапускается (подстраивается) каждый раз при получении синхронизирующего перепада. Однако это не влияет на прием данных, которые принимаются так же, по сигналу таймера.

Принципы верификации обменов данными

На основе анализа стандартных протоколов были выявлены признаки передачи данных. Эти признаки обуславливают также и правила верификации обменов данными. Здесь мы представим признаки в виде единого списка и рассмотрим, какие элементы должны присутствовать в спецификациях устройств для реализации их верификации (таблица).

Перечисленные принципы верификации данных реализуются и в других технологиях верификации, например таких, как языки OpenVera [5] и System Verilog [6]. Данные языки позволяют определять события (events), наступление которых запускает ту или иную проверку (assertion). Оба языка имеют достаточно богатый инструментарий для определения событий: поддерживаются простые изменения уровня сигнала, более сложные условия, операции, темпоральная логика, операции с данными. Если проводить аналогии с пред-

лагаемым нами подходом, то определение событий и проверок в OpenVera и System Verilog эквивалентно элементам диаграмм последовательности в нашей методике. Действительно, в обоих случаях задается эталонная последовательность управляющих сигналов, выполнение которой можно проверить и которую можно использовать для проверки данных. Наличие таких аналогий позволяет говорить о том, что предлагаемое решение не противоречит имеющимся на данный момент технологиям, но вместе с тем и не копирует их.

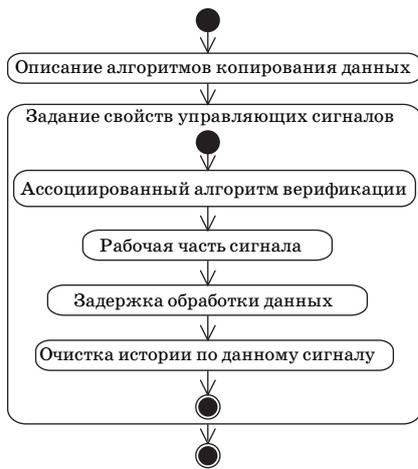
Основная особенность (и отличие) предлагаемого нами подхода состоит в том, что в нем тесты генерируются непосредственно из рабочих спецификаций системы. В случае же с OpenVera и System Verilog необходимо помимо рабочей спецификации создать дополнительный документ, описывающий поведение системы.

Описание потоков данных с помощью элементов UML

Выше были сформулированы принципы верификации данных и каждому из них были сопоставлены элементы спецификации устройств, необходимые для реализации этих принципов при генерации тестов данных. Рассмотрим, как отражать эти элементы в спецификациях UML. Схе-

■ Обмен данными в цифровых устройствах и их верификация

Признаки обменов данными	Принципы верификации	Элементы спецификации
1. Захват и выставление данных состоят в их переписывании (возможно, с преобразованием)	Верификация состоит в сравнении исходных и переписанных данных	Необходимо иметь возможность задавать алгоритм копирования данных. В простейшем случае этот алгоритм будет состоять из одной операции
2. Захват и выставление данных выполняются по управляющим сигналам	При получении управляющего сигнала верификатор должен запустить заданный алгоритм сравнения	Необходимо иметь возможность определять свойства сигнала: какие алгоритмы сравнения должны быть запущены при активации этого сигнала
3. «Рабочая» часть управляющего сигнала может быть короче, чем сам сигнал	Алгоритмы сравнения должны запускаться только в «рабочей» фазе сигнала	Необходимо иметь возможность определять свойство сигнала — его рабочую часть. Например: фронт, спад, любой перепад, весь сигнал
4. Передача данных может выполняться через несколько тактов после прихода управляющего сигнала (с задержкой, заложеной в спецификацию)	Верификатор должен задерживать необходимые управляющие сигналы	Необходимо иметь возможность определять свойство сигнала: количество тактов с момента его прихода до запуска алгоритма проверки
5. Выставляемые данные могут зависеть от предыстории управляющих сигналов	5.1. Верификатор должен вести историю (подсчет) управляющих сигналов 5.2. В определенные моменты историю следует очищать	5.1. Конечный автомат ведения истории должен генерироваться на основании перечня управляющих сигналов. Верификаторы должны иметь возможность обращения к выходным сигналам автомата 5.2. Следует иметь возможность определять свойство сигнала: необходимо ли по нему сбрасывать историю
6. Выставляемые данные могут зависеть от предыдущих состояний линии данных	Верификатор должен задерживать необходимые сигналы данных	Необходимо ввести лингвистические соглашения для обращения к задержанным данным в алгоритмах сравнения



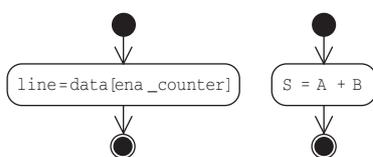
■ Рис. 4. Схема алгоритма описания потоков данных на диаграммах UML

ма алгоритма описания потоков данных приведена на рис. 4. Пояснения к этапам даны ниже.

Описание алгоритма копирования данных (п. 1, 5.1, 6 из таблицы)

Алгоритм копирования данных позволяет синтезировать ядро верифицирующего устройства, с помощью которого можно определить, как произошел обмен: правильно или с ошибкой. Ядро верификатора отслеживает шаги алгоритма, сравнивает его ожидаемые результаты с реальными и на основании этого сравнения делает вывод о правильности работы тестируемой системы. Сложность алгоритма и верификатора зависит от специфики устройства. Например, в последовательном передатчике алгоритм копирования сводится к выставлению очередного разряда исходного слова (рис. 5, слева), а верификатор, соответственно, выполняет одну операцию сравнения одноразрядных сигналов. Если проверяется более сложное устройство, такое как сумматор, алгоритм состоит из более сложной операции (однако, также единственной) (рис. 5, справа), а проверка сводится к самостоятельному суммированию операндов и сравнению результата, полученного на сумматоре, с результатом верификатора.

В UML существует средство для явного описания алгоритма — диаграмма деятельности. Ал-



■ Рис. 5. Примеры диаграмм деятельности, задающие алгоритмы копирования данных

горитм копирования данных целесообразно описать с помощью этой диаграммы.

Следует помнить, что тесты генерируются на каком-то определенном языке описания тестов (например, VHDL Testbench), поэтому на алгоритм накладываются ограничения с тем, чтобы сделать его синтезируемым в рамках выбранного языка.

- Присваивания и вообще любые операции должны выполняться с использованием тех операций, которые приняты в выбранном языке описания тестов аппаратуры.
- Необходимо обращаться только к сигналам, доступным в анализируемом устройстве.
- Допускается также обращение к специальным переменным — счетчикам управляющих сигналов и задержанным линиям данных.

Верификатор может обращаться к специальным переменным — значениям внутренних счетчиков и задержанным информационным сигналам. Данные сигналы должны добавляться в верификатор автоматически в случае их упоминания в диаграмме деятельности. Для идентификации специальных переменных следует ввести лингвистические соглашения, например:

- имя сигнала с суффиксом `_latched_n` (n — натуральное число) означает соответствующий сигнал, задержанный на n тактов;
- имя управляющего сигнала с суффиксом `_counter` означает счетчик управляющего сигнала, т. е. количество активаций этого сигнала с момента последнего сброса истории.

Задание свойств управляющих сигналов (п. 2–4, 5.2 из таблицы)

Некоторые параметры верификации можно задать с помощью опций сигналов, фигурирующих на диаграмме последовательности. Спецификация UML не поддерживает задания произвольных свойств сигнала напрямую, однако многие UML-редакторы позволяют назначать сигналам именованные значения, например Tagged Values в Microsoft Visio. Для верной интерпретации этих значений необходимо принять лингвистические соглашения относительно их имен и значений, например:

VerificationAlg — ассоциированный алгоритм верификации, значение — имя диаграммы деятельности;

ActivePart — рабочая часть сигнала, значения:

- PositiveEdge, NegativeEdge — положительный и отрицательный перепады;
- Edge — любой перепад;
- Whole — весь сигнал;
- Latency — количество тактов с момента активации сигнала до запуска алгоритма проверки, значение — целое неотрицательное число;

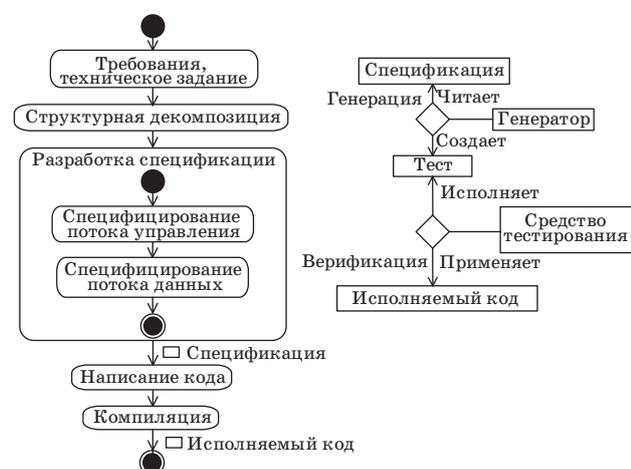
ClearHistory — очистить историю управляющих сигналов данной диаграммы последовательности, значения: True или False (по умолчанию).

Применение методики

Методика применяется совместно с методикой из работы [1], расширяя ее. Методика должна применяться дважды [1]: один раз для построения тестопригодной спецификации системы, другой — для создания средства преобразования этой спецификации в тест. Применение методики для создания спецификации полностью вписывается в маршрут проектирования ([1], рис. 1); этот этап выполняется на основании материала раздела «Описание потоков данных с помощью UML».

Полная схема применения методики представлена на рис. 6. Слева отображены этапы маршрута проектирования вместе с порождаемыми ими сущностями, справа — отношения этих сущностей с другими элементами процесса разработки систем. Элементы диаграммы, непосредственно относящиеся к применению разработанной методики:

- Разработка спецификации — этап, на котором применяется разработанная методика и в результате которого порождается UML-спецификация системы.
- Генератор — техническое средство для преобразования спецификаций в тесты. Рассмотрение деталей его реализации выходит за рамки данной статьи.
- Тест — сущность, генерируемая автоматически из спецификации системы.
- Верификация — исполнение теста, которое проверяет работу устройства. Осуществляется каким-либо средством имитационного тестирования (ModelSim, Quartus и т. д.) или в реальной системе с помощью встраиваемых средств тестирования.



■ Рис. 6. Схема применения методики

Результат, получаемый после применения методики, — возможность автоматического тестирования системы. Полнота тестирования полностью определяется глубиной и подробностью создаваемых спецификаций. Если при составлении спецификации были учтены все детали работы устройства, можно гарантировать 100-процентное покрытие тестов при достаточном наборе входных воздействий.

Заключение

В данной статье была предложена методика синтеза UML-спецификаций потоков данных в аппаратуре, основанная на общих признаках организации обмена данными в цифровых устройствах, позволяющая генерировать из этих спецификаций наблюдающие тесты потоков данных в аппаратных системах для проверки соответствия спроектированных устройств созданным ранее спецификациям.

Создаваемые в рамках методики спецификации основаны на спецификациях управляющих сигналов, которые описываются в соответствии с методикой, представленной в работе [1]. Применение обеих методик позволит создать тесты систем, которые проверяют как управляющие сигналы, так и данные. При высокой детализации спецификаций и достаточном наборе входных воздействий можно гарантировать 100-процентное покрытие тестов.

Применение методик полностью вписывается в маршрут проектирования цифровых устройств, становясь его частью. В данный момент разрабатывается техническое средство для реализации методик.

Литература

1. Березкин А. В., Филиппов А. С. Методика синтеза тестов аппаратуры по спецификациям на языке UML // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 24–30.
2. Avalon Interface Specification // Altera Website. http://www.altera.com/literature/manual/mnl_avalon_spec.pdf (дата обращения: 07.12.2010).
3. RS-232 Bus Description and EIA232 Pinout // interfacebus.com website. http://www.interfacebus.com/Design_Connector_RS232.html (дата обращения: 07.12.2010).
4. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей.
5. OpenVera Website. <http://www.open-vera.com/> (дата обращения: 07.12.2010).
6. SystemVerilog Website. <http://www.systemverilog.org/> (дата обращения: 07.12.2010).

УДК 621.391.15

КОНСТРУКЦИЯ ПЛЕТЕННЫХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ НА БАЗЕ КОДОВ ПРОВЕРКИ НА ЧЕТНОСТЬ С ОДНИМ ПРОВЕРОЧНЫМ СИМВОЛОМ

К. А. Кондрашов,

младший научный сотрудник

В. В. Зяблов,

доктор техн. наук, профессор

Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН

Предлагается новая конструкция плетеных сверточных кодов с малой плотностью проверок, разработанная на основе кодов проверки на четность с одним проверочным символом. Использование последних в качестве кодов-компонентов позволяет естественным образом варьировать результирующую скорость кода предложенной конструкции без изменения кодера и декодера и уменьшает сложность декодирования. Для декодирования предлагаются два итеративных алгоритма с жестким принятием решений: мажоритарный алгоритм и мажоритарный алгоритм с введением стираний. Выполняется исследование корректирующих свойств при заданных алгоритмах декодирования.

Ключевые слова — сверточные коды, плетеные коды, МПП-коды, коды проверки на четность, кодирование, итеративное декодирование, свободное расстояние, активное строчное расстояние.

Введение

Блочные коды с малой плотностью проверок на четность (МПП-коды) и итеративный алгоритм их декодирования были предложены Р. Галлагером еще в начале 1960-х [1]. Структура этих кодов потенциально позволяет получать малые вероятности ошибок для кодов с высокой скоростью при низкой сложности декодирования. Коды Галлагера являются каскадными кодами, в которых в качестве кодов-компонентов используются коды проверки на четность с одним проверочным символом. Такие коды-компоненты являются кодами с максимально достижимым кодовым расстоянием (МДР), легко декодируемы и существуют на всех длинах, что позволяет получать МПП-коды с произвольными скоростями.

В данной статье мы рассматриваем сверточные варианты МПП-кодов. Мы предлагаем конструкцию сверточных МПП-кодов [2], в которой в качестве кодов-компонентов также используются коды проверки на четность с одним проверочным символом. Последнее позволяет естественным образом, не изменяя кодер и декодер, варьировать скорость получаемых кодов. Для ко-

дов разработанной конструкции мы также предлагаем два итеративных алгоритма декодирования с жестким принятием решений [3, 4]. Для сравнения корректирующих свойств кодов мы рассматриваем похожую конструкцию сверточных МПП-кодов с меньшим числом кодов-компонентов, разработанную К. Зигангировым, Д. Трухачевым и М. Лентмайером [5]. Рассматриваемые сверточные МПП-коды мы называем плетеными сверточными кодами (П-СМПП-кодами).

Статья организована следующим образом. В первой части мы даем общее определение сверточных МПП-кодов, описываем конструкции П-СМПП-кодов, даем описание общей процедуры кодирования. Затем мы исследуем кодовые расстояния представленных кодов и описываем алгоритмы декодирования. В завершении мы приводим результаты моделирования.

Сверточные МПП-коды

Пусть $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_t \dots \mathbf{u}_t = [u_{t,1}u_{t,2} \dots u_{t,b}]$, $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_t \dots \mathbf{v}_t = [v_{t,1}v_{t,2} \dots v_{t,c}]$, $u_{t,i}, v_{t,i} \in \mathbb{F}_2$ соответственно информационная и проверочная последовательности сверточного кода со скоростью $R = b/c$, $b < c$. Пусть

$$H^T = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_0^T(0) & \mathbf{H}_1^T(1) & \mathbf{H}_2^T(2) & \dots & \mathbf{H}_{m_s}^T(m_s) & & & & \\ & \mathbf{H}_0^T(1) & \mathbf{H}_1^T(2) & \ddots & \ddots & & & & \\ & & \mathbf{H}_0^T(2) & \ddots & \ddots & \mathbf{H}_{m_s}^T(m_s+2) & & & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & \mathbf{H}_0^T(m_s) & \dots & \mathbf{H}_{m_s}^T(m_s+m_s) & & \\ & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & & & \mathbf{H}_0^T(t) & \dots & \mathbf{H}_{m_s}^T(m_s+t) & \\ & & & & & \ddots & \dots & \ddots & \end{pmatrix} \quad (1)$$

— транспонированная полубесконечная проверочная матрица этого кода, называемая также *формирователем синдрома*. Подматрицы $\mathbf{H}_i^T(t)$, $i = 0, 1, \dots, m_s$ — двоичные матрицы размера $c \times (c - b)$. Величина m_s называется *памятью* формирователя синдрома. Мы требуем, чтобы выполнялись следующие два условия:

$$\text{rank } \mathbf{H}_0^T(t) = c - b, t \in \mathbb{N};$$

$$\mathbf{H}_{m_s}^T(t) \neq \mathbf{0}, t \in \mathbb{N}, t \geq m_s.$$

Любая кодовая последовательность \mathbf{v} удовлетворяет уравнению $\mathbf{vH}^T = \mathbf{0}$ или, в рекуррентной форме:

$$\mathbf{v}_t \mathbf{H}_0^T(t) + \mathbf{v}_{t-1} \mathbf{H}_1^T(t) + \dots + \mathbf{v}_{t-m_s} \mathbf{H}_{m_s}^T(t) = \mathbf{0}, t \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

Если строки \mathbf{h}_n матрицы \mathbf{H}^T разрежены, т. е. $\omega_H(\mathbf{h}_n) \ll (c - b)m_s$, где $\omega_H(\cdot)$ — вес Хэмминга, то сверточный код является МПП-кодом.

Для любого МПП-кода (для сверточного — с момента времени $t = m_s$) если в каждом столбце проверочной матрицы ровно J единиц, а в каждой строке ровно K единиц, то МПП-код называется *регулярным* (далее мы рассматриваем только регулярные МПП-коды). Такой код можно рассматривать как состоящий из J внутренних кодов-компонентов проверки на четность длины K . Каждая строка проверочной матрицы в таком случае трактуется как код проверки на четность, образованный из символов кодового слова с номерами позиций, на которых в этой строке стоит 1.

Конструкции плетеных сверточных МПП-кодов

В работе Галлагера, посвященной блочным МПП-кодам [1], было показано, что МПП-коды с кодами-компонентами с одной проверкой на четность с минимальным расстоянием $d_i = 2$ обладают хорошими корректирующими свойствами (кодое расстояние растет линейно с длиной кода) в том случае, если используется $J \geq 3$ кодов-компонентов. И хотя мы строим сверточные МПП-коды, мы все же придерживаемся этого требования. Мы предлагаем конструкцию 4-плетеного сверточного МПП-кода (4-П-СМПП) с $J = 4$ кодами-компонентами [2].

Опишем конструкцию 4-П-СМПП-кода. В 4-П-СМПП-коде каждый символ кодового слова входит в 4 кода-компонента — в «горизонтальный», «вертикальный» и два «диагональных» кода-компонента, а само кодовое слово образуется из «переплетения» кодов-компонентов. Представим кодовое слово 4-П-СМПП-кода в виде полубесконечного массива двоичных символов (рис. 1, а). В строках такого массива хранятся кодовые слова горизонтального кода-компонента, в столбцах — кодовые слова вертикального кода-компонента, а по диагоналям располагаются кодовые слова диагональных кодов-компонентов. На рисунке изображено кодовое слово 4-П-СМПП-кода с длиной кодов-компонентов 8. Индексами обозначены символы, образующие кодовые слова четырех кодов-компонентов в произвольный момент времени t . На момент времени t серые ячейки представляют известные, закодированные ранее символы. На вход подается информационный блок \mathbf{u}_t , $\mathbf{u}_t = [u_{t,1}u_{t,2}u_{t,3}u_{t,4}]$. Выходом \mathbf{v}_t служит кодовое слово горизонтального кода-компонента. Память формирователя синдрома представленного кода $m_s = 7$, скорость $R = 1/2$, кодовое ограничение $(m_s + 1)c = 64$, а компонентные проверочные матрицы формирователя синдрома соответственно равны

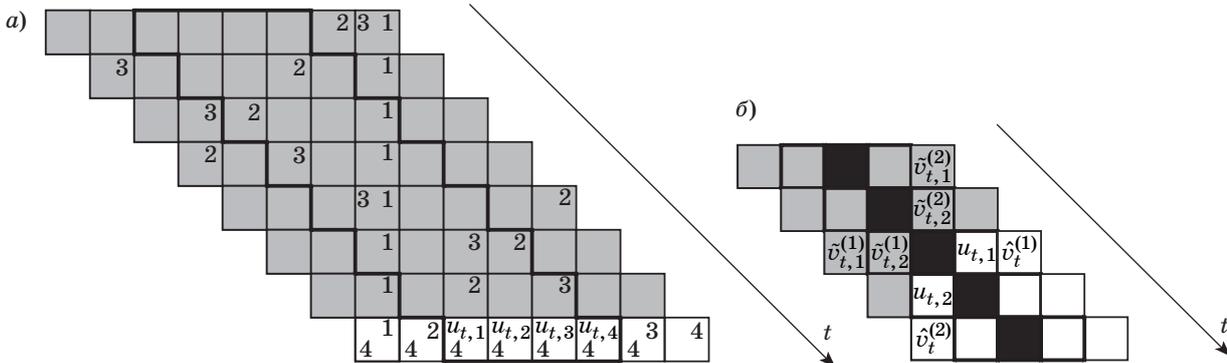
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Кодирование 4-П-СМПП-кода осуществляется следующим образом. В произвольный момент времени t параллельно кодируются вертикальный и диагональные коды-компоненты — все их информационные символы уже известны. Затем кодируется горизонтальный код-компонент — полученные от остальных кодов-компонентов проверочные символы вместе с символами кодируемого информационного блока u_t образуют его информационные символы. Кодовое слово горизонтального кода-компонента формирует выход.

Если из конструкции 4-П-СМПП-кода исключить два диагональных кода-компонента, то получившийся 2-П-СМПП-код будет описываться уже известной конструкцией [5]. В работах [5, 6] в качестве кодов-компонентов 2-П-СМПП-кода рассматривались коды с минимальным расстоянием $d_i \geq 3$. В этом случае было доказано, что свободное кодовое расстояние 2-П-СМПП-кода растет линейно с длиной кодового ограничения $(m_s + 1)c$. Тем не менее, в рамках поставленной задачи в качестве кодов-компонентов 2-П-СМПП-кода, как и в случае 4-П-СМПП-кода, мы будем использовать коды проверки на четность с $d_i = 2$.

Опишем конструкцию 2-П-СМПП-кода со скоростью $R = 1/2$. Представим кодовое слово 2-П-СМПП-кода с кодами-компонентами длины 4 в виде полубесконечного массива двоичных символов (рис. 1, б). Конструктивно этот массив разбивается на три «полосы» (на рисунке отделены жирной линией). В нижней полосе хранятся проверочные символы кодовых слов вертикального кода-компонента, в центральной полосе хранятся информационные символы кодируемой последовательности, в верхней полосе — проверочные символы кодовых слов горизонтального кода-компонента. Кодовое слово горизонтального кода-компонента $v_t^{(1)}$ образуется из символов $[\tilde{v}_{t,1}^{(1)} \tilde{v}_{t,2}^{(1)} u_{t,1} \hat{v}_t^{(1)}]$, а символы $[\tilde{v}_{t,1}^{(2)} \tilde{v}_{t,2}^{(2)} u_{t,2} \hat{v}_t^{(2)}]$ образуют кодовое слово $v_t^{(2)}$ вертикального кода-компонента. Информационный блок состоит из символов $u_t = [u_{t,1} u_{t,2}]$. В любой момент времени t проверочный символ горизонтального кода-компонента $\hat{v}_t^{(1)}$ вычисляется с помощью символов информационной последовательности u_t и закодированного ранее проверочного символа вертикального кода-компонента $\hat{v}_t^{(2)}$. Проверочный символ вертикального кода-компонента вычисляется по аналогии с использованием известных символов u_t и $\hat{v}_t^{(1)}$. Закодированный в момент времени t блок $v_t = [v_{t,1} v_{t,2} v_{t,3} v_{t,4}]$ состоит из следующих символов:

$$v_{t,i} = \begin{cases} u_{t,i}, & 1 \leq i \leq 2 \\ \hat{v}_t^{i-2}, & 3 \leq i \leq 4 \end{cases}$$



■ Рис. 1. Представление П-СМПП-кодов в виде полубесконечных массивов: а — 4-П-СМПП-код; б — 2-П-СМПП-код

Память формирователя синдрома представленного кода $m_s = 3$, кодовое ограничение $(m_s + 1) \times c = 16$, а компонентные проверочные матрицы формирователя синдрома соответственно равны

$$\left(\begin{array}{cc} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{array} \right), \left(\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right), \left(\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{array} \right), \left(\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right).$$

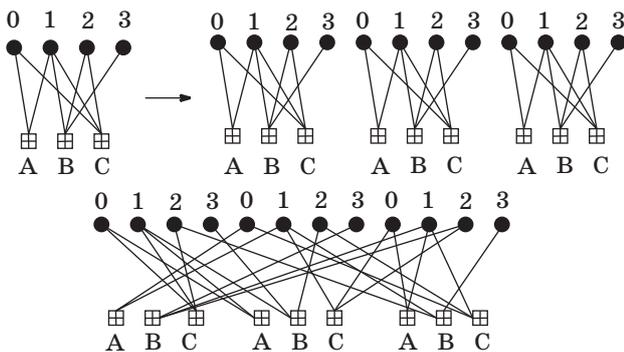
$\mathbf{H}_0 \quad \mathbf{H}_1 \quad \mathbf{H}_2 \quad \mathbf{H}_3$

Построение ансамбля плетеных сверточных кодов

Для построения ансамбля сверточных плетеных МПП-кодов мы воспользуемся методикой, предложенной в работе [7]. МПП-коды можно представить в виде графа Таннера [8] — двудольного графа, где один набор вершин соответствует символам МПП-кода (*символьные вершины*), а второй — проверкам кодов-компонентов МПП-кода (*проверочные вершины*). Выполняя различные преобразования над исходным графом МПП-кода, можно получить новые МПП-коды. Так, для построения ансамбля П-СМПП-кодов $\mathcal{C}(L)$ мы будем использовать выбираемые равновероятно случайные матрицы перестановок \mathbf{P} размера $L \times L$. Применим к исходному графу \mathbf{V} операцию «копирование с перестановками» [7]: $b_{i,j} = b_{i,j}P_{i,j}$. Каждому ребру графа \mathbf{V} ставится в соответствие матрица перестановки, все узлы графа копируются L раз, а конечные точки ребер переставляются. В качестве примера на рис. 2 показано преобразование с коэффициентом $L = 3$ графа

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Преобразование увеличивает в L раз длину кода N , c , b и кодовое ограничение.



■ Рис. 2. Копирование протографа с перестановками

Кодирование плетеных сверточных кодов

Кодировать П-СМПП-коды можно несколькими способами. Первый из них уже был описан при построении конструкций. Однако он не является оптимальным [9]. С аналогичной сложностью, но с меньшим требованием к памяти можно кодировать П-СМПП-коды с помощью *частичных синдромов*.

Опишем алгоритм кодирования. В любой момент времени t кодовая последовательность \mathbf{v} удовлетворяет условию

$$\mathbf{v}_{[0,t-1]} \mathbf{H}_{[0,t+m_s-1]}^T = [\mathbf{0}_{[0,t-1]} | \mathbf{s}_t], \quad (3)$$

где $\mathbf{s}_t = [s_{t,1} s_{t,2} \dots s_{t,m}]$ — вектор *частичных синдромов*. На самом деле, вектор *частичных синдромов* \mathbf{s}_t — это не что иное, как состояние σ_t кодера сверточного кода в момент времени t . Вектор *частичных синдромов* вычисляется рекуррентно в соответствии со следующим правилом:

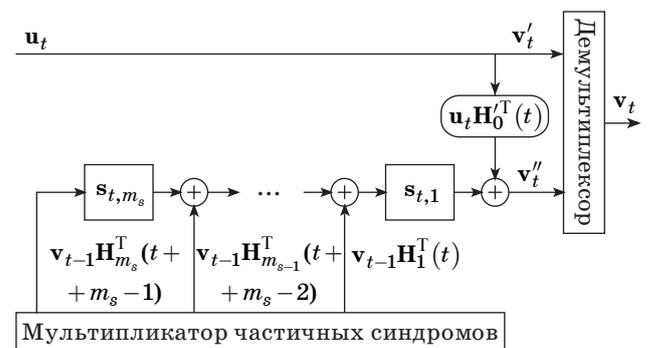
$$\mathbf{s}_{t,i} = \begin{cases} \mathbf{s}_{t-1,i+1} + \mathbf{v}_{t-1} \mathbf{H}_i^T(t+i-1), & i=1, \dots, m_s-1 \\ \mathbf{v}_{t-1} \mathbf{H}_{m_s}^T(t+m_s-1), & i=m_s \end{cases}. \quad (4)$$

Пусть, без потери общности, символы информационного блока \mathbf{u}_t стоят на первых b позициях кодового блока \mathbf{v}_t . Пусть $\mathbf{v}_t = [\mathbf{v}'_t | \mathbf{v}''_t]$, $\mathbf{v}'_t = \mathbf{u}_t$. Напомним, что подматрица $\mathbf{H}_0^T(t)$, $t \in \mathbb{N}$ имеет полный ранг $c - b$. Тогда кодовый блок $\mathbf{v}_t = [\mathbf{v}'_t | \mathbf{v}''_t]$ находится из решения

$$-[\mathbf{u}_t | \mathbf{v}''_t] \mathbf{H}_0^T(t) = \mathbf{s}_{t,1}. \quad (5)$$

Необходимый для кодирования таким способом объем памяти составляет $(c - b)m_s$ бит. Сложность кодирования линейна относительно длины N П-СМПП-кода.

При аппаратной реализации кодирования для вычисления *частичных синдромов* можно использовать сдвиговой регистр (рис. 3). В этом



■ Рис. 3. Схема сверточного кодера на основе *частичных синдромов*

случае можно построить кодер, позволяющий «переключать» скорость сверточного кода. Построим кодер на сдвиговом регистре, рассчитанный на максимальную скорость П-СМПП-кода и, соответственно, максимальные значения m_s и s . Тогда при уменьшении разрядности сумматоров в сдвиговом регистре и его памяти, что соответствует уменьшению длины кодов-компонентов и памяти формирователя синдрома, мы будем получать П-СМПП-код с меньшей скоростью.

Оценка кодового расстояния

В отличие от блочных кодов, сверточные коды имеют кодовые слова различной длины. Поэтому использовать определенное для блочных кодов и подразумевающее сравнение кодовых слов одной длины *минимальное кодовое расстояние* — минимальное хэммингово расстояние между любыми двумя кодовыми словами — для них нельзя. Вместо этого для сверточных кодов вводится аналог минимального кодового расстояния — свободное расстояние.

Определение 1. Минимальное расстояние между любыми различными кодовыми последовательностями сверточного кода называется свободным расстоянием:

$$d_{free} = \min_{\mathbf{v} \neq \mathbf{v}'} \{d_H(\mathbf{v}, \mathbf{v}')\}.$$

Математический аппарат для исследования сверточных кодов не так хорошо развит, как для блочных. В общем случае теоретическая оценка свободного расстояния сверточного кода является сложной исследовательской задачей, сильно зависящей от используемой кодовой конструкции. Однако часть точных значений характеристик сверточного кода можно получить методом компьютерного моделирования. Для получения оценки свободного кодового расстояния мы будем исследовать вспомогательную величину — активное строчное расстояние.

Определение 2. Активным строчным расстоянием d_j сверточного кода называется минимальный вес терминированного кодового слова $\mathbf{v}_{[1, j]}$, не проводящего кодер через два последовательных нулевых состояния:

$$d_j = \min \left\{ \omega_H(\mathbf{v}_{[1, j]}) : \mathbf{v}_{[1, j]} \mathbf{H}_{[1, j+m_s-1]}^T = \mathbf{0} \right\}.$$

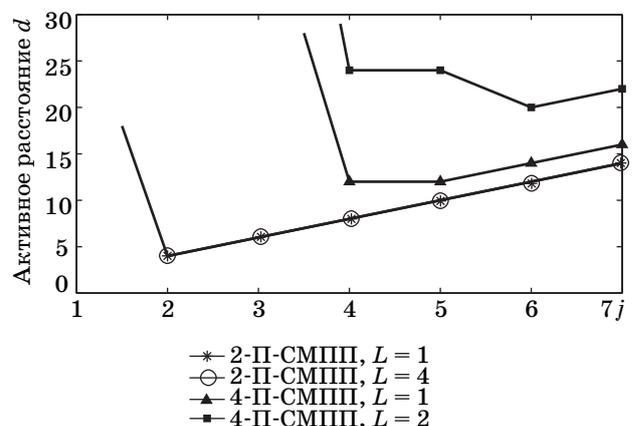
Свободное расстояние связано с активными расстояниями следующим отношением:

$$d_{free} = \min_j \{d_j\}. \quad (6)$$

Для нахождения активных расстояний d_j мы будем решать для различных длин j систему линейных уравнений

$$\mathbf{x} \mathbf{H}_{[1, j+m_s-1]}^T = \mathbf{0}, \quad (7)$$

из которой исключены первые несколько строк, отвечающие нулевым проверочным символам вертикального и диагональных кодов-компонентов в первом кодовом блоке. Система (7) имеет или единственное нулевое решение, или множество решений. В последнем случае найденные линейно независимые решения системы (7) образуют фундаментальную систему решений (ФСР), линейная оболочка которой дает все решения системы (7). Найдем среди векторов линейной оболочки ФСР ненулевой вектор с минимальным весом. Его вес даст точное значение активного расстояния d_j . Однако таким способом можно рассчитать лишь ограниченное число начальных активных расстояний. Сложность перебора векторов линейной оболочки растет экспоненциально с числом найденных решений, поэтому, по мере увеличения j , которое также увеличивает размерность ФСР, мы быстро сталкиваемся с вычислительным ограничением. Результаты моделирования по вычислению активных расстояний рассмотренных П-СМПП-кодов представлены на рис. 4. Больше число кодов-компонентов и возросшая память повлияли на увеличение активных и свободных расстояний 4-П-СМПП-кодов по сравнению с 2-П-СМПП-кодами. Расширение 4-П-СМПП-кодов при $L > 1$ также увеличивает активные расстояния. Однако при расширении 2-П-СМПП-кода расстояния не изменились (на рис. 4 активные расстояния 2-П-СМПП-кодов с $L = 1$ и $L = 4$ совпадают). Отметим, что на графиках для некоторого j_{max} , $j < j_{max}$ для каждого кода наблюдаются значения $d_j = \infty$. Это означает, что при данных значениях j система (7) не имеет никаких решений, кроме тривиального. Следовательно, для рассматриваемых П-СМПП-кодов не существует пакетов ошибок с длиной до j_{max} .



■ Рис. 4. Активные расстояния П-СМПП-кодов

Декодирование плетеных сверточных кодов

Для представленных П-СМПП-кодов мы предлагаем два итеративных алгоритма декодирования с жестким принятием решения [3, 4]: мажоритарный алгоритм \mathcal{A}_1 и его расширенный вариант \mathcal{A}_2 с введением стираний.

Для начала опишем обобщенную процедуру декодирования, которую можно применять к П-СМПП-кодам с произвольными кодами-компонентами. Введем необходимые обозначения. Пусть \mathbf{r} — принятое из канала слово, содержащее ошибки. На произвольной итерации i , $i \in \mathbb{N}$ на вход декодера подается слово $\mathbf{r}^{(i)}$, где $\mathbf{r}^{(1)} = \mathbf{r}$, выходом декодера является слово $\mathbf{r}^{(i+1)}$. Для декодирования слов, относящихся к определенным кодам-компонентам, используются соответствующие компонентные декодеры $\{D^{(k)}\}_{k=1}^J$ или $\{E^{(k)}\}_{k=1}^J$, если компонентные декодеры способны исправлять как ошибки, так и стирания.

Каждая итерация декодирования обобщенным алгоритмом состоит из двух частей: *внутреннего* декодирования — декодирования слов кодов-компонентов и *внешнего* декодирования — принятия решения по каждому символу слова П-СМПП-кода. При внутреннем декодировании слов кодов-компонентов никакие символы декодируемого слова не заменяются, вместо этого значения символов, полученные от внутренних декодеров, запоминаются в памяти. В результате внутреннего декодирования для каждого символа слова $\mathbf{r}^{(i)}$ в памяти хранится J решений — по решению от J декодеров кодов-компонентов. При внешнем декодировании для каждого символа слова $\mathbf{r}^{(i)}$ на основании этих J значений принимается решение об изменении. Результатом становится слово $\mathbf{r}^{(i+1)}$.

Обобщенный алгоритм декодирования

Внутреннее декодирование. Для каждого кода-компонента k с помощью декодера компонента $D^{(k)}$ декодируются все соответствующие ему слова из $\mathbf{r}^{(i)}$. Результаты запоминаются в $\mathbf{r}_k^{(i)}$.

Внешнее декодирование. Для каждого символа $r_j^{(i)}$ входного слова $\mathbf{r}^{(i)}$ значение $r_j^{(i)}$ вместе со значениями $\{r_{j,k}^{(i)}\}_{k=1}^J$, полученными для этого символа при внутреннем декодировании, подается на вход функции *голосования*. Эта мажоритарная функция возвращает $r_j^{(i+1)}$ со значением, которое встречалось среди ее входных аргументов чаще других. Из всех $r_j^{(i+1)}$ формируется слово следующей итерации $\mathbf{r}^{(i+1)}$.

Критерии останова. Логическим критерием завершения декодирования является нулевое значение синдрома, полученного после некоторой ите-

рации i слова $\mathbf{r}^{(i+1)}$. Однако изменение синдрома с каждой итерацией может носить произвольный характер. Поэтому для гарантии останова алгоритма мы вводим ограничение на число итераций. Таким образом, возможны следующие результаты декодирования: успех декодирования; ошибка декодирования; отказ от декодирования.

Успех декодирования. Успех декодирования происходит в том случае, если синдром выходного слова $\mathbf{r}^{(i+1)}$ нулевой и декодированное кодовое слово совпадает с переданным: $S(\mathbf{r}^{(i+1)}) = \mathbf{0}$, $\mathbf{r}^{(i+1)} = \mathbf{v}$.

Ошибка декодирования. Происходит при нулевом синдроме, когда принятое слово декодировалось в другое кодовое слово, не совпадающее с переданным: $S(\mathbf{r}^{(i+1)}) = \mathbf{0}$, $\mathbf{r}^{(i+1)} \neq \mathbf{v}$.

Отказ от декодирования. Отказ происходит при ненулевом синдроме, если достигнут предел итераций или результирующее слово итерации $\mathbf{r}^{(i+1)}$ не отличается от входного слова итерации $\mathbf{r}^{(i)}$: $S(\mathbf{r}^{(i+1)}) \neq \mathbf{0}$, $\mathbf{r}^{(i+1)} = \mathbf{r}^{(i)} \vee i = I_{\max}$.

Алгоритм декодирования П-СМПП-кодов с кодами-компонентами с одним проверочным символом \mathcal{A}_1 получается из обобщенного алгоритма декодирования выбором подходящих декодеров для внутреннего декодирования. Сами по себе коды с одним проверочным символом способны лишь обнаруживать ошибки, но не исправлять их. Поэтому внутреннее декодирование несколько отличается от того, что обычно под этим понимается. В алгоритме \mathcal{A}_1 при внутреннем декодировании для каждого слова кода-компонента k декодер $D^{(k)}$ изменяет каждый символ слова так, чтобы с учетом этого изменения декодируемое слово удовлетворяло проверке на четность.

Для двоичных П-СМПП-кодов с четным числом кодов-компонентов во время процедуры голосования возможна ситуация, когда декодированные

значения $\{r_{j,k}^{(i)}\}_{k=1}^J$ символа $r_j^{(i)}$ делятся поровну.

В этом случае логично подозревать символ $r_j^{(i)}$ на ошибку, но алгоритм \mathcal{A}_1 не приводит к его изменению. На поздних итерациях, когда большинство ошибок исправлено (или внесены новые устойчивые ошибки), невозможность изменить спорный символ приводит с большой вероятностью к отказу декодирования, так как декодируемое слово не изменяется. Чтобы иметь возможность продолжить декодирование, мы предлагаем ассоциировать с символом новую качественную характеристику и считать такой «ненадежный» символ стертým.

Определение 3. Стирание — качественная характеристика символа, означающая, что его значение не определено. При отсутствии ошибок код с минимальным расстоянием d способен исправить до $d - 1$ стираний.

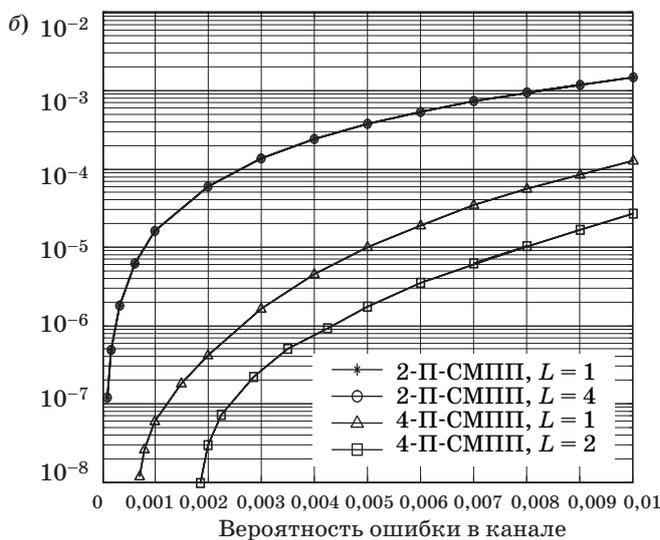
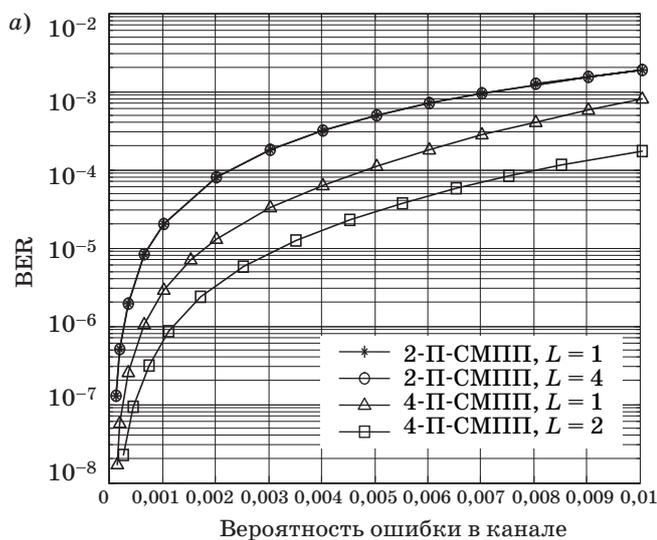
Алгоритм \mathcal{A}_2 также построен на основе обобщенного алгоритма декодирования, но он работа-

ет с учетом стираний. В алгоритме декодирования A_2 при голосовании спорные символы объявляются стертymi. На внутреннем декодировании используются компонентные декодеры $\{E^{(k)}\}_{k=1}^J$, исправляющие стирания. Если декодируемое слово кода-компонента k не содержит стираний, то $E^{(k)}$ работает как $D^{(k)}$. Если слово содержит одно стирание, то значение стертого символа заменяется с учетом выполнения проверки на четность и стирание снимается. Если стираний в слове больше одного, то слово не изменяется. При внешнем декодировании значения стертых символов в голосовании не участвуют, а решение для символа принимается, если число совпавших декодированных значений этого символа больше половины числа кодовых компонентов. При исправлении стираний новые

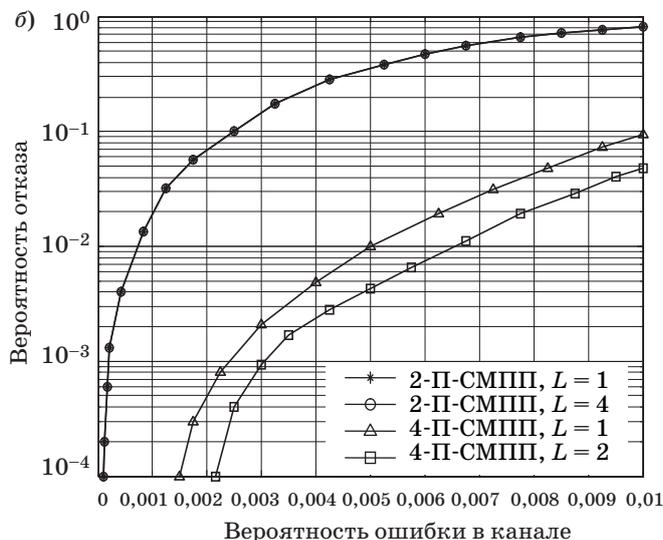
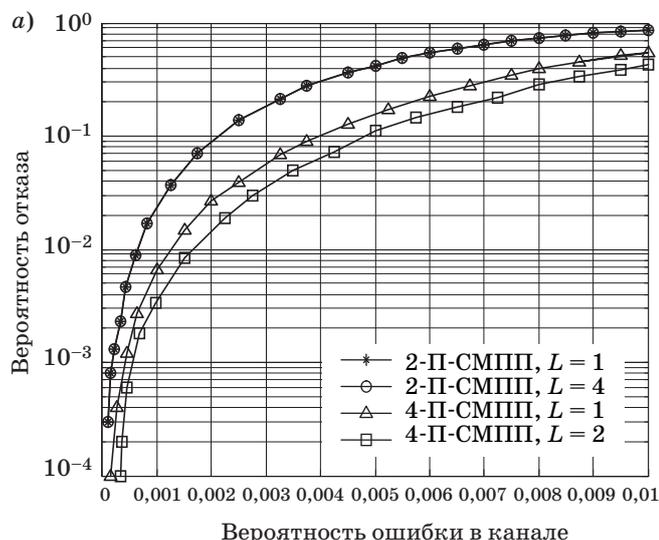
стирания не образуются, а значит, стирания либо будут полностью декодированы, либо будет получена неисправимая комбинация стираний. В последнем случае мы снимаем с оставшихся символов значение стирания: продолжается декодирование с исправлением ошибок. Критерии останова и возможные значения на выходе алгоритма A_2 аналогичны критериям и значениям алгоритма A_1 .

Декодирование итеративным алгоритмом

Моделирование проводилось для 2-П-СМПП-кода длины 2400 бит с кодами-компонентами (4,3)-кодами проверки на четность и 4-П-СМПП-кода длины 2400 с кодами-компонентами (8,7)-кодами проверки на четность. Выходные вероятности ошибки на бит (Bit-Error-Rate — BER) и ве-



■ Рис. 5. Результаты декодирования П-СМПП-кодов: а — алгоритм декодирования A_1 ; б — алгоритм декодирования A_2



■ Рис. 6. Вероятность отказа декодирования: а — алгоритм декодирования A_1 ; б — алгоритм декодирования A_2

роятности отказа декодирования представлены на рис. 5, 6 соответственно.

Обладая большим кодовым расстоянием, 4-П-СМПП-код исправляет больше ошибок, чем 2-П-СМПП-код. Расширение 4-П-СМПП-кода с $L > 1$ приводит к дальнейшему улучшению результата. Расширение 2-П-СМПП-кода, как и в случае с расстояниями, не повлияло на результаты декодирования (результаты на рис. 4, 5 совпадают). Отметим, что при декодировании алгоритмом A_2 как 4-ПСММ-коды, так и 2-П-СМПП-коды показывали результаты лучше, чем при декодировании по алгоритму A_1 .

Заключение

В статье была представлена новая конструкция плетеных сверточных МПП-кодов с четырь-

мя кодами-компонентами с одной проверкой на четность. Разработаны два итеративных алгоритма декодирования с жестким принятием решений. Исследованы корректирующие свойства представленных П-СМПП-кодов. Для сравнения была выбрана кодовая конструкция с меньшим числом кодов-компонентов. Эта конструкция аналогична конструкции [5], однако ранее использование кодов с одной проверкой на четность в данной конструкции не исследовалось.

Использование кодов с одной проверкой на четность в 2- и 4-П-СМПП-кодах позволяет адаптивно изменять их скорость без изменения кодеров и декодеров, а также уменьшает сложность декодирования. Увеличение числа кодов компонентов при сохранении сложности декодирования приводит к улучшению кодовых характеристик и результатов декодирования.

Литература

1. Галлагер Р. Дж. Коды с малой плотностью проверок на четность. — М.: Мир, 1966. — 144 с.
2. Кондрашов К. А., Зяблов В. В. Две конструкции сверточных МПП-кодов // Информационные технологии и системы (ИТиС): сб. тр. Бекасово, 2009. С. 15–18.
3. Kondrashov K., Zyablov V. Binary LDPC Woven Convolutional Codes Decoding // Algebraic and Combinatorial Coding Theory (ACCT 2010), Sep. 2010, Akademgorodok, Novosibirsk, RUSSIA. P. 323–328.
4. Кондрашов К. А., Зяблов В. В. Декодирование Q-ных плетеных сверточных МПП-кодов // Информационные технологии и системы (ИТиС): сб. тр. Геленджик, 2010. С. 85–88.
5. Zigangirov K. Sh., Truhachev D., Lentmaier M. On braided block codes // Proc. IEEE Int. Symp. on Inf. Th., ISIT 2003, Yokohama, Japan, 29 June – 4 July 2003. P. 32.
6. Lentmaier M. et al. Convolutional Codes for Iterative Decoding // Spread Spectrum Techniques and Applications, ISSSTA'08 // IEEE 10th Intern. Symp. Aug. 2008. P. 785–789.
7. Thorpe J. Low Density Parity Check (LDPC) Codes Constructed from Protographs // JPL IPN Progress Report 42–154. 2003. P. 1–7.
8. Tanner R. M. A Recursive Approach to Low Complexity Codes // IEEE Trans. Inform. Theory. 1981. Vol. 27. N 5. P. 533–547.
9. Pusane A. E. et al. Implementation aspects of LDPC convolutional codes // Communications, IEEE Transactions. 2008. Vol. 56. N 7. P. 1060–1069.

УДК 62-83:621

УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В. А. Атанов,

канд. техн. наук, доцент

Г. С. Бритов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются устройства функционального диагностирования электропривода, позволяющие обнаружить дефекты, возникающие при его функционировании. Предложено автоматизировать процедуру синтеза устройства функционального диагностирования минимальной размерности, построив систему моделирования исследуемого электропривода и устройства диагностирования.

Ключевые слова — диагностика, непрерывный контроль, моделирование, электропривод.

Введение

При диагностировании систем управления используют два подхода: тестовое диагностирование в специальных, тестовых режимах и функциональное диагностирование, осуществляемое непосредственно в рабочем режиме. Задача тестового диагностирования линейных систем управления подробно рассмотрена, в частности, в статье [1]. Там представлена организация тестового контроля систем управления с помощью рассчитываемого устройства тестового контроля — тестера.

Задача функционального диагностирования динамических систем [2] важна для организации непрерывного контроля, в частности электроприводов. В статье [3] был описан непрерывный контроль электропривода подачи станка с числовым программным управлением (ЧПУ). Была построена структурная схема блока диагностирования, состоящая из одного интегратора и одного сумматора. Диагностирующий признак, вырабатываемый этим блоком, позволял осуществлять непрерывный контроль исследуемого электропривода.

Различные методы функционального диагностирования описаны в работах [2–10]. При всем их разнообразии в них можно выделить объект диагностирования с доступными входами и выходами, устройство получения диагностических признаков и анализатор значений этих признаков. В ряде методов используются простые устройства

получения диагностических признаков, но сложные анализаторы. В других методах, наоборот, стараются упростить процедуру анализа за счет усложнения процедуры получения диагностических признаков.

К методам первой группы относятся, например, допусковый контроль по трубке динамической точности, а также контроль по частотным характеристикам. Получить диагностические признаки здесь несложно путем обычных измерений. А вот проанализировать результаты измерений сложно, так как необходимо хранить параметры динамических траекторий или частотных характеристик.

Примером методов второй группы может служить метод контроля по модели, в котором диагностические признаки получаются как отклонения выходов объекта диагностирования от соответствующих значений модели объекта. Другой метод связан с модальным диагностированием, когда моделируется не весь объект, а только одна его мода [2]. Возможен также параметрический контроль, предполагающий идентификацию одного или нескольких параметров объекта по входным и выходным сигналам [5, 9, 10].

Функциональное диагностирование осуществляется, как правило, с помощью методов второй группы. Здесь обычно строится дополнительная динамическая система определенного порядка. Она является устройством функционального диагностирования (УФД), так как на выходе формируются диагностические признаки. Их анализ

не вызывает никаких трудностей и позволяет определить, правильно ли функционирует диагностируемая система [2].

В работах [1, 2] была поставлена и решена задача минимизации общей сложности УФД, представляющего собой, как и объект, динамическую систему. При этом в качестве критерия сложности использовалась размерность УФД, т. е. общий порядок описывающей его системы дифференциальных уравнений. Процедура синтеза УФД минимальной размерности, используемая в указанных работах, основывалась на концепции алгебраических инвариантов [2] и требовала достаточно сложных матричных вычислений.

Постановка задачи

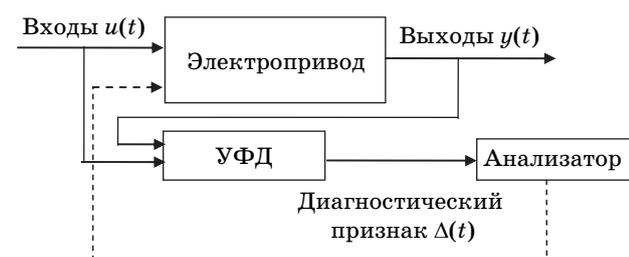
В настоящей статье предлагается применить процедуру синтеза УФД минимального порядка, построив систему моделирования как исследуемого электропривода, так и устройства функционального диагностирования.

В соответствии с этим задача синтеза УФД минимального порядка для данного электропривода сводится к задаче расчета коэффициентов системы дифференциальных уравнений УФД и моделирования их вместе с дифференциальными уравнениями электропривода. Эта задача решается известными методами [1, 2] на основе различных видов математического описания объекта диагностирования.

Преимуществом такого подхода является упрощение процедуры расчета и моделирования УФД за счет автоматизации рутинных матричных операций. А моделирование исследуемого электропривода вместе с УФД позволит проанализировать его диагностические свойства.

Общая схема системы функционального диагностирования электропривода приведена на рис. 1.

Объект диагностирования — электропривод характеризуется доступными входами $u(t)$ и выходами $y(t)$. Они поступают на УФД, которое формирует диагностический признак $\Delta(t)$. Он позволяет определить, правильно или неправильно функционирует электропривод в данный момент



■ Рис. 1. Структура системы функционального диагностирования

времени. Следовательно, можно поставить задачу управления работой электропривода по результатам диагностирования. Эту задачу решает анализатор, который по диагностическому признаку либо допускает осуществлять процесс управления, либо запрещает его. Имеется возможность рассчитать параметры УФД так, чтобы при нормальном процессе управления диагностический признак был близок к нулю [3]. При нарушении процесса слежения, вызванном изменениями параметров электропривода, диагностический признак по абсолютной величине становится больше нуля. Анализатор остановит электропривод.

Функциональное диагностирование электропривода

Рассмотрим пример комплектного электропривода типа ПТ-ЗР-50, используемого в общепромышленных машинах, например в механизме продольной подачи суппорта металлорежущих станков с ЧПУ. Схема главного контура управления по скорости подачи суппорта показана на рис. 2. Она включает обычные блоки, определяющие процесс отслеживания напряжения на выходе устройства ЧПУ u . Расчет коэффициентов передаточных функций блоков электропривода осуществляется на основе требований к характеристикам переходного процесса. Выходы блоков $x_i, i = 1...4$.

Передаточные функции блоков:

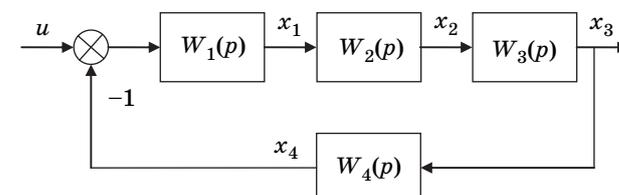
— усилитель напряжения с токоограничением, входом которого является выход датчика рассогласования, а выходом — напряжение постоянного тока x_1 :

$$W_1(p) = \frac{32}{0,003 \cdot p + 1};$$

— корректирующее звено, входом которого является выход усилителя x_1 , а выходом — напряжение постоянного тока x_2 :

$$W_2(p) = \frac{0,0005 \cdot p^2 + 0,06 \cdot p + 1}{0,00052 \cdot p^2 + 0,262 \cdot p + 1};$$

— тиристорный преобразователь с двигателем, входом которого является выход корректирующего звена x_2 , а выходом — угловая скорость двигателя x_3 :



■ Рис. 2. Структурная схема электропривода

$$W_3(p) = \frac{6,279}{0,012 \cdot p^2 + 0,3 \cdot p + 1};$$

— тахогенератор, входом которого является угловая скорость двигателя x_3 , а выходом — напряжение постоянного тока на датчик рассогласования x_4 :

$$W_4(p) = 5.$$

Возможными дефектами электропривода являются существенные отклонения от номинальных значений коэффициента усиления усилителя, параметров корректирующего звена, якорной цепи электродвигателя, элементов отрицательной обратной связи по скорости, обеспечиваемой тахогенератором. Следствием этих отказов оказываются изменения значений коэффициентов передаточных функций блоков.

В статье [1] приведены алгоритм и программа пакета MatLab расчета УФД. Программа представляет собой сценарий, который обеспечивает:

- ввод исходных данных расчета в виде параметров электропривода;
- определение минимального порядка УФД;
- вычисление матриц описания УФД в пространстве состояний;
- моделирование электропривода с УФД;
- изменение параметров электропривода в задаваемое число раз.

Результаты вычисления параметров УФД для исследуемого электропривода с доступным выходом тахогенератора, а также вид диалога с программой:

```
T=1, h=0.01, Текст формулы функции входного сигнала '1+0*t'
Nums=[32],[0.0005 0.06 1],[6.279],[5]], Dens=[0.003 1],[0.0005 0.262
1],[0.012 0.3 1],[1]]
F=[0 0 0 -1; 1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0], G=[1; 0; 0; 0], H=[0 0 0 1]
Ready
```

матрица коэффициентов:

0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0

матрица входов:

0.9999	0.1999
0.0105	0.0020
0.0001	-0.0000
0.0000	0.0000

матрица выходов: 0 0 0 1, матрица обхода: 1.0e-009*[0.3584 0]

Схема рассчитанного УФД с двумя входами ($y = x_4$ и u) показана на рис. 3.

Схема УФД состоит из четырех интеграторов в соответствии с порядком электропривода, который, строго говоря, равен 5, но практически равен 4, так как коэффициент при p^5 равен $1,872 \cdot 10^{-8}$. Четыре весовых сумматора дают возможность

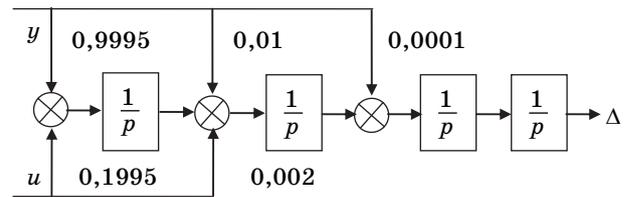


Рис. 3. Структурная схема УФД с двумя входами

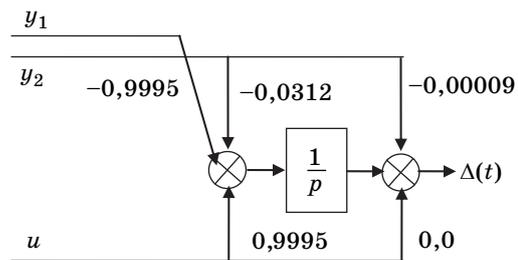


Рис. 4. Структурная схема УФД с тремя входами

получить диагностический признак. Если он близок к нулю, то электропривод работает правильно. Необходимо обратить внимание на то, что при одном доступном для диагностирования выходе электропривода порядок УФД практически совпадает с порядком самого электропривода.

Добавим для организации функционального диагностирования дополнительный выход блока усиления с токоограничением. Тогда результаты работы программы будут следующими:

```
T=T, h=h, Текст формулы функции входного сигнала '1+0*t'
Nums=Num, Dens=Den, F=F, G=G, H=[0 0 0 1; 1 0 0 0]
Ready
матрица коэффициентов: 0
матрица входов: -0.9995 -0.0312 0.9995
матрица выходов: 1
матрица обхода: 1.0e-004 * -0.0000 -0.9370 0
```

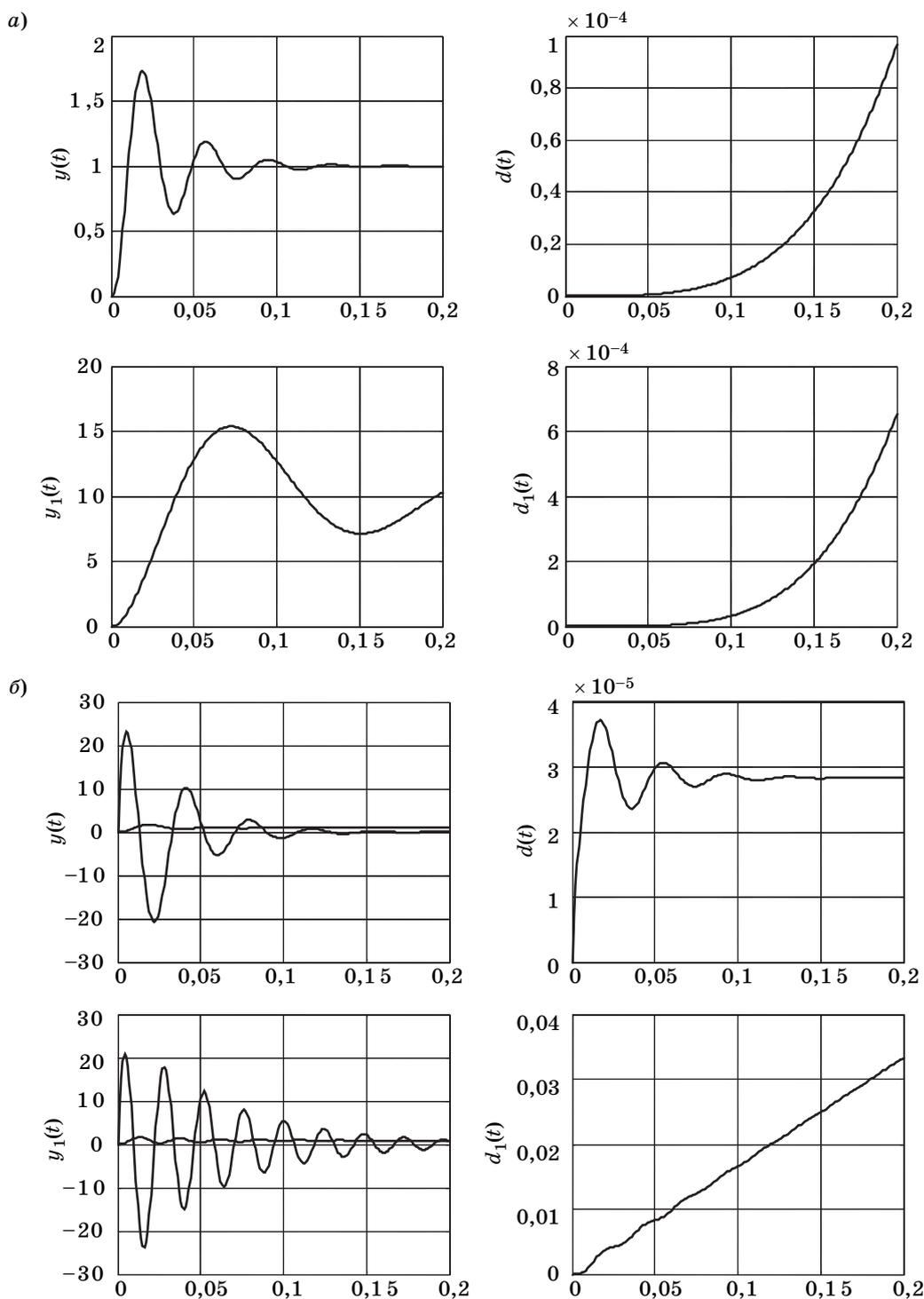
Схема рассчитанного УФД с тремя входами ($y_1 = x_4$, $y_2 = x_1$ и u) показана на рис. 4.

Схема построена только из одного интегратора и двух весовых сумматоров для получения диагностического признака.

Компьютерный эксперимент

В компьютерном эксперименте рассматривались следующие задачи:

- 1) расчет устройства функционального диагностирования на основе заданной структуры электропривода;
- 2) моделирование электропривода при заданной его структуре и единичном скачке на входе;
- 3) моделирование устройства функционального диагностирования без отказов;



■ Рис. 5. Графики компьютерного эксперимента: а — один доступный выход электропривода; б — два доступных выхода электропривода

4) изменение параметров электропривода в результате действия отказов;

5) моделирование устройства функционального диагностирования при наличии отказов.

Указанные задачи позволяют проанализировать чувствительность контроля с помощью УФД.

Моделирование показало, что УФД 4-го порядка с двумя входами обладает очень низкой чувствительностью. Так, при изменении коэффициента тахогенератора в 10 раз, когда переходный процесс изменяется почти в 10 раз, диагностический признак увеличивается только в 8 раз. Обычно ре-

акция диагностического признака должна быть более существенной. Тем не менее, анализатор (см. рис. 1) сможет зафиксировать такой отказ. На рис. 5, а показаны графики переходных процессов электропривода с одним доступным выходом без отказов ($y(t)$) и с отказом тахогенератора ($y_1(t)$), а также графики диагностических признаков в обоих случаях ($d(t)$, $d_1(t)$).

Лучше чувствительность УФД 1-го порядка с тремя входами. При изменении параметров усилителя на 20 % переходный процесс изменяется незначительно, а диагностический признак увеличивается на 3 порядка. Следовательно, анализатор сразу же определит отказ усилителя. На рис. 5, б приведены графики компьютерного эксперимента для УФД с двумя доступными выходами без отказов ($y(t)$) и с отказами ($y_1(t)$), а также графики диагностических признаков в обоих случаях ($d(t)$, $d_1(t)$). Однако отказы других блоков электропривода такой УФД не обнаруживает. Следовательно, нужно строить УФД с тремя входами, но применять разные матрицы \mathbf{H} . Так, для обнаружения отказов в корректирующем звене эта матрица должна иметь вид $\mathbf{H} = [0\ 0\ 0\ 1; 0\ 1\ 0\ 0]$.

Следует отметить, что максимальной чувствительностью будет обладать УФД, построенный на основе единичной матрицы \mathbf{H} , когда доступны для измерения все выходы блоков электропривода. При этом порядок УФД минимален и равен 1.

Кроме того, максимальной чувствительностью обладает УФД, построенный на основе полной модели электропривода. В этом случае для контроля может быть использован только один измеряемый выход, а порядок УФД максимален и равен 5.

Заключение

Устройства функционального диагностирования электропривода могут быть построены с использованием интеграторов и сумматоров. Они позволяют сформировать диагностический признак, по величине которого анализатор может судить о правильности процесса слежения. При одном доступном выходе электропривода устройство функционального диагностирования имеет порядок, близкий к порядку электропривода. При увеличении числа доступных выходов порядок устройства функционального диагностирования уменьшается, приближаясь к единице.

Компьютерный эксперимент показал, что функциональное диагностирование электропривода подачи суппорта станка с ЧПУ можно организовать с использованием интеграторов и сумматоров достаточно экономичным способом. Диагностические признаки позволяют обнаруживать отказы, которые могут возникать при работе электропривода.

Работа выполнена по гранту № 11-08-00240.

Литература

1. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.
2. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: МГУ, 1998. — 340 с.
3. Атанов В. А., Бритов А. Г. Непрерывный контроль электроприводов // Электротехника. 1991. № 4. С. 55–58.
4. Игнатъев М. Б., Мироновский Л. А., Юдович В. С. Контроль и диагностика робототехнических систем / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
5. Мироновский Л. А. Диагностирование систем управления методом аннулирующего сигнала // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 5. С. 3–7.
6. Abdeerrahman A., Cerny E. Worst tolerance analysis and CLP-based multifrequency test generation for analogue circuits // IEEE Trans. Computer-aided design. 1999. Vol. 18. P. 332–345.
7. Lindermeir W., Graeb H., Antreich K. Analogue testing by characteristic observation inference // IEEE Trans. Computer-aided design. 1999. Vol. 18. P. 1353–1368.
8. Chao C., Lin H., Milor L. Optimal testing of VLSI analogue circuits // IEEE Trans. Computer-aided design. 1997. Vol. 16. P. 58–77.
9. Мироновский Л. А., Егоров А. Н. Использование нулей динамических систем в задачах технической диагностики // Электронное моделирование. 1996. № 6. С. 34–42.
10. Архангельский О. И., Мироновский Л. А. Диагностирование динамических систем с помощью операторных норм // Электронное моделирование. 1995. № 5. С. 40–49.

УДК 339.1

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ

В. А. Артюхина,

аспирант

В. Н. Ефанов,

доктор техн. наук, профессор

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассматривается роль информационных технологий в задаче анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений на примере предприятий российского авиапромышленного комплекса. Предлагается методика построения экономико-математической модели корпоративного объединения.

Ключевые слова — информационная технология, экономико-математическая модель, корпорация, идентификация, ортогональный ряд.

Введение

За последнее десятилетие основная часть предприятий авиаприборостроительного профиля Российской Федерации претерпела ряд существенных изменений, главные из которых обусловлены созданием крупных корпоративных структур. В результате были сформированы три корпорации: ОАО «Концерн «Авионика», ОАО «Авиаприбор-холдинг», ОАО «Корпорация «Аэрокосмическое оборудование». Подобные интеграционные процессы связаны, в первую очередь, с необходимостью осуществлять масштабные проекты по модернизации российской авиации, а также с усложнением выпускаемой продукции, основанной на современных наукоемких технологиях. Использование таких технологий требует значительных первоначальных затрат, влекущих концентрацию производственных ресурсов. В настоящее время отмеченная тенденция получила дальнейшее развитие, в результате чего на базе перечисленных корпораций формируется единый «Концерн «Авиаприборостроение».

Вместе с тем позитивный экономический эффект от создания корпоративных объединений может быть утрачен из-за немотивированных или некорректно мотивированных устремлений

к консолидации. Зарубежный и отечественный опыт показывает, что объединение предприятий на корпоративных принципах нуждается в грамотной подготовке и компетентном исполнении. В связи с этим особую актуальность приобретает задача анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния предприятий в рамках возможных вариантов корпоративных объединений [1]. Экономическая сущность этой задачи заключается в выборе из числа допустимых или возможных корпоративных схем такой, которая обеспечивает наилучшие значения финансово-экономических результатов и показателей финансово-экономического состояния для всех участвующих субъектов корпорации.

Подобные задачи относятся к категории сложных задач системного анализа, что обуславливается:

— высокой ответственностью, связанной с сильным воздействием на предприятие и его структурные подразделения: немотивированные мероприятия в процессе формирования корпоративной структуры способны не просто ухудшить показатели их деятельности, но и вывести за пределы допустимых состояний, например разорить предприятие или привести к неисполнению заявленных обязательств;

— множественностью показателей состояния и критериев эффективности, вызванной многоаспектным характером трактовки финансово-экономического состояния различных субъектов корпорации, которое оценивается большим числом показателей экономической и технической эффективности, социально-психологическими и социально-политическими показателями, а также показателями экологической безопасности;

— большим числом управленческих решений, которые могут относиться к прерогативе разных лиц, принимающих решение в процессе реформирования различных служб, разных подразделений и уровней управления;

— нетривиальностью связей управленческих решений с показателями состояния, поскольку эти связи, как правило, являются динамическими, перекрестными и стохастическими;

— ограниченностью времени на подготовку, а также проработку и санкционирование решений со стороны ЛПР;

— инерционностью проявления последствий реализуемых управленческих решений и, как следствие этого, невозможностью оперативно парировать нежелательные тенденции после их возникновения и проявления.

С учетом изложенного представляется необходимым разработать специальные информационные технологии, способные эффективно поддерживать управленческую деятельность при решении задач анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений. При этом основное внимание мы будем уделять совокупности методов подготовки управленческих решений, включая математическое и программное обеспечение для организации компьютерной обработки информации по заданным алгоритмам в целях разработки экономико-математической модели корпорации.

Принципы формирования экономико-математической модели корпоративного объединения

Для построения экономико-математической модели корпоративного объединения (ЭММ КО) необходим комплекс исходных данных, которые характеризуют текущее состояние предприятий и задают их начальное состояние, а также являются прогностическими параметрами при оценке финансово-экономических результатов осуществления предприятиями их производственно-хозяйственной деятельности. Проектирование информационного обеспечения ЭММ КО предусматривает:

— задание номенклатуры используемой информации, включая требования к качеству этих

данных по достоверности, оперативности и полноте;

— определение источников получения информации;

— определение характера поставок информационных ресурсов;

— некоторые специальные условия, в частности, связанные с охраной персональных данных, ограничениями по конфиденциальности, ограничениями по применению и т. д.

Качество информационного обеспечения во многом определяет достижимый уровень эффективности ЭММ КО и качество принимаемых на ее основе управленческих решений, поскольку неполнота, недостаточность и запаздывание исходных данных делают модель неадекватной поставленной управленческой задаче. Уровень качества информационного обеспечения зависит от следующих факторов:

— состава исходных данных, который подразумевает перечень сведений, необходимых для организации управления;

— формы представления исходных данных, задающей степень их подробности, способ компоновки и некоторые специальные свойства;

— периодичности представления либо обновления исходных данных;

— продолжительности и других условий хранения поступившей информации;

— достоверности или неопределенности используемых исходных данных;

— затрат на создание и поддержание информационной инфраструктуры;

— первичных источников информации в виде юридических или должностных лиц и отчетно-учетной, плановой документации и материалов технико-экономических обоснований, экспертиз и т. д.

Исходные данные задаются с учетом примененной организационно-экономической схемы корпоративного объединения и производных внутрикорпоративных финансово-экономических регламентов, тем самым отражая внутрикорпоративные финансово-экономические связи предприятий — членов этой структуры.

Обоснуем состав используемых для построения ЭММ КО исходных данных. Формализация этой задачи предполагает назначение показателей состояния как количественных характеристик, оценивающих степень достижения объектом управления желаемого состояния. Далее необходимо определить состав управляющих воздействий как способ формализации управленческой задачи. Наконец, требуется сформировать совокупность выходных переменных, на основе которых формируется суждение о фактическом удалении объекта управления от желаемого со-

стояния. Введение выходных переменных в дополнение к показателям состояния обусловлено стремлением сформировать комплексную оценку состояния объекта управления. В частном случае выходные переменные могут быть тождественны показателям состояния.

При формировании множества показателей состояния всегда возникает противоречие между стремлением учесть максимальное число показателей для исчерпывающей оценки состояния объекта управления и стремлением минимизировать их число, чтобы сделать модель пригодной для практического применения. В связи с этим выбор этого множества зависит от конкретной управленческой задачи. К числу исходных данных, на основе которых можно сформировать множества показателей состояния, относятся:

- чистый дисконтированный доход предприятия;
- чистая прибыль — это частный случай предыдущего показателя, который часто применяется на практике;
- валовая прибыль;
- рентабельность продаж;
- баланс денежных потоков (баланс наличности на конец финансового периода);
- абсолютные размеры потребных кредитных заимствований предприятия, определяющие зависимость предприятия от кредитно-финансовых учреждений и соответствующую категорию финансовых рисков;
- суммарные налоговые отчисления в консолидированный бюджет и внебюджетные фонды за календарный период;
- федеральные налоги;
- местные налоги;
- величина оборотных средств за календарный период;
- величина ожидаемого непредотвращенного ущерба вследствие возникновения форсмажорных обстоятельств, стихийного бедствия и т. д.;
- численность обеспеченных рабочих мест;
- среднесписочная численность персонала предприятия за календарный период;
- абсолютная величина заработной платы работающего на предприятии в пересчете на среднесписочную численность персонала предприятия за календарный период и т. д.

В настоящее время разработано и применяется значительное число экономико-математических моделей, которые различаются по объему используемой исходной информации, по детальности отслеживания внутренних закономерностей, по общим схемам представления внутренней динамики объектов управления, по требованиям к пользовательским характеристикам, по применяемому аппарату модельной иденти-

фикации, по сфере применения, по универсальности, по сложности и по целому ряду других показателей. В данной работе предлагается универсальная, аналитическая, многофакторная модель, обеспечивающая детерминированную оценку состояния исследуемого объекта на основе ретроспективного анализа его показателей состояния.

Считаем, что связи между показателями состояния, управляющими воздействиями и выходными переменными каждого предприятия, входящего в состав корпорации, описываются совокупностью разностных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k+1) &= \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i(k); \\ \mathbf{y}_i(k) &= \mathbf{C}_i \mathbf{x}_i(k), \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i(k)$, $\mathbf{v}_i(k)$, $\mathbf{y}_i(k)$ — соответственно векторы переменных состояния, управляющих воздействий (локальные управляющие воздействия со стороны менеджмента данного предприятия) и выходных координат.

Целостность корпорации обусловлена наличием внутрисистемных взаимодействий между предприятиями, которые подчиняются следующим уравнениям связи:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i(k) &= \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_{ij} \mathbf{y}_j(k) + \mathbf{K}_i \mathbf{g}(k); \quad i = 1, 2, \dots, N; \\ \mathbf{y}(k) &= \sum_{i=1}^N \mathbf{L}_i \mathbf{y}_i(k), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{g}(k)$ — вектор управляющих воздействий со стороны управляющей компании корпорации; $\mathbf{y}(k)$ — вектор обобщенных выходных координат всей корпорации.

Матрицы \mathbf{K}_i , \mathbf{L}_i характеризуют взаимосвязь i -го предприятия с управляющей компанией корпорации. Матрицы \mathbf{F}_{ij} описывают связи между предприятиями в составе корпорации.

Объединяя уравнения (1) и (2), сформируем модель корпорации в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \mathbf{g}(k); \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{x}(k)$ — прямая сумма векторов $\mathbf{x}_i(k)$; $\mathbf{A} = \mathbf{A}_D + \mathbf{B}_D \mathbf{F} \mathbf{C}$; $\mathbf{B} = \mathbf{B}_D \mathbf{K}$; $\mathbf{C} = \mathbf{L} \mathbf{C}_D$; здесь $\mathbf{A}_D = \text{block diag} \{ \mathbf{A}_i \}_{N \times N}$; $\mathbf{B}_D = \text{block diag} \{ \mathbf{B}_i \}_{N \times N}$; $\mathbf{C}_D = \text{block diag} \{ \mathbf{C}_i \}_{N \times N}$; $\mathbf{F} = \| \mathbf{F}_{ij} \|_{N \times N}$; $\mathbf{K} = \| \mathbf{K}_i \|_{N \times 1}$; $\mathbf{L} = \| \mathbf{L}_i \|_{1 \times N}$ — блочные матрицы.

Параметры приведенной модели должны отражать нетривиальность связей управленческих решений с переменными состояния, а последних — с выходными переменными корпорации.

В первую очередь это касается требований к полноте и достоверности исходных данных, а также корректности первичной обработки этих данных в целях получения адекватных аналитических зависимостей. Для этого рассмотрим процедуру идентификации параметров ЭММ КО на основе показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятий, представленных соответствующими временными рядами.

Алгоритм идентификации параметров ЭММ с использованием дискретных ортогональных функций

Под идентификацией обычно понимают определение параметров объекта управления по результатам измерений его входных и выходных сигналов [2]. В настоящее время известно значительное количество разнообразных алгоритмов идентификации. Многочисленность и разнообразие настраиваемых моделей, критериев и алгоритмов, естественно, затрудняет решение конкретных задач идентификации. Это обстоятельство вызвало к жизни специальные работы по экспериментальному исследованию и сравнению алгоритмов идентификации для типовых задач. К сожалению, результаты этих работ, кроме констатации отдельных фактов, не позволяют установить какие-либо общие закономерности за исключением той, что задача идентификации является обратной по отношению к задаче управления и как любая обратная задача динамики является некорректной. Одно из наиболее существенных следствий некорректности задач идентификации — возможность получения негрубых решений, когда малая вариация параметров исходных данных приводит к существенному изменению параметров модели. С учетом высокой степени неопределенности исходных данных проблема корректности задачи идентификации приобретает решающее значение. В связи с этим для регуляризации задачи идентификации параметров ЭММ КО воспользуемся методом, основанным на разложении динамических характеристик системы в ортогональные ряды по совокупности экспоненциальных функций [3]. В данном разделе рассматриваются вопросы построения ортогональной системы на основе экспоненциальных функций, исследования алгебраических свойств построенной ортогональной системы и оценки сходимости ортогональных рядов при заданном характере временных рядов для показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятий. Условие равномерной сходимости исследуемых рядов служит базой для построения в дальнейшем корректных алгоритмов идентификации параметров ЭММ КО.

В качестве исходной совокупности функций при построении ортогональной системы выбираем линейно независимые функции экспоненциального вида с кратными вещественными показателями:

$$\psi_i(kT_0) = \exp(-(i-1)\beta kT_0), \quad \beta > 0; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где T_0 — период дискретизации.

Данная совокупность является полной на множестве функций, интегрируемых с квадратом в интервале $[0, +\infty)$. Это свойство следует непосредственно из теоремы Фейера. Кроме того, любая линейная комбинация указанных экспонент представляет собой ограниченную функцию, имеющую монотонный или слабоколебательный характер. Но $\psi_i(kT_0)$, $i = 1, 2, \dots$ не образуют совокупность ортогональных функций. Чтобы получить на их основе множество ортогональных функций, воспользуемся процедурой ортогонализации, причем для расширения множества аппроксимируемых функций осуществим ортогонализацию с весом $h(kT_0) = (1 - \exp(-\alpha T_0)) \exp(-\alpha kT_0)$, $\alpha \geq 0$. Введенная функция веса обладает следующим свойством:

$$\sum_{k=0}^{\infty} h(kT_0) = 1. \quad (5)$$

Ортогональные функции будем искать в следующем виде:

$$\varphi_l(kT_0) = \sum_{i=1}^l \lambda_{li}^* \psi_i(kT_0), \quad l = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где λ_{li}^* — коэффициенты ортогональных многочленов, причем при $l = i$ $\lambda_{li}^* = 1$, а при $l \neq i$ коэффициенты λ_{li}^* определяются из условия ортогональности функций $\varphi_l(kT_0)$

$$\lambda_{r+1; i}^* = \frac{-\sum_{j=i+1}^{r+1} \lambda_{r+1, j}^* \sum_{m=1}^i \lambda_{i, m}^*}{\left(1 - \exp(-(\alpha + (j+m-2)\beta)T_0)\right)} \quad (7)$$

$$\frac{\sum_{m=1}^i \lambda_{i, m}^*}{\left(1 - \exp(-(\alpha + (i+m-2)\beta)T_0)\right)},$$

$i = r, r-1, \dots, 1; \quad r = 1, 2, \dots$

Докажем свойство равномерной сходимости ортогональных рядов, построенных на базе ортогональных функций (6). Для доказательства данного утверждения воспользуемся непрерывными огибающими соответствующих дискретных функций: аппроксимируемых $f(t) \leftrightarrow f(kT_0)$ и аппроксимирующих ортогональных функций. Кроме

того, для удобства последующего изложения осуществим замену переменной $z = \exp(-\beta t)$. В результате получаем семейство ортогональных полиномов

$$P_l(z) = \sum_{k=1}^l \lambda_{ik} z^{k-1} \quad (8)$$

с функцией веса $q(z) = z^\sigma$, где $\sigma = (\alpha - \beta)/\beta$. Этот ряд сходится к заданной функции $F(z)$ в некоторой точке $z \in [0; 1]$, если вспомогательная функция $\Phi(z, y) = (F(z) - F(y))/(z - y)$ имеет в этой точке r непрерывных производных по z и $\Phi_z^{(r)}(z, y)$ удовлетворяет условию Липшица порядка $0 < \gamma \leq 1$, причем $r + y > \max\{0,5; \sigma + 0,5\}$. В самом деле, как показано в работе [4]:

$$F(z) - \sum_{l=1}^q a_l P_l(z) = v_q [a_q (\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) - a_{q+1} (\Phi(z, y)) P_q(z)],$$

где $v_q = \frac{(q(\sigma+q)\sqrt{\sigma+2q-1})}{((\sigma+2q-1)(\sigma+2q)\sqrt{\sigma+2q+1})}$ — отношение

коэффициентов при старших степенях z полиномов $P_{q+1}(z)$ и $P_q(z)$; $a_q(\Phi(z, y))$ — коэффициенты разложения в ряд Фурье по переменной y функции $\Phi(z, y)$.

В силу выдвинутых предположений о свойствах функции $\Phi(z, y)$ скорость убывания коэффициентов $a_q(\Phi(z, y))$ подчиняется условию $a_q(\Phi(z, y)) < C_0/q^{q+\sigma}$, где C_0 — постоянная, не зависящая от q . Покажем также, что максимум абсолютного значения полинома $P_{l+1}(z)$ на интервале $[0; 1]$ достигается на одном из концов этого интервала. Для этого рассмотрим вспомогательную функцию

$$V(z) = \frac{(P_{l+1}(z))^2 + z(1-z)(P'_{l+1}(z))^2}{l(\sigma+l+1)}.$$

Вычислим производную этой функции

$$V'(z) = \frac{P'_{l+1}(z)}{l(\sigma+l+1)} [2l(\sigma+l+1)P_{l+1}(z) + (1-2z)P'_{l+1}(z) + z(1-z)P''_{l+1}(z)].$$

Поскольку весовая функция ортогональных полиномов (6) удовлетворяет дифференциальному уравнению Пирсона [4], то для этих полиномов справедливо соотношение

$$(z-z^2)P''_{l+1}(z) + [(\sigma+1) - (\sigma+2)z]P'_{l+1}(z) + l(\sigma+l+1)P_{l+1}(z) = 0.$$

Тем самым производную $V'(z)$ можно представить следующим образом:

$$V'(z) = \frac{P'_{l+1}(z)}{l(\sigma+l+1)} \times [(1-2z)P'_{l+1}(z) - ((\sigma+1) - 2(\sigma+2)z)P'_{l+1}(z)] = \frac{(P'_{l+1}(z))^2 (2\sigma+2)[z-\chi]}{l(\sigma+l+1)},$$

где $\chi = (2\sigma+1)/(2\sigma+2)$.

Производная $V'(z)$ меняет знак на интервале $[0; 1]$, если $0 \leq \chi \leq 1$. Эти неравенства выполняются при $\sigma \geq -0,5$, если $2\sigma+2 > 0$, и при $\sigma \leq -1$, если $2\sigma+2 < 0$. Случай $\sigma \leq -1$ соответствует отрицательным значениям одной из величин α или β и поэтому в дальнейшем рассматриваться не будет. Следовательно, при $\sigma \geq -0,5$ и $z \leq \chi$ производная $V'(z)$ принимает неположительные значения, т. е. в этом диапазоне значений z функция $V(z)$ не возрастает. Аналогично при $\sigma \geq -0,5$ и $z \geq \chi$ производная $V'(z)$ принимает неотрицательные значения и $V(z)$ не убывает.

Таким образом, $V(0) \geq V(z)$ при $z \in [0; \chi]$; $V(1) \geq V(z)$ при $z \in [\chi; 1]$. Поскольку $P_{l+1}^2(z) \leq V(z)$ и, кроме того, $P_{l+1}^2(0) = V(0)$, $P_{l+1}^2(1) = V(1)$, получаем $|P_{l+1}(z)| \leq |P_{l+1}(0)|$ при $z \in [0; \chi]$; $|P_{l+1}(z)| \leq |P_{l+1}(1)|$ при $z \in [\chi; 1]$.

Рассмотрим далее случай, когда $\chi > 1$ или $\chi < 0$. Первое неравенство соответствует условию $\sigma < -1$, второе выполняется при $-1 < \sigma \leq -0,5$. Значит, при выполнении последних неравенств функция $V(z)$ не убывает на всем интервале $z \in [0; 1]$ и, следовательно, $|P_{l+1}(z)| \leq |P_{l+1}(1)|$.

Вычислим теперь значения рассматриваемых ортогональных полиномов на концах интервала ортогональности. Для этого воспользуемся формулой Лейбница

$$P_{l+1}(z) = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} \times z^{-\sigma} [z^{\sigma+1} (1-z)^l]^{(l)} = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} \times \sum_{k=0}^l C_l^k z^{-\sigma} (z^{\sigma+1})^{(k)} ((1-z)^l)^{(l-k)} = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} \times \sum_{k=0}^l \frac{(-1)^{l-k} l! \Gamma(\sigma+l+1) \Gamma(l+1)}{k! (l-k)! \Gamma(\sigma+l-k+1) \Gamma(k+1)} z^{l-k} (1-z)^k.$$

Следовательно:

$$P_{l+1}(0) = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1} \Gamma(\sigma+l+1)}{l! \Gamma(\sigma+1)};$$

$$P_{l+1}(1) = \sqrt{2\sigma+l+1} \text{ или}$$

$$|P_{q+1}(z)| \leq \sqrt{\sigma+2q+1} \leq \frac{\sqrt{\sigma+2q+1} \Gamma(\sigma+q+1)}{q! \Gamma(\sigma+1)}$$

при $\sigma \geq 0$;

$$|P_{q+1}(z)| \leq \frac{\sqrt{\sigma+2q+1}\Gamma(\sigma+q+1)}{q!\Gamma(\sigma+1)} \leq \sqrt{\sigma+2q+1}$$

при $\sigma \geq 0; z \in [0; 1]$.

Используя свойства гамма-функции при $q \rightarrow \infty$

$$\frac{\Gamma(\sigma+q+1)}{q!} = \frac{\Gamma(\sigma+q+1)}{\Gamma(q+1)} \leq (q+1)^\sigma,$$

получаем при $\sigma \geq 0$

$$\begin{aligned} & \lim_{q \rightarrow \infty} v_q a_q (\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) = \\ & = \lim_{q \rightarrow \infty} \left(q(\sigma+q) \sqrt{\sigma+2q-1} C_0 \sqrt{\sigma+2q+1} (q+1)^\sigma \right) / \\ & / \left((\sigma+2q-1)(\sigma+2q) \sqrt{\sigma+2q+1} q^{r+\sigma} \Gamma(\sigma+1) \right) = 0, \end{aligned}$$

если $r + \gamma > \sigma + 0,5$;

аналогично при $\sigma \leq 0$

$$\begin{aligned} & \lim_{q \rightarrow \infty} v_q a_q (\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) = \\ & = \lim_{q \rightarrow \infty} \left(q(\sigma+q) \sqrt{\sigma+2q-1} C_0 \sqrt{\sigma+2q+1} \right) / \\ & / \left((\sigma+2q-1)(\sigma+2q) \sqrt{\sigma+2q+1} q^{r+\sigma} \right) = 0, \end{aligned}$$

если $r + \gamma > 0,5$.

Этим завершается доказательство утверждения о равномерной сходимости рядов.

При расчете параметров ЭММ (1) предприятий корпорации воспользуемся методом площадей, который характеризуется высокой точностью и устойчивостью по отношению к погрешностям вычислений. Суть этого метода сводится к следующему. На основе показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятий, представленных соответствующими временными рядами $y_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), формируем суммы, эквивалентные площадям, ограниченным этими кривыми. Эти площади на некотором интервале наблюдения $0 \leq k \leq n$ могут быть приближенно вычислены по методу трапеции

$$S_i^{[0,n]} = \left[\frac{y_i(0) + y_i(n)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} y_i(k) \right] T_0. \quad (9)$$

С другой стороны, эти площади могут быть получены на основе аппроксимации показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятий временными рядами по совокупности ортогональных функций (6)

$$y_i(k) = \sum_{l=1}^q Q_l^{(i)} \varphi_l(kT_0), \quad (10)$$

где $Q_l^{(i)}$ — векторы ортогональных коэффициентов; q — число членов ортогонального ряда.

Тогда

$$\begin{aligned} \hat{S}_i^{[0,n]} &= \sum_{l=1}^q Q_l^{(i)} \left[\frac{\varphi_l(0) + \varphi_l(nT_0)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \varphi_l(kT_0) \right] T_0 = \\ &= \sum_{l=1}^q \sum_{r=1}^q Q_l^{(i)} \lambda_{lr} \left[\frac{\psi_r(0) + \psi_r(nT_0)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \psi_r(kT_0) \right] T_0 = \\ &= \sum_{l=1}^q \sum_{r=1}^q Q_l^{(i)} \lambda_{lr} \Theta_r^n T_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\Theta_r^n = \frac{(1 + \exp(-(r-1)\beta T_0))}{2(1 - \exp(-(r-1)\beta T_0))} (1 - \exp(-(r-1)\beta nT_0))$$

при $r \neq 1$

и

$$\Theta_r^n = n \text{ при } r = 1.$$

Чтобы установить взаимосвязь ортогональных коэффициентов в (10) с искомыми параметрами ЭММ предприятий (1), представим оставшиеся переменные величины этих моделей соответствующими ортогональными рядами

$$x_i(k) = \sum_{l=1}^q g_{il} \varphi_l(kT_0); \quad x_i(k+1) = \sum_{l=1}^q g_{il}^* \varphi_l(kT_0);$$

$$u_i(kT_0) = \sum_{l=1}^q g_{il} \varphi_l(kT_0) \quad (12)$$

или в матричной форме

$$\begin{aligned} x_i(k) &= G_i \Phi(kT_0); \quad x_i(k+1) = G_i^* \Phi(kT_0); \\ u_i(kT_0) &= \Xi_i \Phi(kT_0). \end{aligned} \quad (13)$$

Введя новое обозначение

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=0}^{\infty} x_i(k) e^{-(\alpha+\beta(j-1))kT_0},$$

ортогональные коэффициенты в (12) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} g_{il} &= \sum_{j=1}^l h_0 \lambda_{lj} \gamma_{ij}; \\ g_{il}^* &= \sum_{j=1}^l h_0 \lambda_{lj} e^{(\alpha+\beta(j-1))T_0} (\gamma_{ij} - x_i(0)), \end{aligned} \quad (14)$$

где $h_0 = 1 - e^{-\alpha T_0}$.

В матричной форме записи (14) принимают вид

$$G_i = h_0 \Gamma_i \Lambda^T; \quad G_i^* = h_0 (\Gamma_i - F_{i0}) \Pi \Lambda^T, \quad (15)$$

где $\Gamma = \|\gamma_{ij}\|_{p_i \times q}$; $\Lambda = \|\lambda_{lj}\|_{q \times q}$; $\Pi = \text{diag} \left\{ e^{\alpha T_0}; e^{(\alpha+\beta)T_0}; \dots; e^{(\alpha+(q-1)\beta)T_0} \right\}$; $F = \|F_{0ij}\|_{p_i \times q}$; $F_{0ij} = x_i(0)$, $i = 1, 2, \dots, p_i$, $j = 1, 2, \dots, q$, $p_i = \dim x_i(k)$.

Тогда (13) с учетом (15) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k) &= h_0 \Gamma_i \Lambda^T \Phi(kT_0); \\ \mathbf{x}_i(k+1) &= h_0 (\Gamma_i - \mathbf{F}_{i0}) \Pi \Lambda^T \Phi(kT_0); \\ \mathbf{u}_i(k) &= \Xi_i \Phi(kT_0). \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в исходные ЭММ (1) и приравнявая коэффициенты при одинаковых ортогональных функциях $\Phi(kT_0)$, получаем матричное уравнение относительно вспомогательной матрицы Γ_i

$$h_0 (\Gamma_i - \mathbf{F}_{i0}) \Pi \Lambda^T = \mathbf{A}_i h_0 \Gamma_i \Lambda^T + \mathbf{B}_i \Xi_i. \quad (16)$$

Аналитическое решение этой системы относительно прямой суммы строк матрицы Γ_i имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}_i &= \left\{ \left[\mathbf{I}_{p_i} \otimes (h_0 \Pi \Lambda^T)^T \right] - \right. \\ &\left. - (\mathbf{I}_{p_i} \otimes \Lambda)(h_0 \mathbf{A}_i \otimes \mathbf{I}_q) \right\}^{-1} \tilde{\Omega}_i. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь $\tilde{\Omega}_i = h_0 \mathbf{F}_{i0} \Pi \Lambda^T + \mathbf{B}_i \Xi_i$; \mathbf{I}_{p_i} , \mathbf{I}_q — единичные матрицы соответствующих размерностей; \otimes — матрица (кронекерово) произведение матриц.

В результате для (11) будет справедливым равенство

$$\hat{\mathbf{S}}_i^{[0, n]} = \mathbf{Q}_i \Lambda \Theta_n T, \quad (18)$$

где $\mathbf{Q}_i = h_0 \mathbf{C}_i \Gamma_i \Lambda^T$; $\Theta_n = \left\| \Theta_r^n \right\|_{q \times 1}$.

Используя отчетные показатели, характеризующие финансово-экономическую деятельность предприятий, входящих в исследуемую корпорацию, сформируем матрицы $\mathbf{S}_i^{[T]} = \left\| \mathbf{S}_i^{[0, n_1]}; \mathbf{S}_i^{[0, n_2]}; \dots; \mathbf{S}_i^{[0, n_s]} \right\|_{1 \times s}$ и матрицу $\Theta^{[T]} = \left\| \Theta_{n_1}; \Theta_{n_2}; \dots; \Theta_{n_s} \right\|_{1 \times s}$,

получаем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно искомым параметров \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i , \mathbf{C}_i

$$\mathbf{Q}_i \Lambda \Theta^{[T]} T_0 = \mathbf{S}_i^{[T]}. \quad (19)$$

Решение этой системы завершает процедуру идентификации параметров ЭММ.

Программная реализация процедуры построения ЭММ КО

Изложенные принципы и алгоритмы построения ЭММ КО были реализованы в виде программной системы (рис. 1). В структуре программной системы можно выделить два основных блока: интерфейсный и аналитический. Интерфейсный

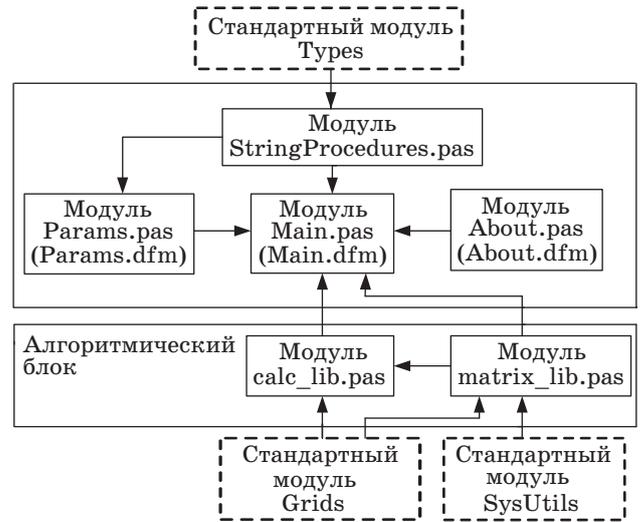


Рис. 1. Структура программной системы

блок обеспечивает взаимодействие пользователя с программой, а также взаимодействие между основными органами управления и элементами алгоритмического блока.

Интерфейсный блок включает модули *Main.pas*, *Params.pas* и *About.pas*, которые представляют собой программные части описания оконных форм, а также модуль *StringProcedures.pas*, который является вспомогательной библиотекой, содержащей функции работы со строками.

Модуль *Main.pas* является модулем главной оконной формы. В его задачи входит реализация диалогового режима. Как следует из рис. 2, для организации диалогового режима используются следующие органы управления: область ввода данных статистической отчетности 1, области вывода текущего состояния матриц **A**, **B** и **C** — 2, 3 и 4 соответственно, индикаторы состояния этих матриц 5, 6 и 7, строка меню 8, строка вывода информации о текущем этапе идентификации 9, ли-

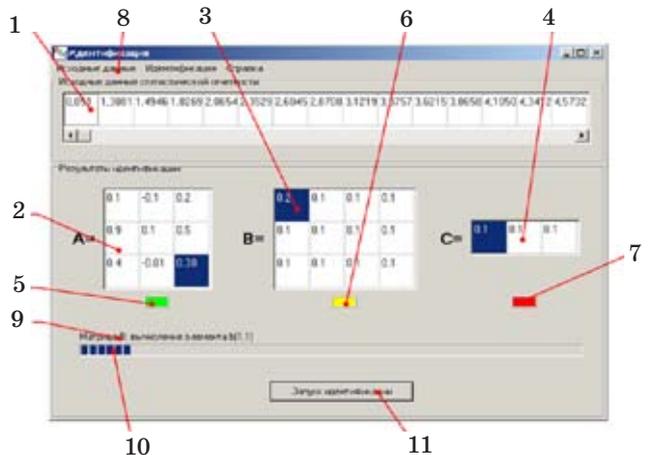


Рис. 2. Внешний вид основной формы программы

нейка отображения прогресса выполнения алгоритма идентификации 10, кнопка запуска алгоритма идентификации 11.

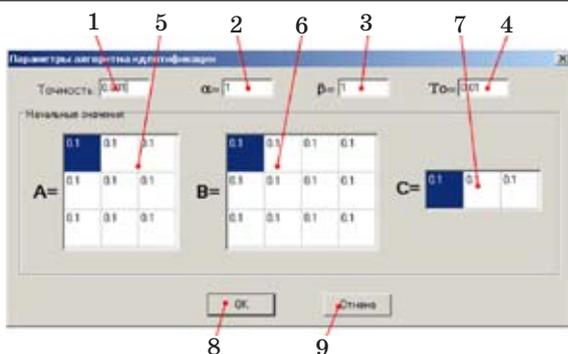
Область 1 позволяет осуществлять ввод данных статистической отчетности как вручную, так и из файла (используя пункт меню «Исходные данные»/«Загрузить»). При этом предполагается, что формат файла представляет собой числа, разделенные разрывами строки.

Строка меню 8 содержит основные команды, необходимые для работы с программой: очистка области ввода отчетности, заполнение области ввода данными из файла, вызов окна задания параметров идентификации, запуск процедуры идентификации, вызов окна сведений о программе.

Кнопка запуска идентификации 11 инициирует вычислительный процесс, в результате завершения которого находятся искомые матрицы. После завершения работы алгоритма идентификации над кнопкой 11 появляется опция «Скопировать результаты в буфер обмена». Ее функция — дать возможность пользователю перенести результаты идентификации в другие приложения (MathCAD, MatLab, Microsoft Excel и др.).

Params.pas является модулем оконной формы, предназначенной для задания параметров идентификации (рис. 3). В качестве параметров используются: начальные значения элементов матриц **A**, **B** и **C**; величины, необходимые для построения ортогонального ряда (α , β и T_0); необходимая точность идентификации матриц модели. Для задания этих параметров используются следующие окна органов управления: область ввода требуемой точности вычисления искомых параметров модели 1; области ввода величин, необходимых для генерации ортогонального ряда 2–4; области ввода начальных значений элементов матриц **A**, **B** или **C** 5–7; кнопка подтверждения выполненных изменений 8; кнопка отказа от выполненных изменений 9.

В основе всех вычислений, реализуемых в модулях алгоритмического блока, лежат матричные операции, включая операции кронекерова



■ Рис. 3. Внешний вид формы задания параметров алгоритма идентификации

умножения и прямого суммирования строк и столбцов. В связи с этим был разработан специальный модуль (*matrix_lib.pas*). Этот модуль позволяет создавать матрицы произвольных размерностей и выполнять над ними соответствующие операции.

Для иллюстрации предложенного подхода построим экономико-математическую модель корпоративного объединения ОАО «Концерн «Авионика».

Разрабатываемая ЭММ основывается на данных о хозяйственной деятельности дочерних предприятий ОАО «Концерн «Авионика» (ОАО «Раменский приборостроительный завод», ОАО НПК «Элара», ОАО «Техприбор»), предоставленных в годовых отчетах указанной корпорации за 2005–2009 гг. [5].

Исходя из имеющихся данных, выбираем в качестве переменных состояния следующие показатели: выручка от продаж $x_{i1}(k)$, чистая прибыль $x_{i2}(k)$ и рентабельность продаж $x_{i3}(k)$. В качестве управляющих воздействий выбираем объем инвестиций, привлеченных менеджментом соответствующего предприятия корпорации. Поскольку данные о фактическом объеме этих средств отсутствуют, то в процедуре идентификации будем использовать стандартное единичное управляющее воздействие. При этом фактический эффект от такого управляющего воздействия на результаты хозяйственной деятельности обществ будет выражаться в численных значениях матриц **B_i**. Наконец, в качестве выходных координат выбираем: $y_{i1}(k) = x_{i1}(k)$ — выручку от продаж, $y_{i2}(k) = x_{i2}(k)$ — рентабельность продаж. В результате уравнения наблюдения для каждой компании будут иметь одинаковый вид

$$\begin{bmatrix} y_{i1}(k) \\ y_{i2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1}(k) \\ x_{i2}(k) \\ x_{i3}(k) \end{bmatrix}$$

Используя показатели производственно-хозяйственной деятельности предприятий за 2005–2008 гг., получим следующие численные значения матриц **A_i** и **B_i** для соответствующих предприятий.

ОАО «РПЗ»:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1,2554 & 8,4893 & -38,7326 \\ -0,1042 & -2,2985 & 20,6501 \\ 0,0014 & 0,0167 & 0,7269 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} -602,34 \\ 149,68 \\ -1,41 \end{bmatrix};$$

ОАО НПК «Элара»:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0,8313 & -4,8887 & 170,5398 \\ -4,5103 & 22,3662 & 1040,1542 \\ 0,1027 & -0,5139 & -22,0718 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} -629,36 \\ 151,73 \\ -7,04 \end{bmatrix};$$

■ Таблица 1. Результаты хозяйственной деятельности обществ ОАО «Концерн «Авионика»

Наименование ОАО	Выручка от продаж, млн руб.				
	2005	2006	2007	2008	2009
РПЗ	1344,5	1578,4	1899,2	1929,3	1849,5
Элара	1529,3	2299,2	3218,3	3240,5	2710,7
Техприбор	774,8	1084,0	1252,5	1258,9	1111,9
	Чистая прибыль, млн руб.				
РПЗ	63,3	59,2	11,2	69,5	68,5
Элара	13,0	50,1	215,8	192,5	153,1
Техприбор	101,3	124,1	397,4	130,5	129,7
	Рентабельность продаж, %				
РПЗ	16,7	15,1	14,2	13,2	12,1
Элара	6,4	9,1	9,5	9,9	9,0
Техприбор	18,7	15,8	15,4	15,8	17,3

ОАО «Техприбор»:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0,8240 & -0,4462 & 26,2441 \\ 0,8166 & -1,5079 & -19,0297 \\ 0,0048 & -0,0006 & 0,6480 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} -332,17 \\ -389,43 \\ -1,13 \end{bmatrix}.$$

Для проверки эффективности предложенной процедуры идентификации рассчитаем с помощью полученных моделей показатели производственно-хозяйственной деятельности предприятий для 2009 г.:

$$x_1(2009) = \begin{bmatrix} 1898,44 \\ 61,48 \\ 12,05 \end{bmatrix}; x_2(2009) = \begin{bmatrix} 2811,74 \\ 139,14 \\ 8,32 \end{bmatrix};$$

$$x_3(2009) = \begin{bmatrix} 1061,59 \\ 141,14 \\ 15,07 \end{bmatrix}.$$

Сопоставляя полученные значения с данными, приведенными в табл. 1, делаем вывод о том, что погрешность не превышает 13 %.

Выберем в качестве обобщенной выходной координаты всей корпорации «Концерн «Авионика» ее рентабельность, тогда можно сформировать модель этой корпорации в виде (3). Параметры полученной таким образом модели сведены в табл. 2.

Заключение

Рассмотрен важный аспект использования информационных технологий при решении задачи анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений, связанный с разработкой ЭММ крупных производственных корпораций. С помощью таких моделей можно объективно оценить эффективность принимаемых управленческих решений в долгосрочной перспективе, провести анализ взаимодействия отдельных структурных подразделений в процессе реализации принятых управленческих решений и своевременно скорректировать стратегию развития предприятия. При этом предлагается использовать специальный аппарат идентификации параметров модели на основе ортогональных рядов экспоненциального вида. Данный подход обеспечивает равномерную сходимость при аппроксимации любых

■ Таблица 2. Параметры экономико-математической модели корпорации ОАО «Концерн «Авионика»

Параметры матрицы А								
2380,50	8,49	-38,73	2590,06	0	0	2041,93	0	0
-591,34	-2,30	20,65	-643,62	0	0	-507,42	0	0
5,57	0,02	0,73	6,06	0	0	4,78	0	0
2485,97	0	0	2707,08	-4,89	170,54	2133,53	0	0
-599,33	0	0	-656,95	22,37	1040,15	-514,36	0	0
27,81	0	0	30,37	-0,51	-22,07	23,87	0	0
1312,07	0	0	1428,33	0	0	1126,88	-0,45	26,25
1538,25	0	0	1674,55	0	0	1320,98	-1,51	-19,03
-4,46	0	0	-4,86	0	0	-3,83	-0,0006	0,65
Параметры матрицы В								
-602,34	149,68	-1,41	-629,36	151,73	-7,04	-332,17	-389,43	1,13
Параметры матрицы С								
3,95	0	0	4,3	0	0	3,39	0	0

кусочно-гладких функций, что регулирует процедуру идентификации. Последнее обстоятельство особенно важно в условиях неполноты и неточности исходной информации, используемой при построении ЭММ.

Разработанная методика построения ЭММ КО реализована в виде программной системы в среде

визуального программирования Delphi 6. Приведенный пример построения ЭММ корпорации «Концерн «Авионика» свидетельствует о высокой степени адекватности результатов расчетов фактическим данным, содержащимся в отчетных показателях производственно-хозяйственной деятельности предприятий корпорации.

Литература

1. Бодрунов С. Д. и др. Проблемы, принципы и методы корпоратизации авиапромышленного комплекса России. — СПб.: Корпорация «Аэрокосмическое оборудование», 2000. — 432 с.
2. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. — 320 с.
3. Ефанов В. Н., Неретина В. В. Регуляризация процедуры синтеза субоптимального управления полетом с использованием ортогонального базиса экс-

поненциального вида // Мехатроника. 2001. № 6. С. 10–15.

4. Суетин П. Н. Классические ортогональные многочлены. — М.: Наука, 1979. — 416 с.
5. Годовой отчет за 2009 год ОАО «Концерн «Авионика». <http://www.e-disclosure.ru/portal/FileLoad.aspx?Fileid=30540&type=file> (дата обращения: 04.08.2010).

Уважаемые коллеги!

Выставочный центр «Казанская ярмарка» приглашает Вас принять участие
в VI международной специализированной выставке
«АВИАКОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ» — КАЗАНЬ-2012
14—17 августа 2012 года

Организаторы

Кабинет министров Республики Татарстан
Министерство промышленности и торговли Республики Татарстан

Экспозиция выставки

Новое в организации выпуска современной авиационной техники
Новые сплавы, материалы и технологии их обработки
Современные средства управления летательными аппаратами
Оборудование для использования в авиакосмических отраслях
Плазменная и магнитноэлектронная техника в системах контроля и индикации
Высокоточное, наукоемкое технологическое оборудование в промышленности
Развитие и применение оптических, металлооптических и электронооптических изделий в системах управления, навигации и технологиях
Оборудование и технологии переработки полимерных материалов, изделия из них
Новое в организации и техническом оснащении сервисного обслуживания авиационной техники в авиакомпаниях

Особенности организации производства и технологии, используемые при квазипоточном выпуске авиационной техники

Охрана труда и техника безопасности

Новое в организации финансового и операционного лизинга, других форм взаимодействия с потребителями продукции

Программа выставки

Научно-практические конференции

Презентации фирм и предприятий участников выставки

Тематические семинары и круглые столы

Экскурсии по историческим местам 1000-летней Казани

Дополнительная информация и справки

420059, Россия, Татарстан, г. Казань, Оренбургский тракт, 8.

ВЦ «Казанская ярмарка».

Тел/факс: +7 (843) 570-51-16.

Горячая линия: +7 (843) 570-51-11.

Эл. адреса: pdv@expokazan.ru,

kazanexpo@telebit.ru

Сайт: <http://www.aktokazan.ru/rus>

УДК 004.043

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ НЕЧЕТКОГО МНОЖЕСТВА УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛАССА УГРОЗ НА ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ

Е. А. Дубинин¹,

соискатель

Ставропольский государственный университет

Предложенная методика построения нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на информационную систему использует мнение экспертов в области информационной безопасности. Каждым экспертом формируются начальные нечеткие множества уровня воздействия определенной угрозы на информационную систему, которые обобщаются в нечеткие множества суммарного воздействия всего класса угроз.

Ключевые слова — угроза, информационная безопасность, информационная система, нечеткое множество, ущерб.

Введение

Настоящая работа посвящена проблеме математического оценивания воздействия различных видов угроз на информационную систему в контексте управления информационными рисками. Известно, что управление информационными рисками представляет собой одно из наиболее актуальных и динамично развивающихся направлений стратегического и оперативного менеджмента в области защиты информации. Его основная задача состоит в объективной идентификации и оценке наиболее значимых для бизнеса информационных рисков компании, а также адекватности используемых средств контроля рисков для увеличения эффективности и рентабельности экономической деятельности компании. Информационный риск представляет собой интегральную оценку того, насколько эффективно существующие средства защиты способны противостоять информационным атакам [1]. Под термином «управление информационными рисками» обычно понимается системный процесс идентификации, контроля и уменьшения информационных рисков компаний в соответствии с определенными ограничениями российской норма-

тивно-правовой базы в области защиты информации и собственной корпоративной политики безопасности. Считается, что качественное управление рисками позволяет использовать оптимальные по эффективности и затратам средства контроля рисков и средства защиты информации, адекватные текущим целям и задачам бизнеса компании [2].

Этап 1: формирование модели угроз, определение взаимосвязи между угрозами и рисками информационной безопасности

Формирование модели угроз информационной безопасности состоит в выборе адекватной решаемой задаче классификации угроз и выделении наиболее распространенных классов из них.

В публикациях [3–5] классификацию угроз выполняют по двум базовым признакам: по действию на характеристики безопасности информации и по природе источника.

По признаку «действие на характеристики безопасности информации» классификация имеет вид:

- 1) угроза конфиденциальности;
- 2) угроза целостности;
- 3) угроза доступности;
- 4) угроза конфиденциальности и целостности;
- 5) угроза конфиденциальности и доступности;
- 6) угроза целостности и доступности;
- 7) угроза конфиденциальности, целостности и доступности.

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, начальник Управления информатизации Ставропольского государственного университета В. В. Копытов.

По признаку «природа источника» классификация угроз имеет вид:

1) объективная (угроза, возникновение которой не зависит от прямой деятельности человека и которая связана с разными стихийными природными явлениями);

2) субъективная (угроза, возникновение которой зависит от деятельности человека).

Основным недостатком этих двух классификаций является зависимость угрозы от ресурса, на который она воздействует, при этом не отражаются возможные альтернативные сценарии развития угрозы.

В настоящей работе предлагается классифицировать угрозы информационной безопасности по признаку «способ распространения»:

1) атаки с использованием вредоносного кода;

2) сетевые атаки;

3) атаки на получение несанкционированного доступа;

4) злоупотребления полномочиями;

5) сбои в работе аппаратуры;

6) кражи и чрезвычайные ситуации;

7) чрезмерное использование систем защиты, ухудшающих работу автоматизированной системы.

Уровень риска информационной безопасности предприятия определяется, как сказано ранее, уровнем ущерба, наносимого предприятию при реализации возможных видов угроз. Уровень ущерба представляет собой качественную характеристику. В табл. 1 приведена качественная шкала уровня ущерба компании.

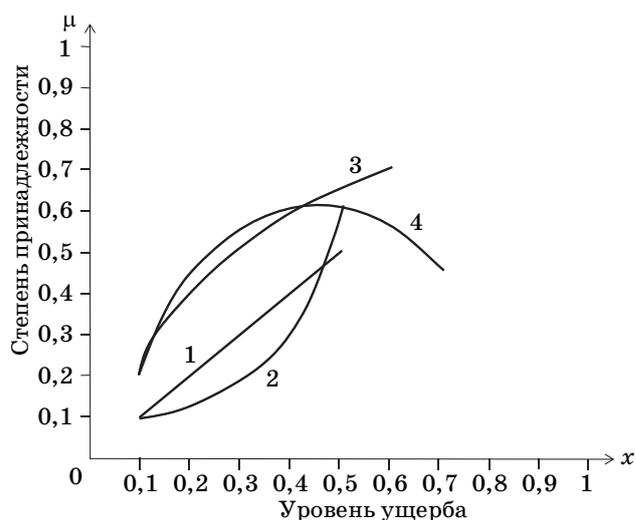
■ Таблица 1. Качественная шкала оценки уровня ущерба

Уровень ущерба	Описание
Малый	Приводит к незначительным потерям материальных активов, которые быстро восстанавливаются, или к незначительному влиянию на репутацию компании
Умеренный	Вызывает заметные потери материальных активов или умеренно влияет на репутацию компании
Средней тяжести	Приводит к существенным потерям материальных активов или значительному урону репутации компании
Большой	Вызывает большие потери материальных активов и наносит большой урон репутации компании
Критический	Приводит к критическим потерям материальных активов или к полной потере репутации компании на рынке, что делает невозможным дальнейшую деятельность организации

В настоящей работе предлагается определять оценки уровня ущерба информационной системе в зависимости от частоты проявления той или иной угрозы. Такая оценка представляется в виде нечеткого множества, у которого носитель — уровень ущерба, функция принадлежности — степень проявления угрозы (частотность).

Этап 2: построение функций принадлежности начальных нечетких множеств уровня ущерба информационной системе

Основным понятием теории нечетких множеств является функция принадлежности. Поэтому определение степеней принадлежности элементов множеству и построение функции принадлежности является основным вопросом практических реализаций независимо от того, к какой предметной области они принадлежат. При решении задач защиты информации, моделирования процессов принятия решений в нечетких условиях и других прикладных задачах можно использовать различные методы формирования функции принадлежности. В работах [6, 7] приведены методы построения функции принадлежности, основной целью которых является формализация и интеграция исходных данных, сформированных экспертом (группой экспертов) в процессе оценивания параметров реальных объектов. Для эффективного решения указанных задач необходимо сделать правильный вы-



■ Рис. 1. Виды функции принадлежности типовых нечетких множеств уровня ущерба информационной системе: 1 — линейно возрастающий тренд (линейный); 2, 3 — нелинейный тренд с монотонным возрастанием (экспоненциальный и логарифмический соответственно); 4 — нелинейный тренд с периодом возрастания и убывания (полиномиальный)

■ Таблица 2. Выбор вида тренда и задание ключевых точек (для одного эксперта)

Класс угрозы	Способ распространения	Вид тренда				Уровень ущерба
		Л	Э	Лог	П	
Атаки с использованием вредоносного кода	Через файл, прикрепленный к сообщению электронной почты	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Через посторонние дискеты и CD-диски			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Через скачанный из Интернета файл	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	С пиратскими программами	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Со СПАМом			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Сетевые атаки	На переполнение буфера	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	На отказ в обслуживании		•			$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	IP-spoofing		•			$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Cracking Web-серверов		•			$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Атаки на получение несанкционированного доступа	Установка и использование посторонних программ			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Сканирование IP-адресов и портов сети			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Загрузка с дискеты			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Подбор паролей			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Атаки на переполнение буфера	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Подключение модемов и других аппаратных устройств			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Злоупотребления полномочиями	Использование компьютера в личных целях	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Ошибки персонала	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Продажа корпоративных данных	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Раскрытие конфиденциальных данных	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Использование компьютеров для непроизводительной деятельности			•		$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Сбои в работе аппаратуры	Отказ связи	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Аппаратный сбой	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Потеря питания	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Зависание компьютера	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Кражи и чрезвычайные ситуации	Воровство активов	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Похищение персонала	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Пожар	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Землетрясение	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Наводнение	•				$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
Чрезмерное использование систем защиты, ухудшающих работу автоматизированной системы	Антивирусная защита				•	$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Криптографическая защита				•	$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Защита точек доступа, сетевых служб и сетевых коммуникаций (межсетевой экран, DHCP-сервер и др.)				•	$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Защита от несанкционированного доступа (встроенные средства и внешние устройства)				•	$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$
	Разграничение прав доступа, групповая политика и мониторинг				•	$(x_{нач}, \mu_{нач}), (x_{пр}, \mu_{пр}), (x_{кон}, \mu_{кон})$

бор нужного метода формирования функции принадлежности (с учетом ее класса) с целью использовать возможные методы дальнейшей ее обработки.

Метод экспертного построения функций принадлежности оценки уровня ущерба информационной системе состоит в следующем. Группе экс-

пертов предлагается оценить зависимость частоты появления выделенных видов угроз и соответствующего уровня ущерба предприятия. Такая зависимость представляет собой аналитическую функцию. Существуют 4 основных вида трендов (линейный (Л), экспоненциальный (Э), логарифмический (Лог), полиномиальный (П)) функций

такой зависимости, которые в общем случае можно представить в виде трех видов линий:

- 1) линейно возрастающая;
- 2) нелинейная с монотонным возрастанием;
- 3) нелинейная с периодом возрастания и убывания.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны эти виды линий.

Уточнение выбранного тренда функции поведения информационной системы состоит в задании ключевых точек: начальной $(x_{нач}, \mu_{нач})$, промежуточной $(x_{пр}, \mu_{пр})$ и конечной $(x_{кон}, \mu_{кон})$. Пример заполненной анкеты эксперта приведен в табл. 2.

Построенные с использованием заданных экспертами ключевых точек и выбранный ими тип тренда позволяют строить нечеткое множество уровня ущерба конкретной угрозы заданным способом распространения на защищаемую информационную систему. Эти нечеткие множества будем называть экспертными, или начальными, и обозначим через

$$W^{l,q} = \{(x_i, \mu_i)\},$$

где индекс $l = 1, 2, \dots, m$ — способы распространения угроз; индекс q — класс угроз; x_i — носители нечеткого множества, полученные в результате дискретизации значений уровня ущерба информационной системы в результате реализации рассматриваемой угрозы; μ_i — степени принадлежности носителей нечеткому множеству. Ущерб при такой угрозе составляет величину

$$C^{l,q} = SW^{l,q},$$

где S представляет собой стоимость защищаемой информации.

Этап 3: построение обобщенного нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на информационную систему

Для получения обобщенного нечеткого множества уровня ущерба всего класса угроз на информационную систему необходимо сложить полученные на этапе 2 начальные нечеткие множества. Сложение двух нечетких множеств \tilde{A} и \tilde{B} предлагается выполнять по алгебраическому методу [8]:

$$\mu_{\tilde{A}+\tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x).$$

Искомое обобщенное нечеткое множество уровня ущерба класса угроз на информационную систему

$$\tilde{W}^q = \sum_{l=1}^m W^{l,q}. \quad (*)$$

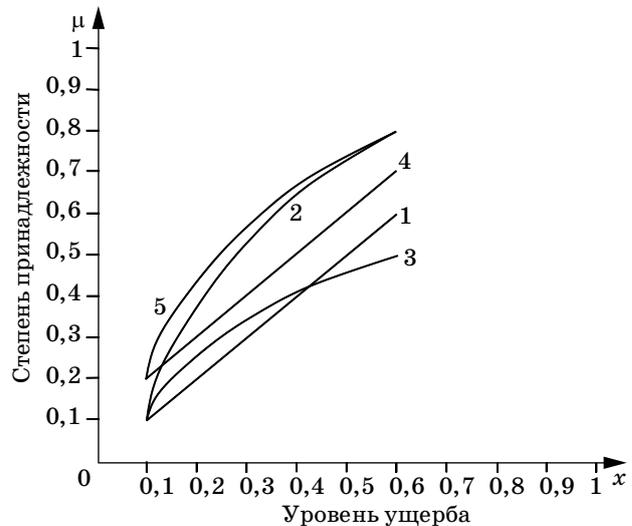


Рис. 2. Начальные нечеткие множества для способов распространения угроз $l = 1, 2, 3, 4, 5$ класса $q = 1$: 1 — через файл, прикрепленный к сообщению электронной почты; 2 — через посторонние диски и CD-диски; 3 — через скачанный из Интернета файл; 4 — с пиратскими программами; 5 — со СПАМом

Приведем пример получения обобщенного нечеткого множества \tilde{W}_k^q (*). Будем рассматривать конкретный класс угроз. Пусть $q = 1$, что соответствует первому классу угроз из табл. 2, а именно «Атаки с использованием вредоносного кода». Для этого класса обозначим способы распространения угроз $l = 1, 2, 3, 4, 5$.

В результате экспертного опроса для способов распространения l получены начальные нечеткие множества (рис. 2).

Нечеткие множества из рис. 2 имеют следующие числовые соответствия:

$$W^{1,1} = \{(0,1; 0,1), (0,2; 0,2), (0,6; 0,6)\};$$

$$W^{2,1} = \{(0,1; 0,1), (0,2; 0,4), (0,6; 0,8)\};$$

$$W^{3,1} = \{(0,1; 0,1), (0,2; 0,2), (0,6; 0,5)\};$$

$$W^{4,1} = \{(0,1; 0,2), (0,2; 0,3), (0,6; 0,7)\};$$

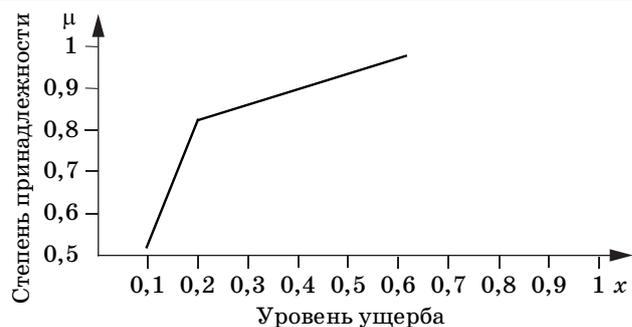


Рис. 3. Обобщенное нечеткое множество \tilde{W}^1

$$W^{5,1} = \{(0,1; 0,2), (0,2; 0,4), (0,6; 0,8)\}.$$

Вычислим обобщенное нечеткое множество \tilde{W}^1 уровня ущерба первого класса угроз на информационную систему по формуле (*):

$$\tilde{W}^1 = \sum_{l=1}^5 W^{l,1} = \{(0,1; 0,53), (0,2; 0,83), (0,6; 0,99)\}.$$

Функция принадлежности для этого класса угроз является монотонно возрастающей (рис. 3). Это означает, что уровень ущерба прямо пропорционален степени принадлежности.

Заключение

Предложенная методика построения нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на

информационную систему обладает следующими двумя основными достоинствами:

— не использует аппарат теории вероятностей в силу отсутствия реальной статистики воздействия угроз;

— не применяет процедуру оценки степени соответствия информационной системы определенному набору требований по обеспечению информационной безопасности, что может быть весьма дорогой процедурой для предприятия.

В области информационной безопасности недостаточно теоретической базы для решения задач качественной оценки. Это особенно важно, когда нет полных данных о воздействии угроз на информационную систему или эти данные заданы нечетко (размыто). Математический аппарат нечеткой логики является адекватным инструментарием для решения таких задач.

Литература

1. Корченко А. Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения. — Киев: МК-Пресс, 2006. — 200 с.
2. Петренко С. А., Симонов С. В. Управление информационными рисками. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 300 с.
3. Вихорев С. В. Классификация угроз информационной безопасности // Сетевые атаки и системы информационной безопасности. 2001. № 2. С. 23–30.
4. Пархоменко Н., Яковлев С., Пархоменко П., Мисник Н. Угрозы информационной безопасности. Новые реалии и адекватность классификации// Защита информации. Конфидент. 2003. № 6. С. 34–41.
5. Халов Е. А. Теоретические основы построения многопараметрических функций принадлежности нечетких систем// Информационные процессы. 2009. № 1. С. 15–21.
6. Емельяников М. Информационные системы персональных данных: <http://daily.sec.ru/dailypblshow.cfm?rid=9&pid=22489> (дата обращения: 25.03.2011).
7. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / ТюмГУ. — Тюмень, 2000. — 87 с.
8. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. — Рига: Зинатне, 1990. — 150 с.

УДК 004.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВОСТНОГО ФОНА НА КОТИРОВКИ ЦЕННЫХ БУМАГ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОСТАВЕ УЧАСТНИКОВ РЫНКА

А. С. Федеряков¹,
ведущий программист
ООО «Информационные технологические системы»

Рассматривается задача изучения влияния новостного фона при различном составе участников рынка на динамику цен акций и другие экономические показатели. Для решения этой задачи используется метод имитационного моделирования на основе мультиагентного подхода.

Ключевые слова — динамическая модель, мультиагентная система, новостной фон, рынок ценных бумаг.

Введение

Рынок ценных бумаг — чрезвычайно сложная динамическая система. Когда на нем происходят потрясения, порой даже опытным аналитикам сложно объяснить и интерпретировать произошедшие события. Одним из вечных вопросов является определение степени переоцененности или недооцененности акций. Существуют, с одной стороны, фундаментальные показатели, по которым легко рассчитать коридор стоимости, с другой стороны — новости, которые сигнализируют о том, в каком направлении эти показатели будут меняться. Выявление соотношения этих движущих сил является сложной задачей, решение которой позволит более точно прогнозировать динамику экономических показателей бирж, а это, в свою очередь, позволит инвесторам принимать более взвешенные решения при управлении своими активами. Эта статья посвящена изучению влияния новостного фона на котировки ценных бумаг при различном составе участников рынка.

В рамках исследования было предложено моделировать рынок ценных бумаг, используя классические методы математического моделирования [1] и мультиагентный метод [2]. Суть мультиагентного подхода заключается в создании вир-

туального мира, населения его виртуальными агентами и проведении экспериментов над такой моделью. Взаимодействуя между собой, агенты совершают сделки на бирже, в результате чего мы можем наблюдать те же явления и закономерности, что и на реальных рынках. Анализируя работу виртуальной биржи в различных условиях, можно делать выводы о том, какие движущие силы управляют реальными биржами и какое влияние на котировки оказывают фундаментальные и новостные факторы. Результаты симуляций можно использовать для прогнозирования экономических показателей реальных бирж в рамках мультиагентной системы поддержки принятия решений.

Обзор существующих подходов

Идея использовать имитационное моделирование для решения задач подобного класса не является новой. Этим вопросом занимались, начиная с конца 80-х гг., Лебарон Б. (LeBaron B.), Палмер Р. (Palmer R.) [3], Кохен К. (Cohen K.), Майер С. (Maier S.) [4], Ким (Kim), Марковиц Г. (Markowitz H.) [5], Риек (Rieck), Гиансанте С. (Giansante S.), Йу В. (Yue W.) [6], Марчеси М. (Marchesi M.), Раберто М. (Raberto M.) [7] и др. В последнее время этим вопросом заинтересовались и российские исследователи В. П. Романов [8], К. В. Воронцов.

Несмотря на значительное количество работ по данной тематике, реальных проектов, использующих мультиагентный подход для моделиро-

¹ Научный руководитель — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой информационных систем в экономике и менеджменте факультета информатики Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова В. П. Романов.

вания рынка, очень мало. Из известных можно выделить Santa Fe, GASM, MoTor, A.T.O.M, Altrava adaptive modeler. Однако часть этих разработок не опубликована, часть опубликована со следующими существенными ограничениями, затрудняющими применение и дальнейшее развитие этих систем.

1. Несоблюдение пропорций участников и инструментов. В подобных моделях торговля осуществляется только одной акцией. Каждый трейдер совершает примерно только одну транзакцию в день. Реальные рынки ценных бумаг оперируют сотнями и тысячами ценных бумаг, а трейдеры совершают десяток операций купли-продажи в день.

2. Модель ценообразования, основанная на пересечении кривых спроса и предложения. Во многих моделях агенты заключают все сделки только по цене равновесия между спросом и предложением. Все запросы за пределами этой цены отклоняются в тот же день. Реальные рынки ценных бумаг используют модель двойного аукциона, при которой ордера обрабатываются в зависимости от своего типа (маркет, лимит, спот и т. п.), а транзакции совершаются только в соответствии с запросами трейдеров.

3. Нереалистичные стратегии принятия решений. Большая часть моделей рассчитана только на один тип стратегии, в рамках которой при каждом шаге трейдер выбирает, куда ему вложить деньги, между банком и рынком. Это не соответствует поведению реальных трейдеров.

Чтобы обойти эти архитектурные ограничения, автор с 2006 г. ведет разработку модели FIMAS, программная реализация которой свободно распространяется вместе с исходным кодом [9]. Подобный комплекс позволил моделировать различные биржевые сценарии, в том числе исследующие влияние новостного фона на динамику цен акций.

Математическая модель виртуального рынка

Обозначим понятие «виртуальный мир» буквой W (от слова world). Каждая итерация i меняет состояние виртуального мира. Частота итераций ω задается пользователем.

В виртуальном мире существует понятие «виртуального времени» τ . Начальное состояние времени равно τ^0 , каждую итерацию оно увеличивается на период итераций, который обратно пропорционален частоте ω . Таким образом, в каждый момент i виртуальное время τ^i может быть рассчитано по следующим формулам:

$$\tau^i = f(\tau^0, i);$$

$$\tau^{(i+1)} = \tau^i + 1/\omega.$$

Виртуальный мир имеет начальное состояние W^0 и каждую итерацию i он меняет свое состояние на W^i , т. е. $W^i = f(W^0; i)$. Однако все события в виртуальном мире привязаны не к частоте итерации, а к виртуальному времени. Таким образом, все агенты могут обновляться настолько часто, насколько им нужно. Агенты, которым не нужно обновляться в данный момент, просто пропускают итерацию. Следовательно, более точной будет формулировка $W^i = f(W^0; \tau^i)$.

Виртуальный мир населяют участники — экономические субъекты A (от слова agent). В виртуальном мире W существуют a участников $A_1, A_2 \dots A_j \dots A_{a-1}, A_a$. Каждый j -й участник имеет начальное состояние A_j^0 и каждую итерацию i меняет его на A_j^i . Таким образом, состояние каждого участника будет определяться формулой

$$A_j^i = f(W^0, A_j^0, N, i).$$

Виртуальный мир является объединением множества всех участников, новостей и классификаторов: $W = AUCUN$. Его состояние в каждый момент i зависит от начальных параметров симуляции, текущего виртуального времени и новостей из внешнего мира. Оно может быть представлено в виде функции

$$W^i = f(W^0, A^0, N, \tau^i),$$

где W^0 — начальное состояние виртуального мира; A^0 — начальное состояние агентов; N — совокупность новостей и событий; τ^i — виртуальное время в момент i .

Мир развивается под влиянием новостей N (от слова news). Новости могут как генерироваться участниками этого мира (N_{int}), так и поступать из внешней среды (N_{ext}). Каждую итерацию может генерироваться различное количество новостей. Пусть в i -ю итерацию у нас произошло k новостей типа N_{int} и l новостей типа N_{ext} . Тогда новостной фон N_{total}^i для итерации i может быть рассчитан как

$$N_{total}^i = \left(\bigcup_{j=1}^k N_{int}^{i,j} \right) \cup \left(\bigcup_{j=1}^l N_{ext}^{i,j} \right).$$

Новости имеют сложную природу. Каждая новость N^j характеризуется силой $0 < p^j < +\infty$ и временем возникновения t^j . Она связана с совокупностью агентов $A_1 \dots A_\gamma \in A$ с коэффициентами $A_1 \dots A_\gamma$, где γ — количество связей этой новости с конкретными агентами. Также новость N^j связана с совокупностью классификаторов $K_1 \dots K_\phi \in C$ с коэффициентами $E_1 \dots E_\phi$, где ϕ — количество связей этой новости с конкретными классификаторами.

Таким образом, каждая новость через классификаторы может быть связана со многими субъектами, на каждый из которых она влияет с разной силой.

Пусть $C \in A$ — компания-эмитент акций. Она связана с совокупностью классификаторов $K^1 \dots K^y \in C$ с коэффициентами $C^1 \dots C^y$, где y — количество таких связей.

Соответственно, влияние новости N^j на компанию C рассчитывается по формуле:

$$N^C = N^C \text{ direct} + N^C \text{ classif},$$

где $N^C \text{ direct}$ — прямое влияние новости на компанию; $N^C \text{ classif}$ — влияние новости на компанию через классификаторы.

Параметры $N^C \text{ direct}$ и $N^C \text{ classif}$ рассчитываются так:

$$N^C \text{ direct} = 0, \text{ если } C \notin (A_1 \dots A_\vartheta),$$

$$N^C \text{ direct} = A_j p^j, \text{ если } C \cap (A_1 \dots A_\vartheta) = A_j;$$

$$N^C \text{ classif} = 0, \text{ если } (K^1 \dots K^y) \cap (K_1 \dots K_\vartheta) = \emptyset,$$

$$N^C \text{ classif} = (E_1 p^j + E_2 p^j + \dots + E_{\vartheta-1} p^j + E_\vartheta p^j), \\ \text{если } (K^1 \dots K^y) \cap (K_1 \dots K_\vartheta) = (K^1 \dots K^\vartheta),$$

где ϑ — количество совпадающих классификаторов у новости N^j и компании C .

По такой схеме рассчитывается влияние новости N^j на компанию C . Но каждый агент может по-разному интерпретировать поступающие новости. Например, он может не учитывать некоторые классификаторы или преувеличивать роль других классификаторов, и его формула N^C будет выглядеть несколько по-другому. Некоторые агенты могут вообще не следить за новостями и оперировать только техническими индикаторами. Однако наши эксперименты показали, что наиболее адекватные результаты получаются тогда, когда агенты учитывают эффект аккумуляции и затухания новостей. Допустим, за период $(t_{begin} \dots t_{end})$ произошло n внешних событий. В каждый момент $t_1 \dots t_n$ они влияли на компанию C с силой $N^{C1} \dots N^{Cn}$. Тогда новостной фон в момент t_{end} за период $(t_{begin} \dots t_{end})$ может быть рассчитан по формуле

$$\overline{N^{ext}} = \sum_{j=1}^n \left(N^{Cj} \exp \left(-\mu \left(1 - \frac{t_j - t_{end} + t_{std}}{t_{std}} \right) \right) \right),$$

где μ — скорость затухания новостей; t_{std} — время, необходимое для полного затухания новости.

Стратегии трейдеров

В разработанной модели FIMAS выделено несколько подтипов стратегий. Каждая стратегия

определяет набор сигналов, в соответствии с которыми трейдер решает, продавать ли ему акции или покупать. В приведенных ниже формулах и алгоритмах используются следующие обозначения:

P_{cur} — стоимость ценных бумаг T в портфеле трейдера, принимает значение 0, если у него нет ценных бумаг этого типа;

P_{crit} — критичная стоимость ценных бумаг любого типа в портфеле трейдера, после достижения которой он старается больше их не покупать;

P_{max} — максимальная стоимость ценных бумаг любого типа в портфеле трейдера;

P_{std_order} — стоимость стандартного ордера на покупку / продажу, $P_{std_order} < P_{crit}$;

P_{cur_order} — стоимость текущего ордера на покупку / продажу, $P_{cur_order} \leq P_{std_order}$;

P_{std_comis} — стоимость стандартной комиссии брокера на сумму транзакции P_{std_order} ;

\mathbb{P}_{bid} — текущий бид;

\mathbb{P}_{ask} — текущий аск;

\mathbb{P}_{new_order} — лимит-цена нового ордера;

T_{cur} — текущее значение виртуального времени;

T_{before_sell} — минимальное время ожидания перед тем, как трейдер продаст ценную бумагу из портфеля;

T_{portf_create} — время открытия позиции (покупки портфеля ценных бумаг типа T);

$M_{account}$ — размер денежных средств трейдера на счету брокера;

N_T — количество ценных бумаг T в портфеле текущего трейдера;

N_{std} — стандартное количество ценных бумаг T для ордера на общую сумму P_{std_order} ;

N_{new_order} — количество ценных бумаг для нового ордера;

N_{portf_cur} — количество открытых позиций в портфеле трейдера;

N_{portf_max} — максимальное количество открытых позиций в портфеле трейдера;

R — псевдослучайное число в интервале $[0 \dots 1]$ (равномерное распределение);

k_{risk} — склонность трейдера к риску, по умолчанию псевдослучайное число в интервале $[0 \dots 0,3]$ (равномерное распределение).

Стратегия фундаментального трейдера

В приведенных ниже формулах и алгоритмах для этой стратегии дополнительно используются следующие обозначения:

\mathbb{P}_{fund} — фундаментальная цена ценной бумаги (цена, которую трейдер считает справедливой для этой бумаги);

\mathbb{P}_{fund_dif} — минимальное отношение между фундаментальной и реальной ценой, при котором трейдер сочтет бумагу инвестиционно привлекательной. По умолчанию оно в интервале $[1,005 \dots$

1,02] (равномерное распределение), т. е. от 0,5 до 2 % разницы.

Сигнал для покупки ценной бумаги T :

- 1) $N_T = 0$;
- 2) $M_{account} > P_{std_order} + P_{std_comis}$;
- 3) $N_{portf_cur} = 0 \cup ((N_{portf_cur} < 3) \cap (R > 0,5))$;
- 4) $P_{fund} / P_{ask} > P_{fund_dif}$

Цена покупки и количество:

$$\mathbb{P}_{new_order} = \mathbb{P}_{ask};$$

$$N_{new_order} = P_{std_order} / \mathbb{P}_{new_order}$$

Сигнал для продажи ценной бумаги T :

- 1) $N_T > 0$;
- 2) $M_{account} > P_{std_comis}$;
- 3) $T_{cur} - T_{portf_create} > T_{before_sell}$

Цена продажи и количество:

если $\mathbb{P}_{bid} / \mathbb{P}_{fund} > \mathbb{P}_{fund_dif}$, то $\mathbb{P}_{new_order} = \mathbb{P}_{bid}$;

иначе если $R < k_{risk}$, то $\mathbb{P}_{new_order} = (\mathbb{P}_{bid} + \mathbb{P}_{fund}) / 2$;

иначе $\mathbb{P}_{new_order} = \mathbb{P}_{bid}$;

$$N_{new_order} = N_T$$

Стратегия новостного трейдера

В приведенных ниже формулах и алгоритмах для этой стратегии дополнительно используются следующие обозначения:

k_{buy_signal} — значение уровня новостного фона компании, свидетельствующее, что ценную бумагу следует купить;

k_{sell_signal} — значение уровня новостного фона компании, свидетельствующее, что ценную бумагу следует продать;

\mathfrak{N}_{cur} — текущее значение уровня новостного фона компании, выпускающей ценную бумагу T .

Сигнал для покупки ценной бумаги T :

- 1) $N_T = 0$;
- 2) $M_{account} > P_{std_order} + P_{std_comis}$;
- 3) $N_{portf_cur} < 2 \cup ((N_{portf_cur} < 6) \cap (R > 0,5))$;
- 4) $\mathfrak{N}_{cur} > k_{buy_signal}$

Цена покупки и количество:

$$\mathbb{P}_{new_order} = \mathbb{P}_{ask};$$

$$N_{new_order} = P_{std_order} / \mathbb{P}_{new_order}$$

Сигнал для продажи ценной бумаги T :

- 1) $N_T > 0$;
- 2) $M_{account} > P_{std_comis}$;
- 3) $T_{cur} - T_{portf_create} > T_{before_sell} \cup (\mathfrak{N}_{cur} > k_{sell_signal})$

Цена продажи и количество:

$$\mathbb{P}_{new_order} = \mathbb{P}_{bid};$$

$$N_{new_order} = N_T$$

Эксперимент

Напомню, что целью исследования является изучение того, как новости влияют на котировки акций при различной рыночной конъюнктуре, как это в итоге сказывается на доходах трейдеров. Для этого используется программный ком-

плекс FIMAS, имитирующий работу реального рынка ценных бумаг, основанный на описанной выше модели. В рамках эксперимента на рынке существуют один маркет-мейкер, 100 трейдеров-новичков, 10 инсайдеров, разное количество фундаментальных и новостных трейдеров. Рассмотрено 3 варианта:

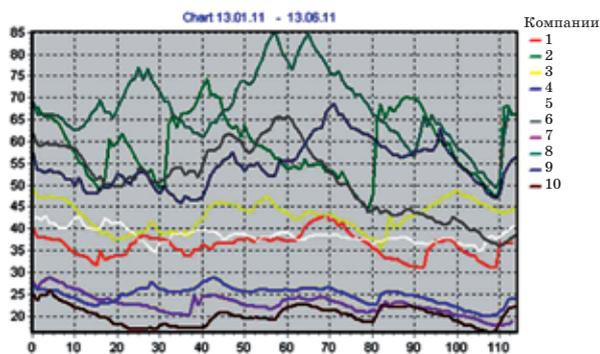
- 1) 500 фундаментальных трейдеров, 500 новостных трейдеров;
- 2) 200 фундаментальных трейдеров, 800 новостных трейдеров;
- 3) 800 фундаментальных трейдеров, 100 новостных трейдеров.

Основное предназначение новостных трейдеров в рамках системы — приведение цены в соответствие с новостным фоном в краткосрочном периоде, а предназначение фундаментальных трейдеров — следование за некоторой фундаментальной ценой. Чтобы осуществить данный эксперимент, нужно запустить программный комплекс FIMAS, открыть в нем демонстрационный проект *NewsGenerator.fmp* и запустить симуляцию. Виртуальные агенты начинают в режиме реального времени совершать сделки между собой. После 150 виртуальных дней следует остановить симуляцию и собрать статистику. По итогам эксперимента можно сделать следующие наблюдения.

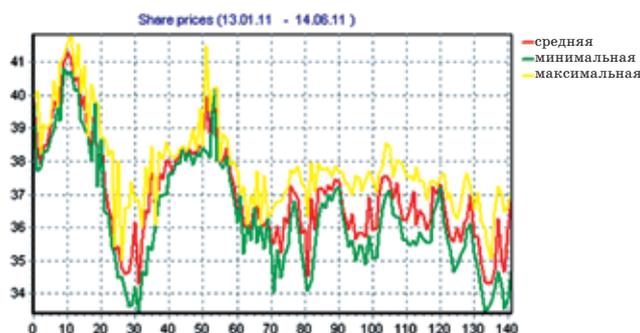
Новостные трейдеры вызывают значительные колебания уровня цен, фундаментальные трейдеры излишне «сглаживают» ее. Графики изменения цен выглядят реалистично только при одинаковом соотношении новостных и фундаментальных трейдеров, хотя во всех сценариях сохраняется реалистичный вид графиков распределения цен. Из этого можно сделать вывод, что график распределения — это критерий «правильности» реализации механизма двойного аукциона в системе, а график динамики цен — критерий реалистичного соотношения агентов.

Соотношение новостных и фундаментальных трейдеров на реальных рынках близко к 1:1 (рис. 1). При таких пропорциях соблюдается наиболее реалистичный вид как графика изменения цен, так и графиков изменения активов агентов.

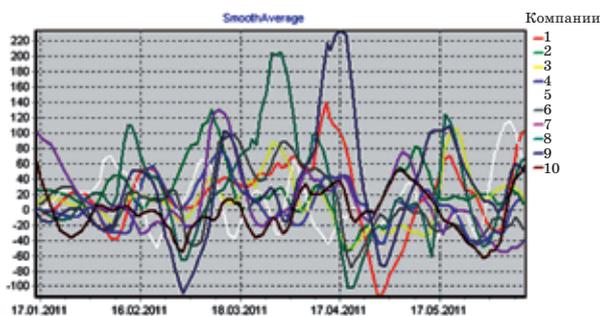
При преобладании новостных трейдеров спрэд минимален. Самый большой спрэд достигается при преобладании фундаментальных трейдеров (рис. 2). Этим объясняется и отличие доходов маркет-мейкеров при различных сценариях (они постоянно теряют активы при преобладании новостных трейдеров и активно обогащаются при преобладании фундаментальных) — ведь эти доходы напрямую зависят от размера спрэда. Причина этого эффекта в том, что маркет-мейкеры не способны эффективно противостоять деятельности новостных трейдеров, т. е. новостные трейдеры покупают много акций в одни моменты и «дрем-



■ Рис. 1. Динамика цен акций 10 компаний при одинаковом соотношении новостных и фундаментальных трейдеров



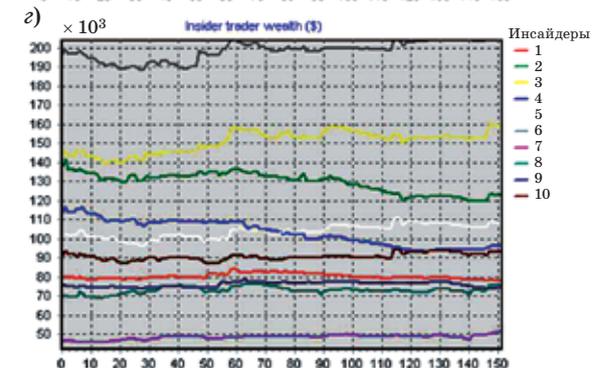
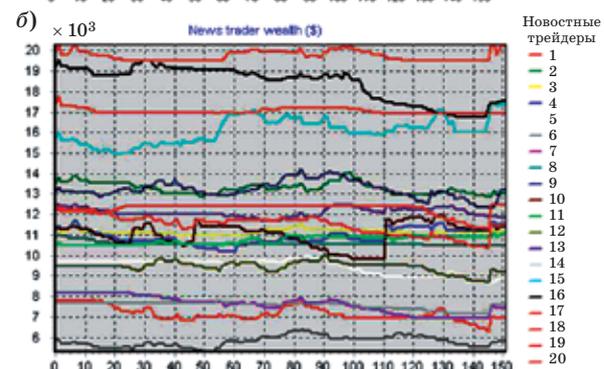
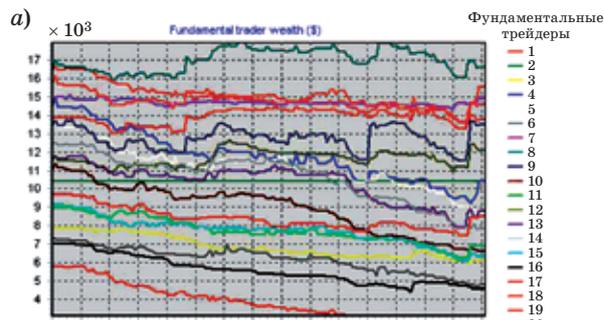
■ Рис. 2. Минимальная, максимальная и средняя цена одной из акций при преобладании фундаментальных трейдеров



■ Рис. 3. Новостной фон 10 компаний при одинаковом соотношении новостных и фундаментальных трейдеров

люют» в другие моменты, тогда как алгоритм работы маркет-мейкера рассчитан на более стабильное соотношение предложения и спроса.

Реальные цены акций и фундаментальные очень далеки друг от друга. Однако даже в сценарии преобладания новостных трейдеров фундаментальные трейдеры все равно совершают 30 % всех операций на рынке. Это еще одно подтверждение того, что на реальных рынках доля фундаментальных трейдеров очень высока — около 30–50 %. Существует много других стратегий, кото-



■ Рис. 4. Динамика доходов трейдеров: а — фундаментальных; б — новостных; в — маркет-мейкера; г — инсайдеров — в сценарии при одинаковом количестве фундаментальных и новостных трейдеров

рые косвенным образом используют фундаментальный анализ, и за счет этого количество «фундаментальных сделок» может составлять до 80 % всего оборота.

Во всех вариантах сценария мы видим, что изменение новостного фона существенно влияет на динамику цен акций (см. рис. 1 и 3), цены акций реагируют на все новостные всплески. Фундаментальная цена является не «ограничителем» этого влияния, а, скорее, фактором, нормализующим эту цену после всплесков. Соотношение фундаментальных и новостных трейдеров определяет величину всплесков и скорость восстановления цены.

Если анализировать динамику активов трейдеров, то можно заметить, что инсайдеры действуют не так эффективно, как можно было бы предположить из алгоритма работы стратегии (рис. 4). Большинство из них, обладая инсайдерской информацией о будущем новостном фоне, входит в рынок слишком рано, когда цена еще падает, поэтому мало зарабатывают на последующем всплеске. Считаю, что следует видоизменить их стратегию так, чтобы они учитывали не только новостной фактор, но еще и технические индикаторы. Однако следует отметить, что каждый инсайдер имеет собственный набор параметров, и благодаря этому некоторые из них (например, № 3 и 7) практически не проигрывают на сделках.

При преобладании фундаментальных трейдеров активы как фундаментальных, так и новостных трейдеров медленно сокращаются. Фундаментальных слишком много, они конкурируют только друг с другом, что является заранее проигрышным вариантом. Новостных трейдеров слишком мало, чтобы оказывать серьезное влияние на цены, поэтому их ставки на рост цен вместе с новостями оказываются неоправданными. В то же время «более умным» инсайдерам удается удерживать свои активы на стабильном уровне. Они

успевают предугадывать незначительные колебания цен вслед за новостями и играют на них.

При преобладании новостных трейдеров и одинаковом количестве новостных и фундаментальных трейдеров динамика активов становится менее предсказуемой (см. рис. 4, а—г). Некоторые агенты стабильно теряют активы, некоторые могут резко увеличивать и терять за короткие промежутки времени. Тут проявляются индивидуальные особенности трейдеров, а именно значения констант, которые они используют при принятии решений.

Заключение

На динамику цен акций довольно существенно влияют обе группы трейдеров: как новостные, так и фундаментальные. Ни одна из групп не доминирует, их соотношение близко к 1:1. Активность новостных трейдеров приводит к возникновению первоначальных новостных всплесков; фундаментальные трейдеры постепенно уравнивают цену, приводя ее к справедливому, по их мнению, уровню. Ни одна из этих стратегий не является прибыльной, на реальных рынках успешные трейдеры используют более сложные алгоритмы, учитывающие потенциальное влияние этих двух групп трейдеров на динамику цен.

Выявление роли новостного фона и оптимального соотношения торговых стратегий помогло более реалистично моделировать работу биржи в других экспериментах. Также это позволило решить ряд практических задач, связанных с оптимизацией управления биржевыми инвестициями в малоликвидные ценные бумаги.

Литература

1. **Коробов П.** Математическое программирование и моделирование экономических процессов. 3-е изд. — Киев: ДНК, 2006. — 376 с.
2. **Wooldridge M.** Introduction to MultiAgent Systems. — Chichester: John Wiley & Sons, 2002. — 348 p.
3. **Arthur B. W., LeBaron B., Palmer R.** The time series properties of an artificial stock market // Journal of Economic Dynamics and Control. 1999. N 23. P. 1487–1516.
4. **Cohen K., Maier S., Schwartz R., Whitcomb D.** Empirical Studies Relating to the Structure of Securities Markets // Journal of Financial and Quantitative Analysis. 1979. N 4. P. 867–868.
5. **Kim G., Markowitz H.** Investment Rules, Margin and Market Volatility // The Journal of Portfolio Management. 1989. N 1. P. 45–52.
6. **Yue W. T., Chaturvedi A. R., Mehta S.** Is more information better? The effect of traders' irrational behavior on an artificial stock market // Intern. Conf. on Information Systems. Atlanta, GA, USA: Association for Information Systems, 2001. P. 660–666.
7. **Raberto M., Cincotti S., Focardi S. M., Marchesi M.** Agent-based simulation of a financial market // Physica A. 2001. Vol. 299. N 1–2. P. 320–328.
8. **Romanov V., Naletova O., Pantileeva E., Federyakov A.** The simulation of news and insiders' influence on stock-market prices dynamics in non-linear model // Computational Finance and its Applications II. Southampton, GB: WIT Press, 2006. P. 309–318.
9. **Federyakov A.** Financial Market Simulation. <http://fimas.sourceforge.net> (дата обращения: 07.03.2011).

УДК 512.643.8

М-МАТРИЦА 22-ГО ПОРЯДКА

Ю. Н. Балонин,

инженер

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Публикуется отсутствующая в ряде S -матриц шестиуровневая ортогональная матрица 22-го порядка с минимальным по норме максимальным элементом. Рассматриваются ее свойства, приводится анализ системы алгебраических уравнений для значений ее элементов, указываются метод нахождения матрицы и дополнительные неоптимальные решения, близкие по структуре к матрицам Белевича.

Ключевые слова — минимаксные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича.

В работах [1, 2] описан класс минимаксных M -матриц, являющихся ортогональными матрицами с минимальным по норме максимальным элементом. Важными представителями этого класса являются матрицы Адамара и Белевича.

Напомним, матрица Адамара — квадратная матрица A размерности n , кратной 4, состоящая из чисел ± 1 , столбцы которой ортогональны:

$$A^T A = nI,$$

где I — единичная матрица. Величина максимального элемента (m -норма) ортонормированной матрицы определяется как $m = 1/\sqrt{n}$. Матрица одноуровневая.

Матрица Белевича (конференц-матрица, или S -матрица) — квадратная матрица размерности, кратной 2, с нулевой диагональю и остальными элементами, равными ± 1 , обладающая свойством

$$S^T S = (n - 1)I.$$

Норма матрицы $m = 1/\sqrt{(n - 1)}$. Матрица двухуровневая.

В работе [1] сформулирован универсальный алгоритм поиска M -матриц, результативность которого зависит от порядка n матрицы, а также опубликованы матрицы порядков 3, 5, 7, 9, 11, пропущенные в последовательности матриц Адамара и Белевича. M -матрицы 13-го порядка (M_{13}) и старше предположительно являются хаотическими, что не исключает существования так называемых регулярных квазиоптимальных уровней матриц и матриц особых порядков.

Ввиду сложности поиска матриц Адамара высших порядков в научной литературе осущест-

вляется сетевой мониторинг и существует традиция публиковать вновь открытые матрицы [3]. Определенный вес этому придает практическая сфера приложения матриц Адамара к построению помехоустойчивых и защищенных кодов. Согласно данным [3], к 2004 г. были опубликованы все матрицы Адамара до 428-го порядка включительно (найдена Kharaghani и Tayfeh-Rezaie), первая следующая неизвестная матрица имеет порядок 668.

M -матрицы нечетных порядков и матрицы пропущенных четных порядков изучены значительно хуже. Отмеченные пропуски связаны с классическими проблемами теории чисел. Впервые это обстоятельство в 1950 г. обнаружил Витольд Белевич [4]. Он ввел математическое понятие конференц-матриц (S -матриц), называемых так по причине их изначального возникновения в задачах объединения в единую систему идеальных трансформаторов. Оказывается, что из-за расщепления сигнала между абонентами необходимым условием отсутствия диссипации (потерь энергии) является существование определенных им квадратных матриц. Возникнув в инженерных задачах, матрицы быстро нашли применение в областях, которые представляют интерес для математики. Нахождение конференции матриц не тривиальная задача, поскольку они существуют не для всех значений n . Порядки, для которых они существуют, всегда представимы в виде $2k + 2$ (где k — целое), но это само по себе не является достаточным условием [5]. Так, S -матрицы существуют для $n = 2, 6, 10, 14, 18, 26, 30, 38$ и 42 , но не существуют для $n = 22$ или $n = 34$.

Белевичем были получены S -матрицы для n до 38, он также отметил, что для $n = 66$ имеется несколько вариантов таких матриц.

Пропуски 22 и 34 хорошо известны в теории чисел. Заинтересовавшись теоремой Ферма, математик из Петербурга Л. Эйлер потратил 7 лет на разбор задачи, связанной с представлением чисел суммой квадратов. Сформулированная им теорема, несомненно, принадлежит к числу высших достижений математики XVII–XVIII вв. В виде суммы двух квадратов представимы все числа, в разложение которых на простые множители все простые вида $4k + 3$ входят в четных степенях (недопустимы множители 3, 7, 11 и т. п.). Особенность матрицы 22-го порядка состоит в том, что множителями $n - 1 = 21$ являются числа 3 и 7. То же самое касается порядка 34: множителями $n - 1 = 33$ являются числа 3 и 11.

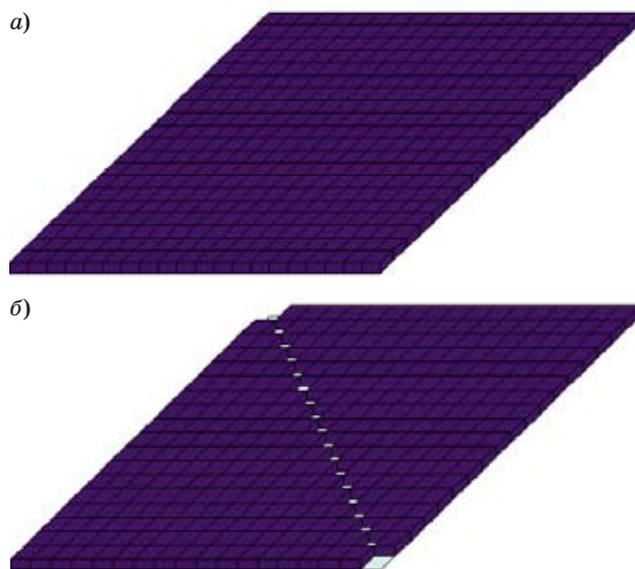
Проблемы теории чисел относятся к труднейшим, на их доказательства уходят, как у Эйлера, годы, а то и десятки лет. Совпадения исключений Белевича с указанными Эйлером случаями неразложимости чисел связывают между собой довольно разные объекты — числа и матрицы. Если матрица Белевича не существует, возникает закономерный вопрос: что же замещает ее? Решение в классе M -матриц, обобщающих матрицы Адамара и Белевича, имеет значение как для теории матриц, так и для теории чисел, поскольку объекты соотносимы. Именно поэтому вопрос поиска M -матриц 22-го, 34-го и подобных порядков приобретает особое звучание. Они восполняют пропуски в указанном выше ряде S -матриц. Поиск матриц более высоких порядков сложен ввиду ограничения универсального алгоритма. С ростом размерности задачи наиболее частым итогом является хаотическая матрица [1].

Цель настоящей работы состоит в публикации найденной шестиуровневой нехаотической матрицы M_{22} .

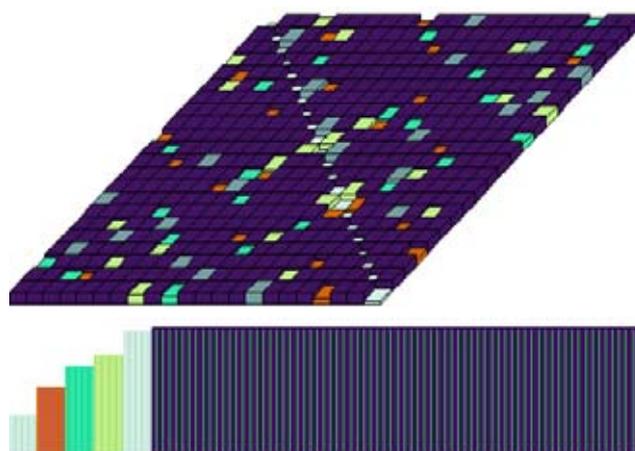
Структуры матриц Адамара и Белевича приведены на рис. 1, показаны абсолютные значения элементов.

Уровневая структура найденной с использованием алгоритма из работы [1] минимаксной ортогональной матрицы M_{22} приведена на рис. 2, показаны абсолютные значения элементов уровней.

Найденная матрица M_{22} имеет 6 уровней, обозначенных снизу вверх как a, b, c, d, e, f . Значения элементов уровней следующие: $a=0.307566$, $b=0.529895$, $c=0.692434$, $d=0.784526$, $e=0.980202$, $f=1$. В математике особое значение имеют симметричные структуры. Заметим, что приведенная матрица близка к симметричной, однако симметрию модулей ее элементов нарушает только слой элементов e . Это указывает на возможность поис-



■ Рис. 1. Структуры матриц Адамара (а) и Белевича (б)



■ Рис. 2. Структура матрицы M_{22} с пятью нижними уровнями по 22 элемента

ка иного решения, но пока найденная матрица минимальна по t -норме.

Элементы уровней матрицы обладают известной еще Эйлеру особенностью латинских квадратов: 22 элемента каждого из уровней, отличного от верхнего (f), расположены в строках и столбцах ее без пересечений: нет двух элементов с одинаковым значением у них индекса строки или столбца.

Регулярная M -матрица, таким образом, представляет собой нестроенный латинский квадрат. После эквивалентных преобразований перестановкой строк и столбцов любой ее уровень можно рассматривать как диагональный, что является характерной чертой матриц Белевича с нулевой диагональю.

Существует также некоторое подобие M_{22} ранее найденным [1] матрицам M_3 и M_7 (порядки,

равные множителям 21). К особенностям решения стоит отнести корреляцию числа слоев M_{11} и M_{22} — их 6. Однако матрица порядка 22, найденная из M_{11} по правилу Сильвестра [1], не сводима к указанной, поскольку ее уровни имеют не по 22, а по 44 элемента. Найденная матрица M_{22} имеет заметно меньшую m -норму [6].

Элементы матриц Адамара, Белевича и M -матриц малых порядков отвечают целочисленным решениям системы диофантовых квадратичных уравнений. С ростом размерности задачи в решения приходится включать иррациональность — обобщение понятия целочисленности создателем теории алгебраических чисел Эрнстом Кумером позволило ему в свое время указать на ошибки попыток доказательств теоремы Ферма математиками Французской академии О. Коши и Г. Ламе [7].

Условие ортогональности столбцов приводит к системе аналитических уравнений:

$$\begin{aligned} a+c-f &= 0; \\ 2af+2bf-cd+cf-df+2ef-3f^2 &= 0; \\ 2af+bd+bf-2cf+df-2ef+f^2 &= 0; \\ ae-af-2bf-2cf-2df-ef+5f^2 &= 0; \\ 2af-bc+bf+cf+2df+2ef-5f^2 &= 0. \end{aligned}$$

Из $a+c=f$, $f=1$ находим $c=1-a$. Выражая $2e=4a+b+bd+d-1$, получаем

$$\begin{aligned} a(4a-3)+(a-5)(b+bd+d)+4bd+7 &= 0, \\ a(5+d)+bd+3b-d-3 &= 0, \quad a(5+b)+bd+3d+b-5 = 0. \end{aligned}$$

Это квадратное уравнение и два линейных уравнения, из которых находим выражения для $a=3+(d+b-2)/(d-b)$ и $d=0,5(b^2-2b-15 \pm (b^4+8b^3+38b^2+184b+345)^{1/2})/(b+3)$. Подставляя в линейное уравнение и решая его, получим в итоге значения уровней матрицы:

$$a=0.307566, \quad b=0.529895, \quad d=0.784526,$$

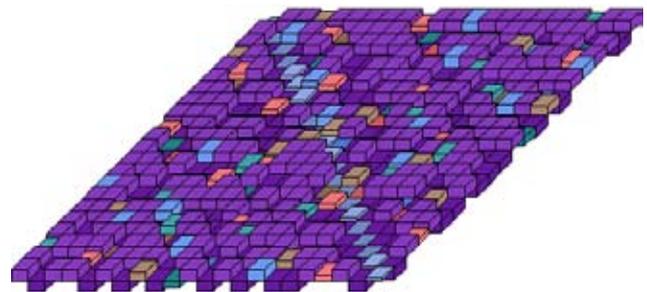
а также неоптимальные (в смысле m -нормы) решения $a=3.05985$, $b=-2.79873$, $d=5.28235$ и $a=3.20158$, $b=4.31117$, $d=-3.98317$, помимо комплексных корней. Параметры c , e находим из уравнений связи. Неоптимальные варианты интересны тем, что итерации с ними устойчивы и позволяют находить новые квазиоптимальные уровневые матрицы.

Заметим, что из всех уравнений только одно квадратное уравнение противоречит условию $a=0$, $b=1$, $c=1$, $d=1$, $e=1$, $f=1$ — получению матрицы Белевича.

Дополнительное исследование позволяет найти в окрестности указанного решения с нормой $m=0.2269$ две квазиоптимальные шестиуровневые матрицы иной структуры с нормой $m=0.2271$, у которых нижний уровень стремится к 0. В обо-

их случаях значение $a=0$ аналитически недостижимо. В лучшем случае (наилучшее приближение к матрице Белевича) имеем $a=0.0053$, при этом $b=0.4022$, $c=0.7965$, $d=0.893$, $e=0.8982$, $f=1$. Более того, за понижение нижнего уровня приходится платить увеличением m -нормы. Именно это обстоятельство и выделяет указанную матрицу M_{22} . Она ближе к матрице Адамара с ее менее выраженной диагональю, поскольку иная структура при $n=22$ становится недостижимой, и анализ это подтверждает. Матрицы, близкие к матрице Белевича, — неоптимальны, наблюдается компромиссное решение.

Отметим, что подъем нижней диагонали порождает расщепление верхнего уровня с образованием четырех промежуточных ступеней — побочных диагоналей, поскольку перестановками матрица диагонализуется относительно любого слоя элементов a , b , c , d , e . Расщепление или бифуркация — характерная черта математических объектов детерминированного хаоса [1]. Итерации решения нелинейного (квадратического) уравнения, входящего в условие ортогональности, с понижением нормы максимального элемента порождают уровни-аттракторы.



a	f	f	d	f	f	f	f	b	f	f	e	f	f	f	f	f	c	f	f
f	-a	e	f	b	-d	f	f	f	-f	-c	-f	-f	-f	f	f	-f	f	f	-f
f	-f	-a	-f	f	-f	-f	f	f	-f	-b	f	f	f	-f	d	-e	-f	f	-c
d	f	-f	-a	-f	-c	f	-f	-f	f	-f	e	f	-f	f	-f	f	b	f	f
f	b	f	-f	a	-f	f	-f	f	-f	f	-f	-f	c	f	f	-f	-d	-f	e
f	-d	-f	-c	-f	a	e	b	-f	f	-f	f	-f	-a	d	f	f	f	f	f
f	f	-f	f	f	-f	a	-f	-f	-f	f	f	b	f	f	-f	c	-d	f	-e
f	f	f	-f	-f	b	-f	-a	f	-f	-f	-c	f	-f	f	-f	f	-f	e	f
f	f	f	-f	-f	-f	-f	-a	e	f	d	-b	f	c	f	-f	-f	-f	-f	-f
b	-f	f	-f	f	f	-f	-f	-a	d	f	-f	f	e	f	-f	-f	f	f	-c
f	-c	-f	f	f	-f	-f	f	d	a	-e	-f	f	f	-f	b	f	-f	f	f
f	-f	-b	-f	e	f	f	-f	d	f	f	a	-f	f	-f	-f	f	c	f	-f
f	f	-f	f	-f	-f	-f	c	b	f	f	-a	-f	-f	e	d	-f	f	f	-f
f	-f	f	-f	-f	b	-e	f	-f	-f	f	-a	d	-f	c	f	f	f	f	-f
e	f	-f	-f	f	f	-f	-c	-f	-f	f	-f	-d	-a	-b	f	f	f	-f	-f
f	f	-f	-f	c	f	f	f	-f	f	-f	f	-f	b	-a	-f	-f	-e	f	d
f	f	d	f	f	e	-f	-f	-f	-f	-f	c	-f	-f	a	-f	f	-b	f	-f
f	-f	f	e	f	-f	c	f	-f	b	f	-d	f	-f	-f	-a	-f	-f	f	f
f	-e	-f	f	-f	f	-d	-f	f	-f	f	c	f	f	-f	f	f	-a	-f	-f
c	f	f	f	-d	f	f	-f	e	f	-f	f	-f	f	-f	-b	-f	-f	-a	-f
f	-f	-c	b	-f	f	f	-f	-f	-e	-f	-f	f	d	f	f	-f	-f	a	-f
f	-f	f	f	-f	f	-f	d	-f	-c	f	-f	f	-f	e	-f	-f	f	b	-f

■ Рис. 3. Объемный и плоский портреты матрицы M_{22}

В заключение отметим, что самостоятельно найти матрицу M_{22} крайне сложно. Отклонения на тысячные доли от найденных авторами статьи начальных значений сжатия и амплитуды элементов стартовой матрицы Гильберта, регламентирующих сходжение алгоритма [1], приводят к хаотическим матрицам. Это при том, что сами по себе начальные значения порождены комбинаторной задачей с 2^{11} исходами, так как m -нормы сортируемых столбцов матрицы Гильберта, согласно используемому алгоритму, симметричны относительно центральной оси. Столбцы старто-

вой матрицы Гильберта должны быть переставлены в последовательности

$$q=[1\ 22\ 21\ 2\ 20\ 3\ 19\ 4\ 5\ 18\ 17\ 6\ 16\ 7\ 8\ 15\ 9\ 14\ 13\ 10\ 11\ 12].$$

Приведенный вектор перестановки q представляет собой 22-элементный ключ решения, которое крайне маловероятно получить случайно, что и определяет публикуемую матрицу (рис. 3) как базовую в практических приложениях, связанных с задачей построения защищенных кодов в системах передачи информации.

Литература

1. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14–21.
2. Балонин Н. А., Мироновский Л. А. Матрицы Адамара нечетного порядка // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. С. 46–50.
3. Мониторинг матриц Адамара. <http://mathworld.wolfram.com/HadamardMatrix.html> (дата обращения: 28.08.2011).
4. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal networks with application to conference telephony // Electr. Commun. 1950. Vol. 26. P. 231–244.
5. Van Lint J. H., Seidel J. J. Equilateral point sets in elliptic geometry // *Indagationes Mathematicae*. 1966. Vol. 28. P. 335–348.
6. Мониторинг М-матриц. <http://mathscinet.ru> (дата обращения: 28.08.2011).
7. Сингх С. Великая теорема Ферма / пер. с англ. Ю. А. Данилова/ МЦНМО. — М., 2000. — 288 с.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Российская универсальная национальная электронная библиотека (РУНЭБ) начала реализацию проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте РУНЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных РУНЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных РУНЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 65.015.3

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В. А. Тушавин,

канд. экон. наук, ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается практический подход к менеджменту качества службы технической поддержки и управлению инцидентами с использованием показателя удовлетворенности потребителей.

Ключевые слова — управление инцидентами, качество оказания услуг, удовлетворенность пользователей, каппа-статистика.

Введение

Процесс управления инцидентами, являющийся одним из наиболее важных процессов управления услугами в области информационных технологий, требует тесного взаимодействия с пользователями. Его фокусной точкой является служба Service Desk, которая играет роль центра контакта пользователей с «внутренними» коллективами технических служб [1].

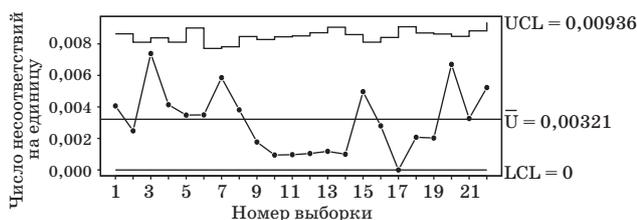
Практические рекомендации и сборники лучших практик подчеркивают, что одна из главных метрик службы Service Desk — удовлетворенность клиентов, которая оценивается в диапазоне от 0 до 5 в момент закрытия либо для каждой заявки, либо для некоторой выборки заявок [2]. С другой стороны, ГОСТ Р ИСО 9000–2008 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» в п. 3.1.4 содержит понятие «удовлетворенность потребителей» (customer satisfaction), которое означает восприятие потребителями степени выполнения их требований, где требования — «потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным» (п. 3.1.2). Там же, в п. 3.3.5, разъясняется, что потребитель — это организация или лицо, получающие продукцию (в данном случае — услуги). К потребителям относятся клиенты, заказчики, *конечные пользователи* и т. д. На основе изложенного возникает практический вопрос, кто же в данном случае является клиентом, поскольку в его качестве можно рассматривать руководство предприятий, с которыми заключены договоры сервисного обслуживания, руководство соответствующи-

щих ИТ-служб или конечных пользователей. Ответ на этот вопрос следует искать в другом стандарте. Так, согласно CobIT 4.1, перед службой технической поддержки и управления инцидентами ставится цель обеспечить удовлетворенность *конечных пользователей* предложением услуг и уровнем обслуживания и в качестве метрики предлагается использовать такой показатель, как доля пользователей, удовлетворенных оперативной поддержкой (службой поддержки или базой знаний) [3]. Исходя из всего сказанного, в настоящей статье под удовлетворенностью потребителя будем подразумевать удовлетворенность *конечных пользователей* оперативной поддержкой.

Методика измерения удовлетворенности клиентов

Существует несколько методов измерения удовлетворенности потребителя, построенных на анкетировании: распространение анкет, телефонный опрос, интернет-опрос и т. д. Для измерения удовлетворенности нами была предложена следующая процедура. В момент закрытия обращения в адрес конечного пользователя автоматически формируется электронное письмо, которое содержит ссылку на его личную страницу на корпоративном портале. Названная страница содержит перечень всех обращений пользователя за последние полгода, можно выставить оценку выполненного обращения в диапазоне от 1 до 5.

Подобная оценка работы службы поддержки пользователей с помощью интернет-сайта применяется большинством сервисных компаний, но



■ Рис. 1. Контрольная и-карта неудовлетворенности потребителей

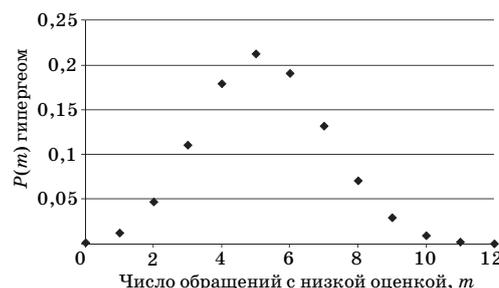
нами была применена новация, заключающаяся в том, что при отображении заявки на мониторе пользователя ей автоматически присваивается оценка 3 (удовлетворительно), если она не была ранее оценена. Пользователь может в любой момент изменить оценку как в большую, так и в меньшую сторону. Потребитель считается удовлетворенным, если у обращения стоит оценка 3 и более, и неудовлетворенным, если оценка 2 и менее. Ежемесячные замеры в 2008–2010 гг. на предприятии с внедренной системой предложенного измерения удовлетворенности потребителя показали, что данный алгоритм позволяет устойчиво поддерживать долю оцененных заявок на уровне 35 % при среднем уровне 3000 обращений в месяц.

На основании таких изменений можно строить контрольную и-карту (рис. 1) и осуществлять мониторинг и контроль за степенью неудовлетворенности конечных пользователей оказываемыми услугами.

Как видно на представленном рисунке, удовлетворенность находится в пределах 99 %, что является достаточно неплохим результатом, но при этом возникает вопрос его достоверности. Для его разрешения необходимо определить, во-первых, достаточность выборки 35 % инцидентов при заданном уровне критерия значимости, во-вторых, надежность такой оценки.

Обоснование применимости предложенной методики

Предположим, что из 3000 обращений потребитель неудовлетворен в 15 случаях или 0,5 %. Размер выборки составляет 1050 обращений (35 %). Как известно, совокупность вероятностей того, что в выборке имеется ровно m обращений с низкой оценкой при $m = 0, 1, 2, \dots, n$, описывается дифференциальной функцией гипергеометрического распределения. Используя функцию ГИПЕРГЕОМЕТ программы Microsoft Excel, нетрудно построить график $P(m)$ вероятностей того, что в выборке ровно m обращений с низкой оценкой. Как видно на графике (рис. 2), вероятность необнаружения достаточно мала.



■ Рис. 2. Дифференциальная функция гипергеометрического распределения

Определим минимально допустимый уровень выборки. Размер выборки для дискретных данных определяется формулой

$$n = \left(\frac{1,96}{h} \right)^2 P(1 - P),$$

где n — минимальный размер выборки; h — уровень точности; P — доля обращений с низкой оценкой [4].

Для $P = 0,005$ и $h = 0,005$ получаем $n = 765$, что составляет 25,5 % от 3000 обращений. Таким образом, выборка 35 % является достаточной для надежного определения неудовлетворенности потребителя.

Существует и вторая проблема определения фактического уровня удовлетворенности конечного пользователя, поскольку автоматическое выставление оценок «удовлетворительно» может приходиться на заявки с явным нарушением сроков или содержания, при наличии риска неизменения впоследствии оценки потребителем, иными словами, возможны следующие варианты некорректной оценки оказанных услуг конечным пользователем (таблица).

Для определения адекватности оценки можно применить такой инструмент анализа методов измерений, как каппа-анализ [5]. Для этого нами было отобрано 30 обращений, в которых пользователь был удовлетворен, и 30 обращений, в которых пользователь поставил оценку 2 и ниже (методика расчета каппа-статистики подразумевает выборку в диапазоне 20 ÷ 50 для каждого варианта). На основании записей журнала обработки обращения, а также анализа соблюдения контрольных сроков оценки были откорректированы независимым экспертом. Результаты показаны на рис. 3, а.

Данные рис. 3, а пересчитаны в доли от общего числа оцененных обращений (рис. 3, б).

Каппа для дискретных данных рассчитывается по формуле $K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$, где P_o — доля оценок,

в которых мнения эксперта и пользователей со-

■ Возможные отклонения в оценке конечного пользователя

Оценка выставлена потребителем	Оценка подразумевается	Вид ошибки	Пример
Неуд.	Уд.	Субъективный подход	Требования потребителя в принципе невыполнимы, например из-за корпоративной политики безопасности
Уд.	Неуд.	Невнимательность Субъективный подход	Пользователь поставил оценку или не стал менять выставленную автоматически, при этом обращение выполнено с существенным нарушением сроков и/или выполнено не в полном объеме

а)

		Оценка потребителя		
		Удовлетворен	Неудовлетворен	
Экспертная оценка	Хорошо	29	3	32
	Плохо	1	27	28
		30	30	

б)

		Оценка потребителя		
		Удовлетворен	Неудовлетворен	
Экспертная оценка	Хорошо	0,48	0,05	0,53
	Плохо	0,02	0,45	0,47
		0,50	0,50	

■ Рис. 4. Матрица оценок в абсолютном (а) и относительном (б) выражении

впали (иными словами: сумма по диагонали, см. рис. 3, б), а P_c — доля оценок пользователя «удовлетворительно», умноженная на долю оценок эксперта «хорошо», плюс доля пользовательских оценок «неудовлетворительно», умноженная на долю оценок, низко оцененных экспертом.

Отсюда получаем $P_o = 0,48 + 0,45 = 0,93$, $P_c = 0,53 \times 0,50 + 0,47 \times 0,50 = 0,50$. Следовательно, $K = 0,87$, что выше минимально допустимого уровня 0,7 и находится на уровне лучших практик (0,85). По данному результату можно сделать

вывод, что используемая измерительная система является приемлемой.

Заключение

Таким образом, предложенная методика количественной оценки удовлетворенности потребителей является допустимой и может быть применена для решения как рассмотренной, так и аналогичных задач управления качеством услуг.

Литература

1. ИТ Сервис-менеджмент. Вводный курс на основе ITIL. 2-е изд. — Amersfoort: Wilco Printers, 2005. — 292 с.
2. Брукс П. Метрики для управления ИТ-услугами: пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. — 283 с.
3. CobIT 4.1. — USA: The IT Governance Institute, 2007. — 197 p.
4. Brusee W. Statistics for six sigma made easy. — USA: McGraw-Hill, 2004. — 252 p.
5. George M., Rowlands D., Price M., Maxey J. The Lean Six Sigma Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to Nearly 100 Tools for Improving Process Quality, Speed, And Complexity. — USA: George Group, 2005. — 282 p.

**АБДУЛКАДЕР
Бассам
Ахмед Махмуд**



Гражданин Йемена. Аспирант кафедры систем автоматизации проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2009 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — параметрические модели конструкторских деталей, сборок и чертежей. Эл. адрес: alnawras91@mail.ru

**АЛПАТОВ
Борис
Алексеевич**



Профессор, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета, заслуженный работник ВШ РФ. В 1972 году окончил Рязанский государственный радиотехнический институт по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций и 20 запатентованных изобретений. Область научных интересов — обработка изображений, замкнутые системы автоматического сопровождения объектов по данным видеонаблюдения. Эл. адрес: aitu@rsreu.ru

**АЛЬ-ШАЙХ
Хасан
Абдулла Ахмед**



Гражданин Йемена. Аспирант кафедры систем автоматизации проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2007 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — теория параметризации, системы параметризации и модификации конструкторских объектов, методы формирования параметрических моделей деталей, сборочных конструкций и чертежей, программирование на языке AutoLisp. Эл. адрес: shaikh2006@mail.ru

**АРТЮХИНА
Вероника
Анатольевна**



Аспирант кафедры авиационного приборостроения Уфимского государственного авиационного технического университета. В 2008 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Электроника и микроэлектроника». Является автором 13 научных публикаций. Область научных интересов — информационные технологии управления сложными техническими системами. Эл. адрес: cause@mail.ru

**АТАНОВ
Виктор
Алексеевич**



Доцент кафедры электротехники и технической диагностики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Инженер-электромеханик». В 1971 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций. Область научных интересов — электротехника, техническая диагностика. Эл. адрес: efa33@aanet.ru

**БАЛАШОВ
Олег
Евгеньевич**



Доцент кафедры автоматизации и информационных систем в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета, лауреат гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых в 2009–2010 гг. В 2002 году окончил Рязанскую государственную радиотехническую академию. В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 36 научных публикаций и одного запатентованного изобретения. Область научных интересов — обработка изображений, управление замкнутыми системами автоматического сопровождения объектов. Эл. адрес: aitu@rsreu.ru

БАЛОНИН
Юрий
Николаевич



Инженер кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Область научных интересов — вычислительные методы, теория чисел.

Эл. адрес: tomaball@mail.ru

БЕРЕЗКИН
Алексей
Владимирович



Аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2009 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, получив степень магистра техники и технологии.

Является автором шести научных публикаций.

Область научных интересов — отказоустойчивые системы, встраиваемые системы (в том числе системы тестирования), системы на кристалле, моделирование программного и аппаратного обеспечения.

Эл. адрес: a.v.berезkin@gmail.com

БРИТОВ
Георгий
Семенович



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

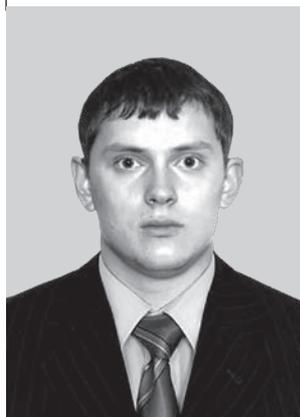
В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение».

В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем.

Эл. адрес: bgs@ibi.metrocom.ru

ВАГАНОВ
Михаил
Александрович



Ассистент, младший научный сотрудник, аспирант кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Телекоммуникации».

Является автором 14 научных публикаций и двух запатентованных изобретений.

Область научных интересов — оптическая спектроскопия, теория сигналов, теория линейных систем, волоконная оптика.

Эл. адрес: ma.vaganov@gmail.com

ВУЛЬФИН
Алексей
Михайлович



Аспирант факультета информатики и робототехники Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 2008 году окончил Уфимский государственный нефтяной технический университет по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». Является автором десяти научных публикаций.

Область научных интересов — нейросетевые технологии, интеллектуальные автоматизированные системы.

Эл. адрес: vulfin.alexey@gmail.com

ДУБИНИН
Евгений
Александрович



Соискатель кафедры прикладной математики и информатики Ставропольского государственного университета.

В 2004 году окончил Ставропольский государственный университет по специальности «Организация и технология защиты информации».

Область научных интересов — анализ информационных рисков, теория нечетких множеств, информационная безопасность.

Эл. адрес: lonely-star@yandex.ru

ЕФАНОВ
Владимир
Николаевич



Профессор, заведующий кафедрой авиационного приборостроения Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 1973 году окончил Уфимский авиационный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Промышленная электроника». В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 300 научных публикаций и 30 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — информационные технологии управления сложными техническими системами.

Эл. адрес: efanov@mail.rb.ru

ЗЯБЛОВ
Виктор
Васильевич



Профессор, заведующий лабораторией информационных технологий передачи, анализа и защиты данных Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН.

В 1961 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана.

В 1979 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 200 научных публикаций, в том числе четырех монографий и семи запатентованных изобретений.

Область научных интересов — теория информации, теория кодирования.

Эл. адрес: zyablov@iitp.ru

КОНДРАШОВ
Константин
Александрович



Аспирант, младший научный сотрудник Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН.

В 2010 году окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем».

Является автором четырех научных публикаций.

Область научных интересов — теория информации, теория кодирования.

Эл. адрес: k_kondrashov@iitp.ru

ЛЯЧЕК
Юлий
Теодосович



Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1963 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

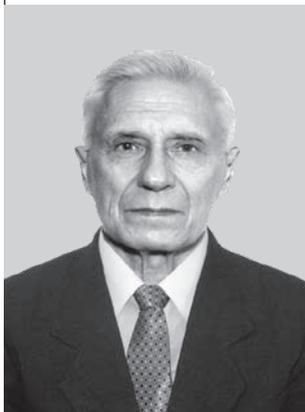
В 1975 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 140 научных публикаций и пяти авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — теория параметризации, компьютерная графика, методы проектирования топологических схемотехнических систем.

Эл. адрес: ytlyachek@mail.ru

МОСКАЛЕЦ
Олег
Дмитриевич



Доцент кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1961 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Радиотехника».

В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 120 научных публикаций и пяти запатентованных изобретений.

Область научных интересов — теория сигналов, теория линейных систем, спектрально-корреляционный анализ сигналов, квантовая физика.

Эл. адрес: molegd@mail.ru

МУРАВЬЕВ
Вадим
Сергеевич



Научный сотрудник кафедры автоматики и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета.

В 2003 году окончил Рязанский государственный радиотехнический университет по специальности «Управление и информатика в технических системах».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 27 научных публикаций.

Область научных интересов — обработка и анализ изображений, опτικο-электронные системы.

Эл. адрес: vad.muraviev@yandex.ru

**МУРАВЬЕВ
Сергей
Иванович**



Доцент кафедры автоматики и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета.
В 1974 году окончил Рязанский государственный радиотехнический институт.
В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и изобретений. Область научных интересов — методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов и изображений, разработка высокоточных следящих систем.
Эл. адрес: aitu@rsreu.ru

**СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович**



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.
В 2001 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина).
В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, 13 запатентованных изобретений. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, оптико-информационные системы.
Эл. адрес: ius@aanet.ru

**СТЕПАШКИН
Алексей
Иванович**



Доцент кафедры автоматики и информационных систем в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ.
В 1963 году окончил Рязанский государственный радиотехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика».
В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 110 научных публикаций и 20 запатентованных изобретений. Область научных интересов — обработка изображений, замкнутые системы автоматического сопровождения объектов по данным видеонаблюдения.
Эл. адрес: aitu@rsreu.ru

**ТУШАВИН
Владимир
Александрович**



Ассистент кафедры экономики и финансов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, в 2010 году — Московский технологический институт «ВТУ».
В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Является автором 30 научных публикаций и двух запатентованных изобретений. Область научных интересов — проектный менеджмент, стандартизация и управление качеством продукции, управление предприятием.
Эл. адрес: v.tushavin@omzglobal.com

**ФЕДЕРЯКОВ
Александр
Сергеевич**



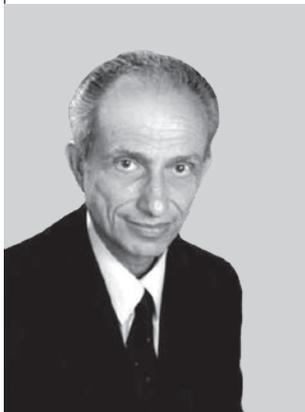
Ведущий программист ООО «Информационные технологические системы», аспирант Российского нового университета.
В 2007 году окончил Российскую экономическую академию им. Г. В. Плеханова по специальности «Информационные системы».
Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — сложные информационные системы, искусственный интеллект, трехмерная графика, рынок ценных бумаг.
Эл. адрес: dastranger@mail.ru

**ФИЛИППОВ
Алексей
Семенович**



Доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
В 1973 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина.
В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — программируемая логика, автоматизированное проектирование встраиваемых систем.
Эл. адрес: filippov@eda-lab.ftk.spbstu.ru

**ФРИД
Аркадий
Исаакович**



Профессор кафедры вычислительной техники и защиты информации Уфимского государственного авиационного технического университета, заслуженный изобретатель республики Башкортостан.

В 1968 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Авиационное приборостроение».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций, 75 патентов и свидетельств на изобретения. Область научных интересов — адаптивные системы управления, интеллектуальные информационно-управляющие системы, отказоустойчивость информационно-управляющих систем. Эл. адрес: arkfrid@mail.ru

**ФУРТАТ
Игорь
Борисович**



Доцент кафедры математики в инженерном образовании Астраханского государственного технического университета.

В 2005 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 34 научных публикаций и одной зарегистрированной программы для ЭВМ. Область научных интересов — теория систем управления, адаптивное управление, робастное управление, оптимальное управление, управление динамическими сетями, нелинейное управление. Эл. адрес: cainenash@mail.ru

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

УДК 681.518.3

Прогнозирование угловых координат движущихся объектов в бортовых оптико-механических системах

Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 2–7.

Предлагается алгоритм прогнозирования направления на сопровождаемый объект, движущийся в пространстве равномерно по линейной траектории, при отсутствии информации о дальности.

Ключевые слова — оптико-механическая система, сопровождение объектов, прогнозирование.

Список лит.: 4 назв.

УДК 621.391.268

Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов на изображениях

Муравьев В. С., Муравьев С. И. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 8–14.

Описан алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов, построенный на оценивании параметров авторегрессионной модели фона с помощью процедуры адаптивной пространственной фильтрации. На основе данного подхода разрабатывается модифицированный вариант алгоритма. Приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований.

Ключевые слова — воздушный объект, обнаружение, выделение, адаптивная фильтрация, авторегрессионная модель фона.

Список лит.: 10 назв.

УДК 629.735.33

Параллельный анализ спектра динамических сигналов

Ваганов М. А., Москалец О. Д. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 15–22.

Рассматривается измерение энергетических спектров оптических сигналов спектральным прибором нового типа. Разрешающей системой этого анализатора спектра является многоканальная селективная система, включающая в себя набор узкополосных оптических фильтров и группу оптических волокон, служащую линией передачи анализируемых сигналов. Дается теоретический анализ параллельного метода анализа спектра. Приводятся описание лабораторного макета параллельного анализатора спектра оптических сигналов и результаты экспериментальных измерений.

Ключевые слова — многоканальная селективная система, параллельный анализ спектра, комплексный спектр, оценка энергетического спектра, матричная аппаратная функция, оптический фильтр, оптическое волокно.

Список лит.: 15 назв.

УДК 681.518.3

Angular Coordinates Prediction of Moving Objects in Optical Mechanical Systems

Alpatov B. A., Balashov O. E., Stepashkin A. I. IUS, 2011. N 5. P. 2–7.

An algorithm of prediction of angular object coordinates in the absence of distance information is described. It is assumed that the tracking object moves linearly and uniformly in space. The results of experimental research are also presented.

Keywords — Objects Tracking, Predictor Angular Coordinates.

Refs: 4 titles.

УДК 621.391.268

An Adaptive Algorithm of Aerial Object Extraction and Detection on Images

Muraviev V. S., Muraviev S. I. IUS, 2011. N 5. P. 8–14.

In this paper, an aerial object extraction and detection algorithm is introduced. The idea of the approach is based on estimation of the autoregressive model parameters with the use of the adaptive spatial filtering technique. A modified algorithm is also presented in this work. The presented experimental results show high reliability characteristics.

Keywords — Aerial Object, Detection, Extraction, Adaptive Filtering, Autoregressive background Model.

Refs: 10 titles.

УДК 629.735.33

Parallel Spectrum Analysis of Dynamic Signals

Vaganov M. A., Moskaletz O. D. IUS, 2011. N 5. P. 15–22.

Measurement of an energy spectrum of optical signals with a spectral device of a new class, that represents a multivariate resonator system, is discussed. A parallel spectrum analyzer of optical signals is considered as the multivariate resonator system. The resolving system of this spectrum analyzer is realized as a set of optical filters. The optical fiber is used as a transmission line of analyzed optical signals. A theoretical analysis describing this device is presented. Furthermore, development of the laboratory set-up of this spectral device and the results of experimental research work are presented as well.

Keywords — Multivariate Resonator System, Parallel Spectrum Analysis, Complex Spectrum, Estimation of an Energy Spectrum, Matrix Spectrum Spread Function, Optical Filter, Optical Fiber.

Refs: 15 titles.

УДК 519.7

Робастная синхронизация динамической сети с переключающейся структурой

Фуртат И. Б. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 23–30.

Получен алгоритм робастного управления динамической сетью с переключающейся структурой, когда измерению доступны только выходы локальных подсистем, но не их производные. Предполагается, что математические модели подсистем сети описываются линейными дифференциальными уравнениями, подверженными действию внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. Полученная схема управления обеспечивает синхронизацию сети с требуемой точностью. Работоспособность полученной схемы проиллюстрирована на численном примере сети, состоящей из четырех узлов.

Ключевые слова — динамическая сеть, оргграф, граф, синхронизация сети, компенсация возмущений.

Список лит.: 16 назв.

UDK 519.7

Robust Synchronization of Dynamic Network with Switching Structure

Furtat I. B. IUS, 2011. N 5. P. 23–30.

An algorithm of robust control of dynamical network with switching topology is developed for cases when only scalar outputs of local subsystems are available for measurement. Its subsystems are described with parametrically and functionally uncertain linear differential equations. The resulting control scheme enables to synchronize the network with the required accuracy. The efficiency of the algorithm is illustrated by an example of a numerical network consisting of four nodes.

Keywords — Dynamical Network, Digraph, Graph, Synchronization Network, Compensation of Disturbances.

Refs: 16 titles.

УДК 004.896

Нейросетевая модель анализа технологических временных рядов в рамках методологии Data Mining

Вульфин А. М., Фрид А. И. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 31–38.

Решается задача выявления и распознавания технологических событий и состояний узла инженерной сети на основе анализа временных рядов, характеризующих протекающие на объекте процессы. Поэтапно решаются задачи предобработки исходных данных, сегментации временных рядов, кластеризации и классификации имеющихся данных и построения нейросетевой модели для анализа состояния объекта в рамках методологии Data Mining.

Ключевые слова — адаптивная сегментация, распределенная нейронная сеть с временной задержкой, метод обобщенного отношения правдоподобия, временной ряд.

Список лит.: 7 назв.

UDK 004.896

Neuralbase Model Analysis of Technological Time Series within the Scope of Data Mining Strategy

Vulfin A. M., Frid A. I. IUS, 2011. N 5. P. 31–38.

The article considers the problem of detection and recognition of technological events and engineering network node states on the basis of technological time series analysis. Development of the heterogeneous neural network module of the object condition diagnosing within the scope of Data Mining strategy for technological time series segmentation, clustering and classification of the available data are described.

Keywords — Adaptive Segmentation, Extended Generalized Likelihood Ratio, Distributed Time Lagged Feedforward Network, Time Series.

Refs: 7 titles.

УДК 681.3

Установление связей между элементами базовой сети при параметризации чертежей

Абдулкадер Б. А., Аль-Шайх Х. А., Лячек Ю. Т. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 39–46.

Рассмотрены проблемы создания параметрической модели любого чертежа путем определения количественных связей между элементами базовой сети, образованной характерными точками основных графических примитивов. Создание модели ведется на основе обработки размерных обозначений, установленных на этом чертеже в соответствии с методом аналитико-синтетической параметризации. Изложены особенности алгоритмов обработки различных размерных обозначений, имеющих на чертеже. Установление связей служит для обеспечения модификации чертежа с учетом задания новых значений параметров.

Ключевые слова — параметризация, модификация, чертеж, электронное представление, базовая сеть, графические примитивы, размерное обозначение, связь элементов сети.

Список лит.: 4 назв.

УДК 004.4'244

Методика синтеза спецификаций на языке UML для верификации обмена данными в аппаратуре

Березкин А. В., Филиппов А. С. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 47–52.

Разработанная ранее авторами методика синтеза спецификаций на UML для тестирования потока управления позволяет определять поведение устройства на уровне последовательности управляющих сигналов. Созданные в соответствии с ней спецификации могут быть преобразованы в наблюдающие тесты, которые проверяют соответствие спецификаций реальному поведению устройства. В настоящей статье методика развивается и дополняется для реализации возможности специфицирования и тестирования потока данных в аппаратных системах.

Ключевые слова — UML, моделирование аппаратуры, верификация, тестирование.

Список лит.: 6 назв.

УДК 681.3

Making Connections Between Components of the Basic Network in Drawings Parameterization

Abdulkader Bassam Achmed, Al-Shaich Hasan, Lyachek Yu. T. IUS, 2011. N 5. P. 39–46.

The problems of creating a parametric model of drawings on the basis of the creation of its core network are discussed. The core network is formed using the characteristic points of the basic graphics primitives of the draft. Creating the model is based on the method of the analytic-synthetic parameterization using the processing of size designations employed in the drawings. Features of algorithms for processing various dimensions on the engineering drawings are presented. Defining relationships between elements of the core network is used for modifications of the engineering drawings with the new values of dimensions.

Keywords — Parameterization, Modification, Drawing, Electronic View, Basic (Core) Network, Graphic Elements, Dimensions, Connections Between Components of the Basic Network.

Refs: 4 titles.

УДК 004.4'244

UML Specification Synthesis Methodology for Data Flow Testing in Hardware

Berezkin A. V., Filippov A. S. IUS, 2011. N 5. P. 47–52.

UML specification synthesis methodology for control of flow testing has been developed in the authors' previous work. This methodology allows defining device behavior as a control signals sequence. Specifications created according to this methodology can be translated into tracing tests that match specifications against observed signals. In this paper the methodology is extended in order to achieve a possibility of data flow testing in hardware.

Keywords — UML, Hardware Modeling, Verification, Testing.

Refs: 6 titles.

УДК 621.391.15

Конструкция плетеных сверточных кодов на базе кодов проверки на четность с одним проверочным символом

Кондрашов К. А., Зяблов В. В. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 53–60.

Предлагается новая конструкция плетеных сверточных кодов с малой плотностью проверок, разработанная на основе кодов проверки на четность с одним проверочным символом. Использование последних в качестве кодов-компонентов позволяет естественным образом варьировать результирующую скорость кода предложенной конструкции без изменения кодера и декодера и уменьшает сложность декодирования. Для декодирования предлагаются два итеративных алгоритма с жестким принятием решений: мажоритарный алгоритм и мажоритарный алгоритм с введением стираний. Выполняется исследование корректирующих свойств при заданных алгоритмах декодирования.

Ключевые слова — сверточные коды, плетеные коды, МПП-коды, коды проверки на четность, кодирование, итеративное декодирование, свободное расстояние, активное строчное расстояние.

Список лит.: 9 назв.

УДК 62-83:621

Устройства функционального диагностирования электроприводов

Атанов В. А., Бритов Г. С. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 61–65.

Рассматриваются устройства функционального диагностирования электропривода, позволяющие обнаружить дефекты, возникающие при его функционировании. Предложено автоматизировать процедуру синтеза устройства функционального диагностирования минимальной размерности, построив систему моделирования исследуемого электропривода и устройства диагностирования.

Ключевые слова — диагностика, непрерывный контроль, моделирование, электропривод.

Список лит.: 10 назв.

УДК 621.391.15

Two Binary Woven Convolutional Code Constructions

Kondrashov K. A., Zyablov V. V. IUS, 2011. N 5. P. 53–60.

In this contribution, a new construction of binary low-density parity-check (LDPC) woven convolutional codes is discussed. In this construction, component codes with single parity check are used. The latest allows woven code rate adaptation without changing corresponding encoder and decoder and decreases computational complexity. An iterative hard decision decoding algorithm and its modification with erasures insertion is introduced. Code properties and decoding performances are studied.

Keywords — Convolutional Codes, LDPC Codes, Encoding, Iterative Hard Decision Decoding, Free Distance, Active Row Distance.

Refs: 9 titles.

УДК 62-83:621

A System of Functional Diagnostics of Electric Drives
Atanov V. A., Britov G. S. IUS, 2011. N 5. P. 61–65.

A system that detects defects in electric drives during operation is examined. It is offered to automate the process of synthesis of the diagnostic set of minimum dimension. A system for simulation of electric drives and the diagnostic set have been developed.

Keywords — Diagnostic, Simulation, Electric Drive.

Refs: 10 titles.

УДК 339.1

Информационные технологии в задаче анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений

Артюхина В. А., Ефанов В. Н. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 66–75.

Рассматривается роль информационных технологий в задаче анализа и прогнозирования организационно-экономического состояния корпоративных объединений на примере предприятий российского авиапромышленного комплекса. Предлагается методика построения экономико-математической модели корпоративного объединения.

Ключевые слова — информационная технология, экономико-математическая модель, корпорация, идентификация, ортогональный ряд.

Список лит.: 5 назв.

УДК 004.043

Методика получения нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на информационную систему

Дубинин Е. А. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 76–80.

Предложена методика построения нечеткого множества уровня воздействия класса угроз на информационную систему использует мнение экспертов в области информационной безопасности. Каждым экспертом формируются начальные нечеткие множества уровня воздействия определенной угрозы на информационную систему, которые обобщаются в нечеткие множества суммарного воздействия всего класса угроз.

Ключевые слова — угроза, информационная безопасность, информационная система, нечеткое множество, ущерб.

Список лит.: 8 назв.

УДК 004.05

Исследование влияния новостного фона на котировки ценных бумаг при различном составе участников рынка

Федеряков А. С. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 81–86.

Рассматривается задача изучения влияния новостного фона при различном составе участников рынка на динамику цен акций и другие экономические показатели. Для решения этой задачи используется метод имитационного моделирования на основе мультиагентного подхода.

Ключевые слова — динамическая модель, мультиагентная система, новостной фон, рынок ценных бумаг.

Список лит.: 9 назв.

УДК 339.1

Information Technology in the Task of Organizational-Economic Condition's Analysis and Forecasting for Corporate Bodies

Artyukhina V. A., Efanov V. N. IUS, 2011. N 5. P. 66–75.

The role of information technology in the task of organizational-economic condition's analysis and forecasting for corporate bodies is discussed by an example of the Russian aircraft industry companies. A technique of creating a corporate body economic and mathematical model is offered.

Keywords — Information Technology, Economic Model, Mathematical Model, Corporation, Identification, Orthogonal Series.

Refs: 5 titles.

УДК 004.043

Procedure of Receiving a Fuzzy Set of the Level of Influence of the Threat Class on Information System

Dubinina E. A. IUS, 2011. N 5. P. 76–80.

The suggested procedure of construction of a fuzzy set of the level influences of a threat class on information system uses expert opinions in the field of information security. Each expert shapes initial fuzzy sets of the level of influence of a certain threat on information system that are generalized in fuzzy sets of total influence of the entire class of threats.

Keywords — Threat, Information Security, Information System, Fuzzy Set, Damage.

Refs: 8 titles.

УДК 004.05

Influence of News Background on Share Prices in Scenarios with Difference Market Participants

Federyakov A. S. IUS, 2011. N 5. P. 81–86.

The article focuses on analyzing the influence of news background on market share prices and other economic parameters in scenarios with difference market participants. The main instrument in this research is a dynamic model of the stock market developed using a multiagent approach. The idea is to create a virtual world, populate it with virtual agents, and conduct experiments upon this model.

Keywords — Control, Dynamic Model, Multiagent System, News Background, Stock Market.

Refs: 9 titles.

УДК 512.643.8

М-матрица 22-го порядка

Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 87–90.

Публикуется отсутствующая в ряде С-матриц шестиуровневая ортогональная матрица 22-го порядка с минимальным по норме максимальным элементом. Рассматриваются ее свойства, приводится анализ системы алгебраических уравнений для значений ее элементов, указываются метод нахождения матрицы и дополнительные неоптимальные решения, близкие по структуре к матрицам Белевича.

Ключевые слова — минимаксные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича.

Список лит.: 7 назв.

УДК 65.015.3

Инженерная методика количественной оценки удовлетворенности потребителей

Тушавин В. А. Информационно-управляющие системы, 2011. № 5. С. 91–93.

Рассматривается практический подход к менеджменту качества службы технической поддержки и управлению инцидентами с использованием показателя удовлетворенности потребителей.

Ключевые слова — управление инцидентами, качество оказания услуг, удовлетворенность пользователей, капта-статистика.

Список лит.: 5 назв.

УДК 512.643.8

M-Matrix of the 22nd Order

Balonin Yu. N., Sergeev M. B. IUS, 2011. N 5. P. 87–90.

An orthogonal six-level matrix of 22nd order with a minimal by norm maximum element, absent in the line of C-matrixes, is presented. Its properties are examined. An analysis of a system of algebraic equations for its elements' values is produced, and a method of finding the matrix is developed. Additional non-optimum decisions, close in structure to the Belevich matrixes, are found.

Keywords — Minimax Matrixes, Hadamard Matrixes, Belevitch Matrixes.

Refs: 7 titles.

УДК 65.015.3

End User Satisfaction Quality Management

Tushavin V. A. IUS, 2011. N 5. P. 91–93.

This article discusses a practical approach to quality management of Service Desk and incidents using an indicator of end users satisfaction.

Keywords — Incident Management, Service Quality, End User Satisfaction, Customer Satisfaction, Kappa Statistic.

Refs: 5 titles.

ЖУРНАЛ

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 1684-8853



Адрес: 190000, Санкт-Петербург,
Большая Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ.
Тел.: (812) 494-70-02. Эл. почта: 80x@mail.ru

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья), начиная с № 1, 2002 г. и далее, вы можете подписаться на сайте **РУНЭБ**:
<http://www.elibrary.ru>

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:
«РОСПЕЧАТЬ»: № 48060 – годовой индекс, № 15385 – полугодовой индекс;

а также посредством:

«СЕВЕРО-ЗАПАДНОЕ АГЕНТСТВО „ПРЕССИНФОРМ“»

Эл. почта: press@crp.spb.ru zajavka@crp.spb.ru
Сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-ПЕРИОДИКА» (РФ + 90 стран)

Эл. почта: export@periodicals.ru
Сайт: <http://www.periodicals.ru>

«АРТОС-ГАЛ»

Сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕРПОЧТА»

Эл. почта: interpochta@interpochta.ru
Сайт: <http://www.interpochta.ru>

«УРАЛ-ПРЕСС» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«ИНФОРМНАУКА» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Эл. почта: Alfimov@viniti.ru
Сайт: <http://www.informnauka.com>

«АГЕНТСТВО „ГАЗЕТЫ В РОЗНИЦУ“» (Екатеринбург)

Эл. почта: box@e-rospechat.ru
Сайт: <http://e-rospechat.ru>

«КОММЕРСАНТ-КУРЬЕР» (Казань)

Эл. почта: kazan@komcur.ru
Сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan>

«ИДЕЯ» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

Возможно оформление редакционной подписки,
как на текущий год, так и на все вышедшие в свет номера журнала,
по заявке организации или частного лица:

по эл. почте: 80x@mail.ru

по телефону: (812) 494-70-02

по почте: 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ,
Редакция журнала «Информационно-управляющие системы».

После оплаты счета мы высылаем заказанные номера журнала.

При необходимости высылаем журнал наложенным платежом.

Выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров): для подписчиков России – 3600 рублей,
для зарубежных подписчиков – 4200 рублей, включая НДС 18 %, таможенные
и почтовые расходы.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

