

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Выпуск 175

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
Основан в 1965 г.

КИЕВ 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и системы

Файнзильберг Л.С., Минина Е.Н. Оценка функционального состояния
сердечно-сосудистой системы по величине разброса фазовых
траекторий одноканальной ЭКГ 5

Вовк М.И., Галян Е.Б., Подопрigора Е.Н. Информационная технология
управления движениями кисти для восстановления моторного
компонента речи 20

Сложные системы управления

Доценко С.И., Негадайлов П.А. Об оптимальном порядке просмотра групп в
задаче выбора наилучшего элемента с групповым просмотром
кандидатов 31

Дискретные системы управления

Гуммель А.В. Исследование процесса управления, синтезированного по
приближенной идентифицированной модели 40

Эргатические системы управления

Павлов В.В., Шелетуха Ю.М. Проблемы анализа и синтеза
сетцентрических систем 52

Тризна А.А., Янкова С.А. Области применения показателей эксплуатации
воздушных судов и их обоснование способом обобщенных энтропий 63

Биологическая и медицинская кибернетика

Кочина М.Л., Нессонова М.Н. Методы оценки степени тяжести состояния
пациентов 73

Abstracts 88

Авторы номера 95

УДК 681.5 + 621.391:01

В сборнике представлены результаты исследований в области теории и практики информационных технологий, эргатических систем управления, биологической и медицинской кибернетики, а также рассматриваются актуальные вопросы дискретных систем управления.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

У збірнику надано результати досліджень у галузі теорії та практики інформаційних технологій, ергатичних систем керування, біологічної та медичної кибернетики, а також розглядаються актуальні питання дискретних систем керування.

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів і студентів вузів відповідних спеціальностей.

The results of research in the field of theory and practice of information technologies systems and ergatic control systems and biological and medical cybernetics are presented. Consideration is also given to the topical problems of discrete control systems.

It is intended for researchers, practical engineers, post-graduate students of corresponding specialities.

Редакционная коллегия:

И.В. Сергиенко, акад. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. (ответственный редактор сборника),

В.И. Гриценко, к.т.н., проф. (ответственный редактор сборника),

Л.М. Козак, д.б.н. (заместитель ответственного редактора сборника),

Н.Л. Дробышева, к.филол.н. (ответственный секретарь сборника),

В.М. Кунцевич, акад. НАНУ, д.т.н., проф. (ответственный редактор раздела),

А.А. Чикрий, чл.-к. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. (ответственный редактор раздела),

В.В. Павлов, д.т.н., проф. (ответственный редактор раздела),

В.М. Белов, д.м.н., проф. (ответственный редактор раздела),

Научные разделы:

Дискретные системы управления

Сложные системы управления

Эргатические системы управления

Медицинская и биологическая кибернетика

Информационные технологии и системы

Сборник научных трудов «Кибернетика и вычислительная техника» включен в перечень профильных изданий ВАК Украины по биологическим, медицинским, техническим и физико-математическим наукам.

Редакционный совет:

д.т.н. В.В. Волосов, д.т.н., проф. Ф.Г. Гаращенко, д.м.н., проф. М.В. Голубчиков, д.т.н., чл.-к. НАНУ, проф. В.Ф. Губарев, д.ф.-м.н., чл.-к. НАНУ, проф. А.М. Гупал, д.ф.-м.н., проф. В.Е. Капустян, д.б.н. С.И. Кифоренко, д.м.н. А.С. Коваленко, д.б.н., проф. А.Б. Котова, д.ф.-м.н., проф. В.Б. Ларин, д.т.н. Д.В. Лебедев, д.б.н. Е.Г. Лябах, д.ф.-м.н., проф. А.Г. Наконечный, д.м.н., проф. Г.А. Слабкий, д.ф.-м.н., проф. Д.Я. Хусаинов

Утверждено к печати ученым советом
Международного научно-учебного центра
информационных технологий и систем НАН Украины
и Министерства образования и науки Украины
План выпуска 2014 г.

Адрес редколлегии:
03680 Киев ГСП, просп. Академика Глушкова, 40
Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем НАН Украины
и Министерства образования и науки Украины
Тел: 503 95 62. E-mail: kvf@irtc.org.ua

Редактор *Н.Л. Дробышева*. Компьютерная верстка *А.В. Тупальский*

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12649-1533Р от 14.05.2007

КИБЕРНЕТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Issue 175

INTERDEPARTMENTAL COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS
Founded in 1965

KIEV 2014

TABLE OF CONTENTS

Information technologies and systems

Fainzilberg L.S., Minina E.N. Evaluation of the functional state of the cardiovascular system using magnitude variation of the phase trajectories of single-channel ECG 5

Vovk M.I., Galyan Ye.B., Podoprigora E.N. Information technology for movement control of the hand used to restore the motor component of speech..... 20

Complex control systems

Dotsenko S.I., Negadailov P.A. On optimal search order in the group secretary problem..... 31

Discrete control systems

Gummel A.V. Study of a control process synthesised using approximate model which is identified under bounded error conditions..... 40

Ergatic control systems

Pavlov V.V., Shepetukha Y.M. Issues of net-centric systems analysis and synthesis..... 52

Trizna A.A., Yankova S.A. Areas of practical application of indices of aircrafts maintenance and their ground by method of the generalized entropies..... 63

Biological and medical cybernetics

Kochina M.L., Nessonova M.N. Methods to estimate patient's grade of severity..... 73

Abstracts 88

Our authors 95

КІБЕРНЕТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

CYBERNETICS AND COMPUTER ENGINEERING

Випуск 175

МІЖВІДОМЧИЙ ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Заснований у 1965 р.

КИЇВ 2014

ЗМІСТ

Інформаційні технології та системи

- Файнзільберг Л.С., Мініна О.М.* Оцінка функціонального стану серцево-судинної системи за величиною розкиду фазових траєкторій одноканальної ЕКГ 5
- Вовк М.І., Галян Є.Б., Підпригора О.М.* Інформаційна технологія керування рухами китиці при відновленні моторного компонента мовлення..... 20

Складні системи керування

- Доценко С.І., Негадайлов П.А.* Про оптимальний порядок проглядання груп в задачі вибору найкращого елемента з груповим прогляданням кандидатів..... 31

Дискретні системи керування

- Гуммель О.В.* Дослідження процесу керування, синтезованого за наближеною ідентифікованою моделлю..... 40

Ергатичні системи керування

- Павлов В.В., Шелетука Ю.М.* Проблеми аналізу та синтезу мережецентричних систем..... 52
- Тризна О.О., Янкова С.О.* Области застосування показників експлуатації повітряних суден та їх обґрунтування методом узагальнених ентропій 63

Біологічна та медична кібернетика

- Кочина М.Л., Нессонова М.М.* Методи оцінки ступеня тяжкості стану пацієнтів..... 73

- Abstracts** 88

- Інформація про авторів** 95

Информационные технологии и системы

УДК 616.12-008.318.1

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ РАЗБРОСА ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОДНОКАНАЛЬНОЙ ЭКГ

Л.С. Файнзильберг¹, Е.Н. Минина²

¹*Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и Министерства образования и науки Украины*

²*Таврический Национальный университет имени В.И. Вернадского*

Рассмотрен новый подход к оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы при скрининговых обследованиях, основанный на анализе признаков фазового портрета одноканальной ЭКГ. Исследована диагностическая ценность показателя, характеризующего разброс траекторий ЭКГ на фазовой плоскости как дополнительного критерия оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Установлены гендерные и возрастные особенности этого показателя в покое и под нагрузкой.

Розглянуто новий підхід до оцінки функціонального стану серцево-судинної системи при скринінгових обстеженнях, заснований на аналізі ознак фазового портрету одноканальної ЕКГ. Досліджено діагностичну цінність показника, що характеризує розкид траєкторій ЕКГ на фазовій площині, як додаткового критерію оцінки функціонального стану серцево-судинної системи. Встановлено гендерні та вікові особливості цього показника у спокої та під навантаженням.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие средств вычислительной техники и информационных технологий положило основу новой отрасли — компьютерной электрокардиографии. Цифровые электрокардиографы в медицинской практике прошли несколько стадий своего развития. Первые изделия имели лишь одну, но очень важную функцию регистрации, отображения и хранения ЭКГ в цифровой форме. Второе поколение обеспечивало уже возможность автоматического распознавания информативных фрагментов ЭКГ (зубцов P , Q , R , S , T) и измерение традиционных электрокардиографических признаков. Затем появились цифровые электрокардиографы, в которых были встроены алгоритмы поддержки принятия решений врача-кардиолога, основанные на предшествующем многолетнем опыте визуальной интерпретации ЭКГ во временной области.

Безусловно применение таких изделий в амбулаторной и клинической практике облегчает труд медицинского персонала и сокращает время

© Л.С. Файнзильберг, Е.Н. Минина, 2013

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 175

получения результата диагностики. Однако компьютерная реализация *традиционных подходов* к обработке ЭКГ во временной области не обеспечила достижение главной цели — повышение достоверности результатов диагностики. Более того, опытные клиницисты часто по-прежнему предпочитали визуальную интерпретацию ЭКГ, не полностью доверяя компьютерным алгоритмам, которые, вследствие сложности реальных сигналов, иногда приводят к ошибкам еще на стадии измерения амплитудно-временных параметров.

Ситуация кардинально изменилась с появлением новых подходов к анализу и интерпретации ЭКГ, которые принципиально не могут быть реализованы без компьютерной обработки. Оказалось, что дополнительную диагностическую информацию можно получить при обработке ЭКГ в частотной области с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье и метода вейвлет-преобразований [1], с помощью которого удается обнаруживать тонкие изменения сигнала, в частности так называемые поздние потенциалы желудочков, которые невидимы на обычной ЭКГ. Получили известность также компьютерные алгоритмы, основанные на оценке предикторов внезапной сердечной смерти, таких как электрическая альтернация сердца [2] и турбулентность сердечного ритма [3].

Оригинальный подход к компьютерному анализу и интерпретации ЭКГ разработан в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины и реализован в аппаратно-программном комплексе ФАЗАГРАФ[®], который выпускается серийно. Этот подход основан на переходе от скалярного представления ЭКГ $z(t)$, регистрируемой во временной области, к векторному представлению в виде фазового портрета в координатах $z(t), \dot{z}(t)$, где $\dot{z}(t)$ — первая производная сигнала об электрической активности сердца [4].

Эффективность этого подхода при скрининге ишемической болезни сердца подтверждена многочисленными испытаниями, обобщенные результаты которых представлены в работе [5]. Клинические испытания подтвердили, что за счет использования дополнительного диагностического признака β_T , характеризующего симметрию фрагмента реполяризации усредненной фазовой траектории, удается повысить чувствительность и специфичность ЭКГ-диагностики при обработке сигнала одного отведения (первого стандартного) даже в тех случаях, когда традиционный анализ ЭКГ в 12 отведениях оказывается неинформативным [6].

Установлено, что анализ показателя β_T позволяет проводить оценку функциональных резервов миокарда [7]. Оказалось, что дополнительную диагностическую информацию несут и другие признаки фазового портрета ЭКГ, такие как угол α ориентации фазового портрета и параметр S_{TR} , характеризующий соотношение площадей петель зубца T и комплекса QRS на фазовой плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ [8].

В работе [9] впервые было описано еще одно свойство фазового портрета одноканальной ЭКГ. Обнаружено, что под действием физических нагрузок увеличивается *область рассеивания* точек фазового портрета, которая

уменьшается после прекращения нагрузки, причем время «восстановления» фазового портрета зависит от степени тренированности испытуемого.

Цель настоящей статьи – дальнейшие исследования, направленные на изучение диагностической ценности параметра, характеризующего величину разброса фазовых траекторий ЭКГ первого стандартного отведения при оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы у контингентов с различным уровнем адаптационного потенциала.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ЭКГ

Исследования проводились с использованием аппаратно-программного комплекса ФАЗАГРАФ[®], реализующего информационную технологию обработки ЭКГ первого стандартного отведения на фазовой плоскости.

В отличие от большинства известных работ [10], в которых фазовый портрет одноканальной ЭКГ изучается на плоскости $z(t), z(t - \tau)$, где $\tau = \text{const}$ — временная задержка, в комплексе ФАЗАГРАФ[®] реализованы процедура построения фазового портрета в координатах $z(t), \dot{z}(t)$, где $\dot{z}(t)$ — скорость изменения сигнала об электрической активности сердца в момент времени t . За счет этого учитываются не только амплитудные, но скоростные характеристики исследуемого процесса, на ценность которых указывалось в работах кардиологов [11–13].

Отображение ЭКГ в координатах $z(t), \dot{z}(t)$ можно пояснить как графоаналитический метод исследования динамической системы, состояние которой описывается двумя дифференциальными уравнениями

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = F(x_1, x_2), \quad (2)$$

где $x_1 = z(t)$ — выходная координата системы, в данном случае — амплитуда ЭКГ, измеренная в момент времени t , $x_2 = \dot{z}(t)$ — ее первая производная, а $F(x_1, x_2)$ — некоторая нелинейная функция.

Разделив (2) на (1), получим уравнение, в котором отсутствует время t в явном виде:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{F(x_1, x_2)}{x_2}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3)

$$x_2 = \Psi(x_1) \quad (4)$$

с учетом обозначений $x_1 = z(t)$ и $x_2 = \dot{z}(t)$ можно представить в виде зависимости

$$\dot{z}(t) = \Psi(z(t)), \quad (5)$$

которая определяет фазовую траекторию на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$. Циклический характер функции $x_1 = z(t)$ предопределяет форму фазового

портрета ЭКГ на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ — аттрактора в виде предельного цикла.

В том же случае, когда размерность фазового пространства $N > 2$ траекторию (5) можно интерпретировать как проекцию многомерного фазового портрета на плоскость $z(t), \dot{z}(t)$. Напомним, что в диссипативных системах с размерностью фазового пространства $N \geq 3$ возможен режим сложных непериодических пульсаций с появлением хаотического (странного) аттрактора [14].

Поскольку неизвестны аналитические выражения функций $x_1 = z(t)$ и $F(\cdot)$ будем строить фазовый портрет ЭКГ экспериментально, используя цифровую последовательность $z(t_k)$ дискретных значений наблюдаемого сигнала в моменты времени $t_k \equiv k\Delta$, $k = 0, 1, \dots, K-1$, где Δ — шаг квантования.

После предварительной обработки массива дискретных значений $z(t_k)$ (удаления дрейфа изоэлектрической линии, частотно-избирательной фильтрации и адаптивного сглаживания) удастся на основе процедуры численного дифференцирования с соответствующей процедурой регуляризации получать приемлемую оценку производных $\dot{z}(t_k)$ сигнала в дискретные моменты времени t_k [15, с. 157–160]. В результате формируется последовательность двумерных векторов (точек)

$$(z(t_0), \dot{z}(t_0)), (z(t_1), \dot{z}(t_1)), \dots, (z(t_{K-1}), \dot{z}(t_{K-1}))), \quad (6)$$

лежащих на фазовой плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ (рис. 1).

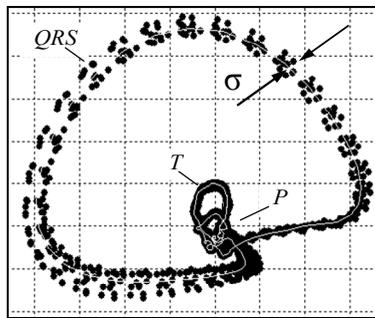


Рис. 1. Фазовый портрет ЭКГ на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ в виде периодического аттрактора

Фазовый портрет ЭКГ, подобно векторкардиограмме, содержит петли зубцов P , T и комплекса QRS (рис. 1), но, в отличие от традиционной векторкардиограммы, может быть построен по сигналу *одного отведения*, например первого стандартного отведения. Оригинальные компьютерные алгоритмы обработки ЭКГ, в том числе процедура оценки параметра σ , характеризующего величину разброса фазовых траекторий ЭКГ (рис. 1), описаны в работе [16].

БАЗОВЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ГИПОТЕЗЫ

Многочисленные наблюдения позволили обнаружить следующие свойства фазовых портретов ЭКГ:

1. В состоянии покоя у одного и того же испытуемого наблюдалась различная степень рассеивания точек фазового портрета (рис. 2): по сравнению с типичной формой периодического аттрактора (рис. 2, *а*) при субъективных жалобах пациента на усталость и дискомфорт в грудной клетке чаще всего наблюдалось увеличение величины разброса фазовых траекторий (рис. 2, *б*), расщепление («раздвоение») аттрактора (рис. 2, *в*) и даже переход от периодического к хаотическому (странному) аттрактору (рис. 2, *г*), что вызывало адекватные изменения значений параметра σ .

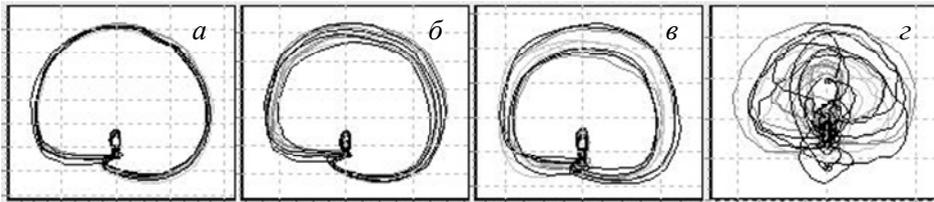


Рис. 2. Примеры фазовых портретов ЭКГ испытуемого Л. в покое

2. В процессе физических нагрузок (рис. 3) величина разброса фазовых траекторий увеличивалась, причем по сравнению с исходным состоянием (рис. 3, *а*) на высоте нагрузки (рис. 3, *б*) приращение параметра было тем больше, чем менее тренирован испытуемый. У нетренированных испытуемых увеличивалось также время реституции, необходимое для восстановления исходной формы фазового портрета (рис. 3, *в*).

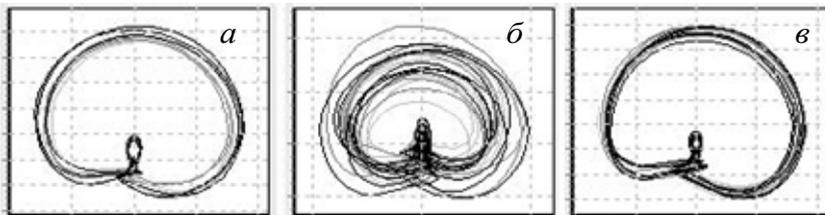


Рис. 3. Динамика изменения фазового портрета испытуемого Л. под нагрузкой: *а* — исходное состояние; *б* — на высоте нагрузки 150 Вт; *в* — после отдыха 15 минут

Эксперименты, проведенные с использованием генеративной модели порождения искусственной ЭКГ реалистической формы [4, с. 121], показали:

а) увеличение дисперсии параметров зубцов P , Q , R , S , T на последовательных сердечных циклах приводит к увеличению значений параметра σ (в частности, при увеличении дисперсии D_T амплитудно-временных параметров, характеризующих форму зубца T , увеличивается степень рассеивания точек соответствующей петли фазового портрета (рис. 4);

б) альтернация элементов ЭКГ, в частности чередование зубцов R с различной амплитудой на последовательных циклах, приводит к характерному раздвоению фазового портрета (рис. 2, *в*);

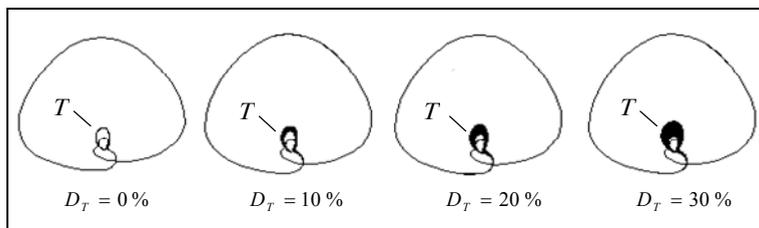


Рис. 4. Модельные эксперименты при различной дисперсии D_T амплитудно-временных параметров зубца T

в) при значительных вариациях амплитудно-временных параметров сердечных циклов, вызванных внутренними и внешними возмущениями, форма фазового портрета ЭКГ внешне напоминает странный аттрактор (рис. 5).

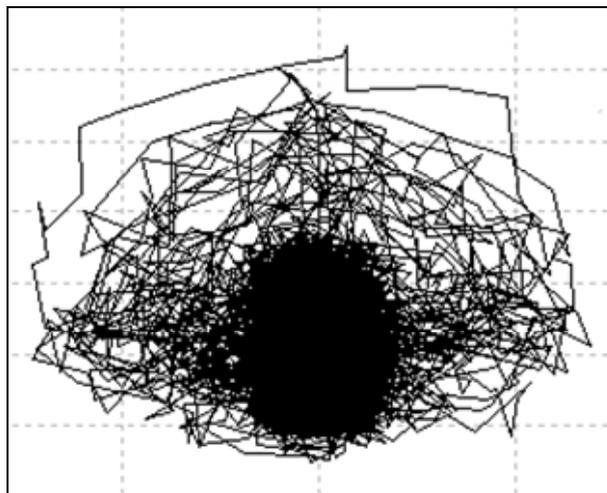


Рис. 5. Форма фазового портрета ЭКГ при высоком уровне внутренних и внешних возмущений

Возникает естественные вопрос: какие предпосылки могут лежать в основе наблюдаемого разброса фазовых траекторий реальных записей одноканальной ЭКГ и диагностической ценности параметра σ ?

Известно [17, 18], что организм человека, представляя собой открытую нелинейную диссипативную систему, обменивается с окружающей средой веществом, энергией и информацией. При этом адаптационные возможности организма реализуются путем включения и постоянного использования двух механизмов: гомеостатических, обеспечивающих достижение и поддержание стационарных (оптимальных) состояний, и хаотических (детерминированных или стохастических), которые ориентированы на включение механизмов самоорганизации и развития [19].

Оптимальное сочетание этих двух механизмов с учетом возрастного развития обеспечивают приспособительные процессы, а их согласованное взаимодействие является важнейшим признаком универсальной эволюционно обусловленной системной организации [20].

Как отмечают авторы работы [21], при исследовании биоэлектрической активности организма человека и животных было обнаружено изменение

степени «сложности» и «хаотичности» сигналов (ЭЭГ и ЭКГ) при возникновении патологии. С другой стороны, при многих патологических состояниях проявляется четко выраженная периодичность, сопровождающаяся потерей изменчивости и снижением хаотического компонента. Л. Гласс и М. Мэки ввели в науку термин «динамическая болезнь», характеризуя им именно возникновение аномалии во временных зависимостях переменных состояний, описывающих режимы функционирования живых систем. При этом необходимо различать анализ варибельности периодических компонентов стационарных режимов функционирования, связанных с временными показателями, и анализ хаотических колебаний, присущих переходным состояниям и не зависящих от времени.

Согласно [14, 20] важная задача научных исследований — установить некоторую «норму хаотичности» и ее отклонения под влиянием тех или иных воздействий. При этом следует учитывать, что не всегда уменьшение степени хаотичности означает наличие процессов самоорганизации и наоборот — увеличение степени хаотичности означает наличие деградации.

Таким образом, «параметры хаоса» могут служить устойчивой и показательной оценкой функционального состояния [19, 20] и эффективности его управления. Известно также, что нервные механизмы, управляющие сердечным ритмом, по своей сути, относятся к хаотическим, что придает системе возможность работать в более широком адаптационном коридоре [18].

Подобно тому, как степень хаотичности состояния термодинамической системы любой физической природы характеризуется «размытостью» фазового портрета и увеличением его эффективного объема величина разброса фазовых траекторий ЭКГ может характеризовать хаотичность механизмов сердечной деятельности и давать дополнительную информацию для оценки оптимальности управления ее функциональным состоянием.

Вполне понятно, что разброс фазовых траекторий, связанный с изменчивостью формы сигнала $z(t)$ на последовательных сердечных циклах ЭКГ, может быть обусловлен как чисто стохастическими процессами, так и механизмом детерминированного хаоса. К тому же, в соответствии с [22], хаотическое поведение реальной нелинейной динамической системы во многом обязано своим возникновением наличием не только детерминистских законов, но и случайных факторов. Более того, согласно результатам последних исследований, опубликованных в [23], невозможно по наблюдаемому сигналу однозначно определить является ли он детерминированным хаосом или же случайным процессом, поскольку оба эти механизма могут порождать практически одинаковые сигналы.

Поэтому для оценки эффективности управления функциональным состоянием сердечно-сосудистой системы, основанной на измерении величины разброса фазовых траектории ЭКГ на плоскости $z(t)$, $\dot{z}(t)$, нас будет интересовать не «этиология» происхождения хаотичности фазового портрета, а степень хаотичности, выраженная значениями параметра σ .

При значительном увеличении параметра σ фазовый портрет ЭКГ

теряет фрактальную структуру, обеспечивающую функциональную память и способность к оптимальной поисковой активности систем организма, что свидетельствует об ограниченности коридора адаптации и снижении эффективности управления. Поэтому можно предположить, что степень разброса траекторий фазового портрета, количественно выраженная диапазоном изменений параметра σ , может быть предиктором адекватности «степени хаотичности» функционирования системы с учетом ее уровня развития, гендерных и индивидуальных особенностей организма.

Разумеется в соответствии с современными представлениями о доказательной медицине все сформулированные выше гипотезы потребовали проверки на различных группах верифицированных испытуемых, задачами которых было:

1) выявить особенности параметра σ в покое и при увеличении внешней нагрузки у контингентов разного пола и возраста и с различным уровнем функциональных резервов кардиогемодинамики;

2) определить направленность изменения параметра σ при увеличении эффективности управления функциональным состоянием;

3) выявить диагностическую значимость параметра в оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

КЛИНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения сформулированных задач было обследовано 321 человек (129 женщин и 192 мужчин) в возрасте от 6 до 76 лет. Среди обследованных было:

- 176 человек не занимающихся спортом в разных возрастных группах,
- 65 спортсменов высокой квалификации (37 футболистов, 20 боксеров, 8 борцов),
- 30 кардиологических больных с острой патологией,
- 50 кардиологических больных с хронической патологией.

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью пакета STATISTICA-6.0. Оценки расхождения распределений признаков проводились с помощью критерия согласия Колмогорова — Смирнова. Для оценки взаимосвязи между исследуемыми признаками применяли критерий ранговой корреляции Спирмена. Анализ различий выраженности признаков между исследуемыми группами проводили с помощью критерия Манна — Уитни.

Установлено (рис. 6), что с увеличением возраста и проявлением возрастных изменений показатель σ в покое у женщин имеет тенденцию к увеличению, а у мужчин — к уменьшению, причем изменения σ относительно средних значений достигают 15 % ($p < 0,05$). При этом гендерные особенности показателя σ усиливаются с увеличением возраста: у пожилых людей зафиксированы достоверные различия ($p < 0,05$) разброса фазовых траекторий ЭКГ мужчин и женщин. Вероятно, возрастные изменения организма мужчин и женщин разнонаправленно включают адаптационные и компенсаторные механизмы.

Примечательно, что независимо от пола у детей до 12 лет наблюдается более широкий диапазон σ , в среднем на 22,5 % ($p < 0,05$) превышающий показатели взрослого человека (рис. 6). По-видимому, высокая степень разброса фазовых траекторий у детей до 12 лет обусловлена преобладанием процессов самоорганизации в развивающемся детском организме, что не является проявлением патологии.

Для выявления особенностей изменения показателя σ под действием ступенчато возрастающей нагрузки (50, 100, 150 Вт) изучали динамику разброса фазовых траекторий портрета ЭКГ у спортсменов высокой квалификации и у лиц, не занимающихся спортом. В эксперименте принимало участие 70 мужчин в возрасте 19–25 лет (35 спортсменов и 35 человек не занимающихся спортом).

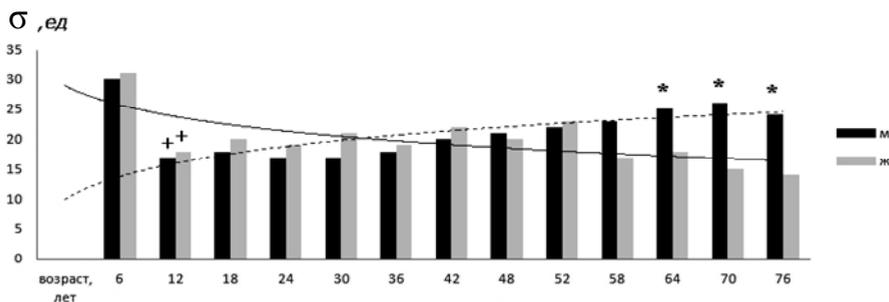


Рис. 6. Возрастные особенности величины разброса фазовых траекторий (показателя σ): + — достоверные различия ($p < 0,05$) относительно предыдущей возрастной группы; * — достоверные гендерные различия ($p < 0,05$) в возрастной группе (по критерию Манна — Уитни)

Установлено, что при нарастании нагрузки у спортсменов наблюдалось «волнообразное» изменение средних значений параметра σ , в то время как у лиц, не занимающихся спортом, параметр σ увеличивался более-менее монотонно (рис. 7). Можно предположить, что немонотонный характер изменений величины разброса фазовых траекторий ЭКГ у спортсменов под нагрузкой обусловлен тем, что в тренированном организме с более «обученной» и совершенной системой регуляции кардиогемодинамики происходит поочередное вовлечение как хронотропного механизма, так и поисковых механизмов управления. Другими словами, в процессе систематических физических тренировок сердечно-сосудистая система спортсмена «обучается» выбирать более эффективные методы управления, что свидетельствует о расширении резервов адаптации в обеспечении высокого уровня работоспособности.

Для анализа адаптационных резервов мужчин и женщин молодого возраста (от 19 до 25 лет) оценивался нормированный показатель

$$\eta = \frac{P}{\sigma}, \quad (7)$$

представляющий собой отношение частоты сердечных сокращений P к величине разброса фазовых траекторий σ . Эксперименты, проведенные при

выполнении нагрузочного теста и в восстановительный период (на шестой минуте отдыха), показали (рис. 8) следующее:

а) при увеличении внешней нагрузки у мужчин-спортсменов наблюдается снижение нормированного показателя η , а это значит, что прирост показателя σ , характеризующего разброс фазовых траекторий, превышает прирост частоты сердечных сокращений P ;

б) у женщин-спортсменок наблюдается противоположная тенденция динамики нормированного показателя η , т.е. у этой категории испытуемых прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ ;

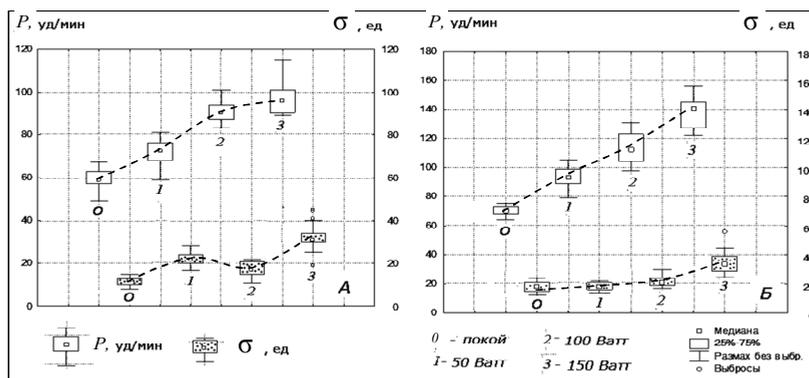


Рис. 7. Особенности роста частоты сердечных сокращений (P , уд/мин) и величины разброса фазовых траекторий (σ , ед.) в группах спортсменов (А) и лиц, не занимающихся спортом (Б)

в) при увеличении внешней нагрузки у лиц, которые не занимаются спортом, независимо от их пола прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ ;

г) не зависимо от уровня тренированности у мужчин и у женщин наблюдались существенные различия ($p < 0,05$) средних значений нормированного показателя η на шестой минуте отдыха. Это означает, что восстановительный период у мужчин и женщин протекает по-разному: у мужчин наблюдается более интенсивное восстановление частоты сердечных сокращений P при незначительном снижении показателя σ , тогда как в женском организме восстановительный период сопровождался более быстрым снижением показателя σ по сравнению с восстановлением частоты сердечных сокращений.

Обнаруженная полярная особенность восстановления мужского и женского организма по нормированному показателю η еще раз подтверждает различие послестрессовых состояний мужского и женского организма, которые автор работы [14] поясняет тем, что у женщин более выражен процесс самоорганизации (самовосстановления) за счет перехода от хаотического состояния к более упорядоченному, в то время как у мужчин наблюдается обратная динамика — самовосстановление сопровождается увеличением степени хаотичности.

На основе экспериментальных данных, полученных для контингентов с

различным уровнем адаптационного потенциала, проводилась оценка взаимосвязи показателя σ с традиционными параметрами variability сердечного ритма. В табл. 1 представлены результаты оценки парных корреляций показателя σ с амплитудой моды AMo , стандартным отклонением $SDNN$ и мощностью высокочастотных компонентов HF массива нормальных $R-R$ интервалов сердечного ритма.

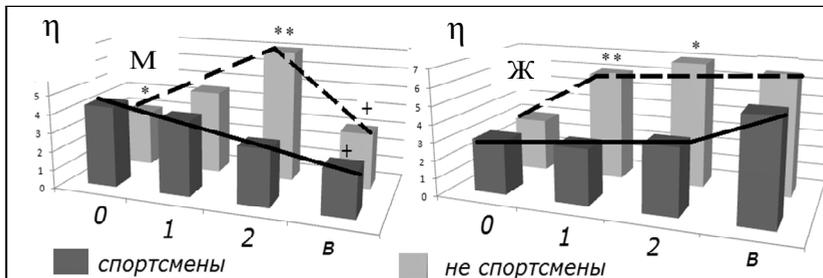


Рис.8. Особенности динамики нормированного показателя η при выполнении нагрузочного теста (М – мужчины, Ж – женщины): 0 – покой, 1 – нагрузка 100 Вт, 2 – нагрузка 200 Вт; в – восстановительный период на 6-й минуте отдыха; + – достоверные гендерные различия ($p < 0,05$); * – достоверные внутригрупповые различия между спортсменами и неспортсменами ($p < 0,05$)

Таблица 1

Корреляционные взаимосвязи показателя σ с параметрами сердечного ритма в группах с разным уровнем адаптационного потенциала

Условия адаптации	Контингент	Среднее значение показателя σ	Корреляционные взаимосвязи		
			$\sigma - AMo$	$\sigma - SDNN$	$\sigma - HF$
Успешная адаптация	Спортсмены в соревновательный период ($n = 38$)	15	-0,60**	0,67***	-0,59**
Срыв адаптации	Кардиологические больные с острой патологией ($n = 30$)	11°	-0,63***	0,72***	0,66***
Послестрессовая компенсация	Кардиологические больные с хронической патологией ($n = 50$)	29°°	-0,60*	0,61*	—

Примечание: * — ($p < 0,05$); ** — ($p < 0,01$); *** — ($p < 0,001$) — достоверность взаимосвязей между показателями по критерию Спирмена.

Полученные результаты показывают, что величина разброса фазовых траекторий, которая отражает функциональное состояние сердечно-сосудистой системы, проявляется разнонаправленными корреляционными взаимосвязями с высокочастотными компонентами регуляции сердечного ритма, характеризующими суммарный эффект вегетативной регуляции. Так, у спортсменов в соревновательный период стрессопротекторное влияние парасимпатической части нервной системы характеризовалось

отрицательными корреляционными зависимостями с показателем σ , а у пациентов с кардиологической патологией — прямой зависимостью.

На рис. 9 представлены гистограммы, которые дают представление об условных распределениях значений показателя σ , вычисленного по ЭКГ покоя в группе больных с острыми и хроническими сердечно-сосудистыми патологиями (83 мужчины и женщины) и в группе условно здоровых волонтеров (150 человек разного пола).

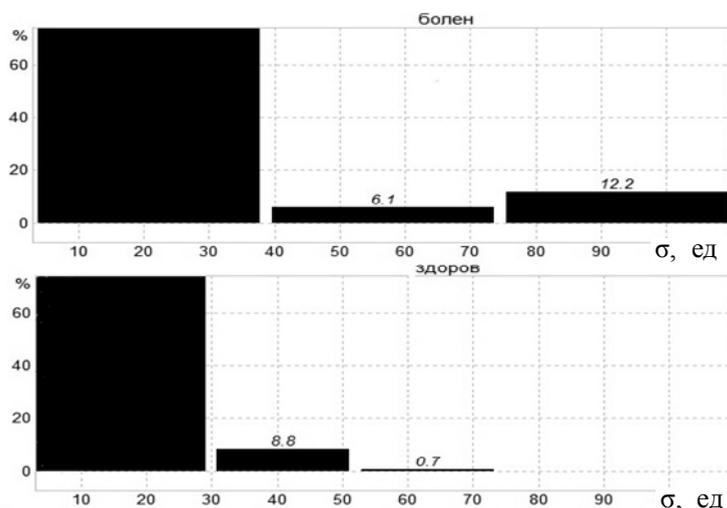


Рис. 9. Оценка условных распределений параметра σ в группах больных (сверху) и здоровых (внизу)

Легко видно, что при значениях $\sigma \geq 50$ у.е. даже по одному показателю σ можно принимать достаточно обоснованные решения об указанных группах (табл. 2).

В то же время при $\sigma < 30$ у.е. по значениям только одного параметра σ невозможно отличить представителей указанных групп. Тем не менее в соответствии с результатами теоретических исследований, представленных в [24], неинформативный сам по себе диагностический признак при определенных условиях может оказаться полезным в совокупности с другими признаками и даже обеспечить безошибочную классификацию. Этот результат дает основание предполагать, что даже в области $\sigma < 30$ показатель σ может нести *дополнительную* диагностическую ценность совместно с другими параметрами ЭКГ, в частности с параметром β_T [5, 7], характеризующим симметрию участка реполяризации, и углом α [8], несущим информацию об ориентации фазового портрета. Экспериментальная проверка такой гипотезы составит предмет наших дальнейших исследований.

Таблица 2

Схема принятия решений при значениях показателя $\sigma \geq 50$

Значения показателя σ , у.е.	Решение
$\sigma > 75$	Высокий риск патологии
$50 < \sigma \leq 75$	Низкий риск патологии

Выводы

Проведенные исследования показали, что величина разброса фазовых траекторий ЭКГ, регистрируемой даже в одном (первом стандартном) отведении, несет дополнительную диагностическую информацию об уровне адаптационных резервов организма и может быть количественно выражена показателем σ .

Обработка экспериментальных данных, полученных для испытуемых в возрасте от 6 до 76 лет с различным уровнем адаптационного потенциала (65 спортсменов высокой квалификации, 176 условно здоровых волонтеров, не занимающиеся спортом, и 80 больных с острой и хронической сердечной патологией) позволили установить следующие особенности показателя σ :

1. С увеличением возраста показатель σ в покое у женщин имеет тенденцию к увеличению, у мужчин — к уменьшению, а его изменения относительно средних значений достигают 15 % ($p < 0,05$).

2. Независимо от пола у детей до 12 лет наблюдается более широкий диапазон σ , в среднем на 22,5 % ($p < 0,05$) превышающий показатели взрослого человека, что вероятнее всего обусловлено преобладанием процессов самоорганизации в развивающемся детском организме.

3. При нарастании нагрузки у спортсменов наблюдается «волнообразное» изменение средних значений параметра σ , в то время как у лиц, не занимающихся спортом, параметр σ увеличивался монотонно. Можно предположить, что немонотонный характер изменений величины разброса фазовых траекторий ЭКГ у тренированных людей обусловлен более совершенной системой регуляции кардиогемодинамики, которая поочередно вовлекает как хронотропные, так и поисковые механизмы управления.

4. При увеличении внешней нагрузки у мужчин-спортсменов прирост показателя σ , характеризующего разброс фазовых траекторий, превышает прирост частоты сердечных сокращений P , а у женщин-спортсменок наблюдается противоположная тенденция.

5. При увеличении внешней нагрузки у лиц, которые не занимаются спортом, независимо от их пола, прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ .

6. Количественных изменений показателя σ как при срочной, так и при долговременной адаптации или ее срыве напрямую связан с оптимальным включением высокочастотных компонентов регуляции сердечного ритма.

7. Величина разброса фазовых траекторий одноканальной ЭКГ, характеризуемая показателем σ , может быть использована в качестве дополнительного критерия оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

1. Subramanian A.S., Gurusamy G. Detection of ventricular late potentials using wavelet-neural approach. *European Journal of Scientific Research*, 2011, vol. 58, no. 1, pp.11–20.
2. Nearing B.D., Verrier R.L. Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy. *Journal of Applied Physiology*, 2002, vol. 92, pp. 541–549.

3. Турбулентность сердечного ритма в оценке риска внезапной сердечной смерти / Е.В. Шляхто, Э.Р. Бернгардт, Е.В. Пармон, А.А. Цветникова // Вестник аритмологии. — 2004. — № 38. — С. 49–55.
Shliachto E.V., Berngardt E.R., Parmon E.V., Tsvetnikova A.A. Turbulence of cardiac rhythm as indicator of sudden cardiac death risk. *Herald of arrhythmology*, 2004, no. 38, pp. 49–55.
4. Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы / Л.С. Файнзильберг. — К.: Освита Украины, 2013. — 191 с.
Fainzilberg L.S. *Electrocardiogram phase portraits in computer diagnostics*. Kiev: Osvita Ukrainy, 2013. 191 p.
5. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ® — эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца / Л.С. Файнзильберг // Клиническая информатика и телемедицина. — 2010. — Т. 6. — Вып. 7. — С. 22–30.
Fainzilberg L.S. FASEGRAPH® — effective ECG processing technology for the coronary heart disease screening. *Clinical informatics and telemedicine*, 2010, vol. 6, issue 7, pp. 22–30.
6. Гриценко В.И. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы / В.И.Гриценко, Л.С. Файнзильберг // Врач и информационные технологии. — 2013. — № 3. — С.52–63.
Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Information technology FASEGRAPH® for integrated assessment of cardiovascular system using phase portrait of electrocardiogram. *Physician and information technology*, 2013, no. 3, pp. 52–63.
7. Минина Е.Н. Анализ волны Т ЭКГ в фазовом пространстве в определении функциональных резервов миокарда / Е.Н. Минина // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. — 2013. — Т. 26 (65). — № 2. — С. 148–153.
Minina E.N. The phase-space analysis of the T-wave on the ECG phase portrait and myocardium functional capacities assessment. *Scientific notes of the Tavrida National University of Vernadsky*, 2013, vol. 26 (65), pp. 148–153.
8. Файнзильберг Л.С. Исследование диагностической ценности угла ориентации фазового портрета одноканальной ЭКГ как индикатора функционального состояния миокарда // Л.С. Файнзильберг, Е.Н. Минина // Клиническая информатика и телемедицина. — 2013. — Т. 9. — Вып. 10. — С. 33–42.
Fainzilberg L.S., Minina E.N. Study of the diagnostic value of the orientation angle of the phase portrait of the one-lead ECG as an indicator of the functional state of the myocardium. *Clinical informatics and telemedicine*, 2013, vol. 9, issue 10, pp. 33–42.
9. Fainzilberg L.S., Potapova T.P. Computer Analysis and Recognition of Cognitive Phase Space Electro-Cardio Graphic Image. *Proceeding of the 6th International Conference On Computer analysis of Images and Patterns (CAIP'95)*. Prague (Czech Republic), 1995, pp. 668–673.
10. Фрумин Л.Л. О фазовом портрете электрокардиограммы / Л.Л. Фрумин, М.Б. Штарк // Автотриметрия. — 1993. — № 2. — С. 51–54.
Frumin L.L., Shtark M.B. On the ECG phase portrait. *Avtometriya*, 1993, no 2, pp. 51–54.
11. Шилинская З.И. Дифференцирование электрической активности сердца / З.И. Шилинская // Кардиология. — 1965. — № 3. — С. 67–72.
Shilinskaite Z.I. Shilinskaite Cardiac electrical activity differentiation. *Cardiology*, 1965, no. 3, pp. 67–72.
12. Халфен Э.Ш. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца Т ЭКГ/ Э.Ш. Халфен, Л.С. Сулковская // Кардиология. — 1986. — № 6. — С. 60–62.
Halfen E.S., Sulkovskaya L.S. Clinical importance of T — wave velocity indicator in ECG records. *Cardiology*, 1986, no. 6, pp. 60–62.
13. Волкова Э.Г. Диагностические возможности первой производной ЭКГ в оценке состояния коронарной артерии у больных ишемической болезнью сердца / Э.Г. Волкова, О.Ф. Калаев, А.Р. Ковынев // Терапевтический архив. — 1990. — № 3. — С. 35–38.
Volkova E.G., Kalaev O.F., Kovynev A.R. Diagnostic capabilities of the first ECG derivative in the assessment of ischaemia patients' coronary artery. *Therapeutic Archives*,

- 1990, no. 3, pp. 35–38.
14. Анищенко В.С. Детерминированный хаос / В.С. Анищенко. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://kirsoft.com.ru/freedom/KSNews_380.htm (дата обращения: 20.11.2013).
Anishchenko V.S. *Deterministic chaos*. Available at: http://kirsoft.com.ru/freedom/KSNews_380.htm (accessed 20 November 2013).
 15. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика / Л.С. Файнзильберг. — К. : Наукова Думка, 2008. — 333 с.
Fainzilberg L.S. *Information processing technologies for the irregular shape signals. Theory and practical applications*. Kiev: Naukova Dumka, 2008. 333 p.
 16. Файнзильберг Л.С. Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве / Л.С. Файнзильберг // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 1. — С. 32–46.
Fainzilberg L.S. Computer analysis and ECG interpretation in the phase space. *System Research & Information Technologies*, 2004, no. 1, pp. 32–46.
 17. Блюменфельд Л.А. Термодинамика, информация и конструкция биологических систем / Л.А. Блюменфельд // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 7. — С. 88–92.
Blyumenfeld L.A. Thermodynamics, information and design of biological. *Soros Educational Journal*, 1996, no. 7, pp. 88–92.
 18. Яшин А. А. Живая материя. Физика живого и эволюционных процессов / А. А. Яшин. — М. : ЛКИ, 2010. — 264 с.
Yashin A.A. *Living matter. Physics of the Alive and evolutionary processes*. Moscow: LKI, 2010. 264 p.
 19. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем (в 3-х томах). Том.1 / Ю.Л. Климонтович. — М.: Янус-К, 1995. — 624 с.
Klimontovich Yu.L. *Statistical theory of open systems*. Vol. 1. Moscow: Yanys-K, 1995. 624 p.
 20. Хадарцев А.А. Фундаментальные исследования по биоинформатике в развитии альтернативной медицины / А.А. Хадарцев, А.А. Яшин // Фундаментальные науки и альтернативная медицина: Тезисы докладов I Межд. симпозиума (22-25/IX 1997, Пушкино). — Пушкино: Изд-во Пушкинск. науч. Центра РАН, 1997. — С. 109.
Nadarcev A.A., Yashin A.A. Fundamental research in bioinformatics in the development of alternative. Basic Science and Alternative Medicine: *Tez. of the reports. I Int. symposium. (22-25/IX 1997, Pyshino)*. Pyshino: Pushisk. naech. Centra RAN Publ. 1997. P. 109.
 21. Майоров О.Ю. Повышение надежности исследований детерминированного хаоса в биоэлектрической активности (ЭЭГ, ЭКГ и вариабельности сердечного ритма) методами нелинейного анализа / О.Ю. Майоров, В.Н. Фенченко // Клиническая информатика и телемедицина. — 2009. — Т. 5. — Вып. 6. — С. 10–17.
Mayorov O.Yu., Fenchenko V.N. Improving the reliability studies of deterministic chaos in the bioelectric activity (EEG, ECG and heart rate variability) methods of nonlinear analysis. *Clinical informatics and telemedicine*, 2009, vol. 5, issue 6, pp. 10–17.
 22. Шарыпов О.В. Детерминированный хаос и случайность / О.В. Шарыпов — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000242/> (дата обращения 20.11.2013)
Sharipov O.V. *Deterministic chaos and randomness*. Available at: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000242/> (accessed 20 November 2013).
 23. Werndl Ch. Are deterministic descriptions and indeterministic descriptions observationally equivalent? *Studies in history and philosophy of science. Part B: Studies in history and philosophy of modern physics*, 2009, vol. 40, issue 3, pp. 232–242.
 24. Файнзильберг Л.С. Математические методы оценки полезности диагностических признаков. / Л.С. Файнзильберг — К. : Освита України, 2010. — 152 с.
Fainzilberg L.S. *Mathematical methods for evaluating the usefulness of diagnostic features*. Kiev: Osvita Ukraine, 2013. 191 p.

Получено 2.12.2013

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ КИСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОТОРНОГО КОМПОНЕНТА РЕЧИ

М.И. Вовк, Е.Б. Галян, Е.Н. Подопригора

*Международный научно-учебный центр информационных технологий
и систем НАН Украины и МОН Украины*

Рассмотрена нейропластичность как основа восстановления функций движения и речи. Показана роль нейропластичности в теоретическом обосновании синтеза информационной технологии целенаправленного управления мелкими движениями кисти для восстановления моторного компонента речи. В качестве составных частей технологии рассмотрены тренировочные программы как информационные сигналы управления движениями кисти, методы их передачи, виды мелких движений кисти и топология подведения сигналов к мышцам для управления этими движениями. Представлена структурно-функциональная модель восстановления речи на базе информационной технологии целенаправленного управления мелкими движениями кисти. Приведен анализ результатов апробации технологии в клинических условиях.

Розглянуто нейропластичність як основу відновлення функцій руху й мовлення. Показано роль нейропластичності в теоретичному обґрунтуванні синтезу інформаційної технології цілеспрямованого керування дрібними рухами китиці для відновлення моторного компоненту мовлення. У якості складових частин технології розглянуто тренувальні програми як інформаційні сигнали керування рухами китиці, методи їх передачі, види дрібних рухів китиці і топологія підведення сигналів до м'язів для керування цими рухами. Надано структурно-функціональну модель відновлення мовлення на базі інформаційної технології цілеспрямованого керування дрібними рухами китиці. Наведено аналіз результатів апробації технології в клінічних умовах.

ВВЕДЕНИЕ

В естественных условиях любое движение представляет собой часть сложного поведенческого акта, включающего весь существующий набор движений. Экспрессивная устная речь также реализуется посредством движений. Реализация устной речи происходит благодаря координированной работе периферического речевого аппарата, а программирование, запуск и управление речевым актом осуществляется в результате сложного взаимодействия различных мозговых структур.

При нарушении работы центральной нервной системы, например, вследствие острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) наблюдаются не только нарушения в управлении глобальными движениями (гемипарезы, гемиплегия), но и, в 50–60 % случаев, речевые нарушения. К наиболее распространенным речевым нарушениям у больных ОНМК относится моторная афазия. Она характеризуется нарушениями речевого праксиса — расстройством грамматической и лексической структуры речи

вследствие поражения моторной речевой зоны коры головного мозга — области Брока — центрального звена моторного компонента речи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предыдущих исследованиях разработана структурно-функциональная модель формирования/восстановления моторного компонента речи на базе подключения к пациенту внешнего контура целенаправленного управления принудительными мышечными движениями кисти. Центральным звеном внешнего контура является программный электростимулятор мышц, который формирует принудительные мышечные движения кисти по определенной программе, вследствие чего «запускается» обратная афферентация от мышечных движений кисти в моторную зону коры и активируется корковое управление речевым аппаратом. В результате устраняется разрыв речевого круга на уровне центра Брока, что приводит к восстановлению моторного компонента речи. Обоснованием подхода является онтогенетическая взаимосвязь развития мелкой моторики кисти и речи, большая величина корковой проекции кисти (около трети всей двигательной проекции) и ее близость к моторной речевой зоне [1]. Дальнейшие исследования направлены на синтез технологии восстановления речи. Настоящие исследования направлены на решение практических задач синтеза технологии восстановления речи.

Цель исследований — разработать информационную технологию целенаправленного управления движениями кисти для восстановления моторного компонента речи и провести апробацию технологии в клинических условиях.

Выполнение поставленной цели включало решение следующих задач:

- провести медико-биологический анализ механизмов нейропластичности при восстановлении двигательных и речевых функций;
- разработать методы передачи информационных управляющих (стимулирующих) сигналов и топологии их приложения в контурах управления принудительными движениями кисти, включая управление мелкой моторикой;
- провести исследования по использованию разработанной технологии в реальных клинических условиях и дать анализ их результатов.

НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТЬ В АКТИВАЦИИ РЕЗЕРВОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ДВИЖЕНИЯ И РЕЧИ

Нейропластичность — это способность нервной системы восстанавливать свою функцию посредством качественных и количественных нейрональных перестроек, изменений нейрональных связей и глиальных элементов. Нейропластичность является основой не только восстановления нарушенных функций движения, но и памяти, речи, обучения, получения новых навыков [2]. Исследования по изучению организации нейропластических процессов с применением функциональной магнито-резонансной томографии — неинвазивного визуализационного

метода картирования мозга человека — предоставили доказательства способности реорганизации коры мозга у лиц пожилого возраста с выраженными сосудистыми изменениями [3].

В нейропластических процессах активно участвуют нейроны и глия, сосудистая система, изменяется функциональная активность синапсов и их количество, происходит формирование новых синапсов, меняется конфигурация и размер активных зон. Так как для нормального функционирования организма все процессы должны быть сбалансированными, то формируется так называемая гомеостатическая нейропластичность.

Различные отделы ЦНС обладают разным нейропластическим потенциалом. Так, кора головного мозга считается наиболее пластичной частью ЦНС, что обусловливается разнообразием составляющих ее клеточных элементов и связей. Имеет значение также и организация церебральных функций в коре, с одной стороны, строго локализованная в определенных зонах, а с другой — расширенная, богатая параллельными и реципрокными связями, зонами перекрытия. Последнее характерно для таких функций как сложные двигательные акты, гнозис, речь. И даже более просто организованные, на первый взгляд, структуры, такие как пирамидный путь, при детальном рассмотрении имеют сложную структурную организацию. В современных исследованиях показано, что помимо аксонов нейронов прецентральной извилины в пирамидный тракт входят аксоны нейронов премоторной, первичной сенсорной, теменной ассоциативной и дополнительной моторной коры. При этом от 10 до 30 % волокон пирамидного пути проходят ипсилатерально [4].

При острых нарушениях мозгового кровообращения или черепно-мозговой травме на уровне двигательной коры нейропластические изменения происходят в виде ее реорганизации. Во время тренировки происходит ремоделирование невральных кортикальных соединений. Восстановление утраченных функций при поражении первичных моторных и пирамидных трактов состоит в принятии на себя части функций премоторной корой. А именно видоизменение структурно-функциональной организации ее нейронов. Этот процесс позволяет объяснить такой феномен, как долговременная потенция.

Долговременная потенция — это длительное увеличение синаптической активности после кратковременной интенсивной стимуляции. В определенных случаях такая стимуляция вызывает резкое усиление синаптической активности с последующим, быстро понижающимся до исходного, уровнем активности. Этот механизм присутствует в гиппокампе и играет важную роль в обучении и запоминании, формировании навыков, восстановлении речи. Долговременная потенция требует синтеза новых протеинов и роста новых синаптических соединений. Для воплощения этого процесса нужны три условия [2]: общая активация нескольких нервных волокон; общая активация пре- и постсинаптического нейрона; специфичность механизма долговременной потенции, которая приводит только к активаторному пути, в свою очередь, участвующему в преобразовании «немых» синапсов в активные. В результате «немые»

синапсы могут быть преобразованы в активные синапсы с помощью механизмов долговременной потенциации. Также под действием этих механизмов, происходят структурные изменения формы синаптической мембраны «немного» синапса. Так, при длительной стимуляции постсинаптическая клеточная мембрана генерирует новый дендритный шип. Все это является одним из основных механизмов нейропластичности в формировании клеточного ответа на повреждение ЦНС. [2].

В настоящее время различают кратковременную функциональную (обратную) пластичность, связанную с изменениями в эффективности и силе синаптических соединений, и структурную пластичность, обусловленную изменениями в организации и количестве синаптических соединений, находящихся в основе обучения памяти и речи. Так как синапс, по современным воззрениям является динамической структурой, то нейропластический потенциал его должен быть в основе функциональных изменений на макроскопическом уровне. Установлено, что повторная стимуляция пресинаптической мембраны способствует усилению или уменьшению влияния на постсинаптический нейрон. Кроме классической (перекрестной) сомато-сенсорной системы кинестетические возбуждения проводятся дополнительными ипсилатеральными афферентными каналами связи, которые имеют билатеральные проекции на симметричные структуры переднего мозга. Также в головном мозге проходит постоянное взаимодействие вертикальных (корково-подкорковых) и горизонтальных путей (между корковых) проведения возбуждения [5].

Таким образом, анализ механизмов нейропластичности коры головного мозга и путей его активации при восстановлении функций движения и речи с учетом таких фактов, как:

- представительство кисти и центры речи имеют близкую локализацию в коре головного мозга и тесную филогенетическую связь;
- величина проекции кисти в коре головного мозга занимает около трети всей двигательной проекции;
- развитие речи, с ее многообразием звуков, слов, предложений и логическим отражением человеком восприятия мира, собственной оценки окружающей среды, тесно связано с развитием движений пальцев рук — подтвердил и углубил теоретическое обоснование подхода к восстановлению моторного компонента речи на базе целенаправленного управления мелкими движениями кисти.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ КИСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЧИ

В организме управление движениями основано на формировании в двигательном анализаторе двигательных программ и их передаче по афферентным путям к исполнительным органам — мышцам, отвечающим на поступление к ним нервных импульсов реакцией возбуждения, проявляющейся в виде механических и электрических феноменов. Контроль выполнения и корректировка двигательных программ осуществляется посредством обратной афферентации. При остром нарушении мозгового

кровообращения происходит нарушение работы двигательного анализатора и, как следствие, всей системы управления движениями в целом. Управление принудительными сокращениями мышц под действием программной электростимуляции, запускает механизмы активации связи «проприоцептивная сенсорная система — двигательный анализатор» и, таким образом, способствует формированию новой системы супраспинального контроля движений вместо утраченной или искаженной патологией [6, 7].

Рассмотрим составные части информационной технологии управления движениями кисти для восстановления речи (рис. 1).

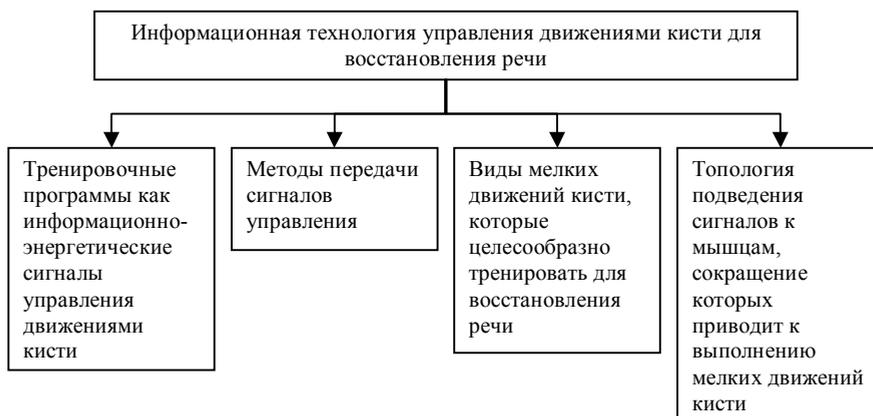


Рис. 1. Составные части информационной технологии управления движениями кисти для восстановления речи

Тренировочные программы (модели движения) как информационные сигналы в контурах управления движениями кисти и методы их передачи. Для активации резервов восстановления коркового управления речевым аппаратом на базе целенаправленного управления принудительными мышечными движениями кисти можно использовать богатый арсенал тренировочных программ (моделей движения), которыми располагает биоинформационная технология управления движениями ТРЕНАР и аппараты ТРЕНАР-01 и ТРЕНАР-02, ее реализующие. Гамма функций тренировочных программ, как информационных сигналов управления, в аппаратах ТРЕНАР представлена: 1) электростимуляцией мышц по искусственно синтезированным программам — программы «Синтез»; 2) по программам, которые «считываются» с собственных здоровых мышц пациента или мышц другого человека (инструктора) при их произвольном сокращении и передаются тренируемым мышцам в онлайн-режиме — программы «Донор»; 3) тренировкой произвольных сокращений мышц по методу биологической обратной связи с использованием электромиографического (ЭМГ) сигнала тренируемой мышцы, преобразованного в зрительные и слуховые информационные сигналы (программа «Биотренировка»; 4) тренировкой соотношения принудительно-произвольных сокращений по методу пороговой электростимуляции (программы «Порог», «Память-Ауто») [7, 8]. Все эти программы, выполняющие функцию информационных сигналов в управлении

принудительными (под действием электростимуляции) сокращениями-расслаблениями мышц, вовлекаемых в выполнение движений кисти, произвольно-принудительными либо произвольными сокращениями могут быть полезными и при восстановлении речи. В тех случаях, когда нужно формировать сложные движения мелкой моторики кисти или проводить сочетанную тренировку мелкой моторики с глобальными движениями кисти, целесообразно использовать более сложные, с гибкой архитектурой синтеза, многоканальные (четыре, шесть каналов) синтезаторы программ.

Проводя биоэлектростимуляцию мелкой моторики кисти у постели больного методом программной электростимуляции, где источником управляющего сигнала для стимуляции является сигнал от синтезатора управляющих воздействий, мы воздействуем на ремоделирование невральных кортикальных соединений, заставляем анастомозировать между собою нервные волокна и образовывать реципрокные связи, перенимать часть функций на себя премоторной корой. В тех случаях, когда у пациентов не нарушена когнитивная сфера, более эффективной не только для восстановления собственно двигательных функций кисти (см., например [9]), но и речи может оказаться тренировочная программа «Донор». Основываясь на анализе механизмов нейропластичности, можно предположить, что использование программ «Донор», которые «считываются» с собственных здоровых мышц пациента при их произвольных сокращениях, позволит включить дополнительные механизмы нейропластичности для образования долговременной потенциации за счет активации сенсомоторной, премоторной и моторной коры ипсилатерального полушария головного мозга и горизонтальных (между корковых) путей проведения возбуждения.

Для неинвазивной передачи информационно-энергетических сигналов при тренировке принудительных движений кисти применены поверхностные электроды. Они удобны для эксплуатации и не травмируют пациента. Площадь поверхностных электродов выбирается таким образом, чтобы силовые линии тока оптимально охватывали участок топографического расположения мышц (базируется на схеме двигательных точек Эрба) [6]. Слишком маленькая площадь может вызвать неприятные ощущения у пациента, слишком большая — нежелательные сокращения соседних со стимулируемой мышц. Учитывая различия анатомического строения кисти вследствие разного веса, роста, пола и т.д., для проведения исследования были изготовлены и применены различные типоразмеры электродов: 20 x 40 мм, 10 x 20 мм, 10 x 10 мм.

Выбор тренируемых мелких движений кисти и топологии подведения информационно-энергетических сигналов в контурах управления этими движениями. Выбор тренируемых движений основан на развитии мелкой моторики кисти в онтогенезе и ограничен избирательным доступом к мышцам, реализующим то или иное движение, при использовании поверхностных электродов. Согласно Х. Хальверсон, развитие захвата, удерживания и манипулирования предметами проходит определенное количество последовательных этапов: от противопоставления большого пальца относительно ладони, захвата кулачком, до точного захвата мелких предметов большим и указательным пальцем [10] (рис. 2).

© М.И. Вовк, Е.Б. Галян, Е.Н. Подопригора, 2013

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 175

На основании последовательности развития функций кисти в онтогенезе, с учетом доступности передачи информационных управляющих сигналов мышцам при помощи поверхностных электродов, для формирования и тренировки движений мелкой моторики кисти выбраны следующие движения:

- противопоставление большого пальца, как первое и наиболее важное при развитии движения точного захвата мелких предметов;
- приведение большого пальца и мизинца;
- отведение пальцев кисти от средней линии.

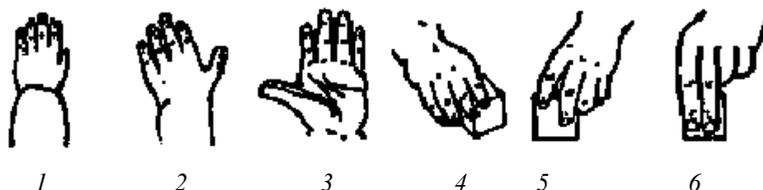


Рис. 2. Этапы развития функций кисти руки ребенка (по Х. Хальверсон):
 1 — положение кисти в 16 недель; 2 и 3 — в 56 недель; 4 — в 60 недель;
 5 — в 3 года; 6 — взрослый

Исследования по определению мышц, участвующих в заданных движениях, и топологии подведения информационно-энергетических управляющих сигналов для тренировки мелкой моторики кисти проводились на базе неврологического отделения № 1 Киевской городской клинической больницы № 3. В исследовании принимали участие мужчины (50 % от общего количества) и женщины (50 % от общего количества) в возрасте от 46 до 74 лет. Общее количество составило 10 человек. Все испытуемые имели нозологический статус: умеренный или выраженный гемипарез (последствия ОНМК по ишемическому типу). Эксперименты по определению топологии подведения управляющих сигналов проводили как на пораженных, так и на здоровых конечностях. В результате исследований были определены участки расположения электродов для отобранных движений мелкой моторики. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Топология подведения информационно-энергетических сигналов для целенаправленной тренировки мелкой моторики кисти

Тренируемые движения	Схема расположения электродов
Противопоставление большого пальца	Электроды располагаются над областью возвышения большого пальца thenar 1-й электрод: первая треть thenar, в области m. flexor pollicis brevis и m. adductor pollicis, 2-й электрод: вторая треть thenar, в области m. opponens pollicis
Приведение первого и пятого пальцев	1-й электрод: область возвышения большого пальца thenar, 2-й электрод: область возвышения мизинца hypothenar
Отведение пальцев от средней линии	1-й электрод: двигательные точки mm. interossei dorsales между второй и третьей пястными костями, 2-й электрод: двигательные точки mm. interossei dorsales между четвертой и пятой пястными костями

Наличие тремора в пораженной конечности и повышенная чувствительность могут препятствовать получению тренируемых движений. Кроме того, противопоказанием для тренировки движения «приведение большого пальца и мизинца» является наличие спастики в пораженной конечности, так как тренировка этого движения может привести к нарастанию спастического процесса.

Проведенные исследования подтвердили возможность получения отобранных движений при использовании поверхностных электродов для проведения программной электростимуляции нервно-мышечных групп, а также четкую топологию двигательных точек выбранных мышц с небольшим отклонением вследствие особенностей строения тела (рост, вес и т.д.).

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ КИСТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЧИ У БОЛЬНЫХ ОНМК

Апробация технологии проводилась на базе неврологического отделения № 1 Киевской городской клинической больницы № 3. В исследовании принимали участие 60 человек: мужчины (65 %) и женщины (35 %) в возрасте от 35 до 78 лет. У всех участников наблюдались нарушения двигательных функций, в виде правостороннего гемипареза, и речевых функций (моторная афазия разной степени тяжести) вследствие перенесенного острого нарушения мозгового кровообращения. Участники эксперимента были поделены на две группы по 30 человек: группа испытуемых и контрольная группа. Всем пациентам был назначен базовый комплексный курс восстановительного лечения двигательных и речевых функций: фармакотерапия, лечебная физическая культура (ЛФК), занятия с логопедом, курс биоэлектростимуляции для тренировки глобальных движений. В группе испытуемых проводились дополнительные тренировки движений мелкой моторики кисти: противопоставление большого пальца, отведение пальцев кисти от средней линии сочетано с тыльным сгибанием кисти, а также, при отсутствии спастики, приведение большого пальца и мизинца. Количество сеансов и продолжительность курса тренировки по новой технологии изменялись в зависимости от тяжести нарушений двигательных и речевых функций, динамики восстановления, общего состояния пациента и составили в среднем 10–13 сеансов длительностью 15–20 мин.

Данные исследования охватывали целенаправленную тренировку принудительных движений кисти, отвечающих за формирование мелкой моторики, под действием программной электростимуляции соответствующих нервно-мышечных групп по программам от синтезатора циклических программ. В качестве источника управляющих воздействий использовались аппарат для электростимуляции с биоуправлением ТРЕНАР-01 (программы «Синтез»), а также универсальный четырехканальный синтезатор программ с открытой архитектурой, позволяющий формировать сложные движения путем гибкого регулирования пространственно-временных соотношений активных фаз стимуляции в каждом канале [11].

© М.И. Вовк, Е.Б. Галян, Е.Н. Подопрigора, 2013

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 175

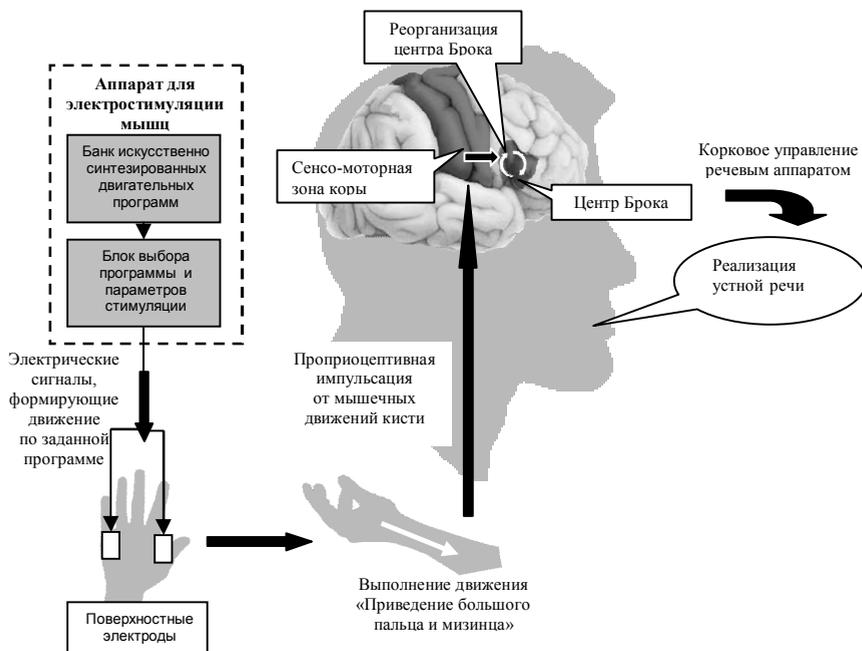


Рис. 3. Структурно-функциональная модель восстановления речи на базе информационной технологии управления движения кисти

На рис. 3 представлена структурно-функциональная модель восстановления речи на базе информационной технологии управления движения кисти. Показан пример тренировки движения «Приведение большого пальца и мизинца».

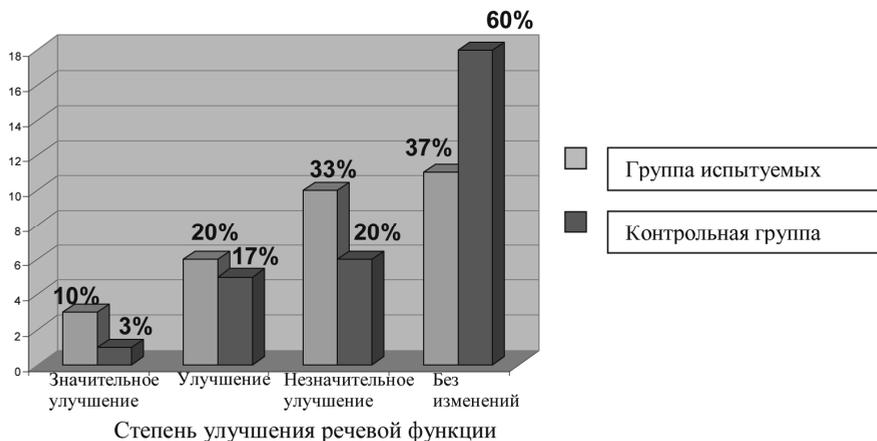


Рис. 4. Результаты апробации информационной технологии целенаправленного управления движениями кисти для восстановления речи

В результате исследований отмечено, что под действием целенаправленной тренировки, наряду с улучшением глобальных движений руки и движений мелкой моторики кисти, наблюдается улучшение речевой функции, проявляющееся, в зависимости от глубины патологии, в увеличении количества произносимых слов, возможности составления простых предложений, сокращении времени на формирование предложения.

Представленные на рис. 4 диаграммы демонстрируют рост (в разной степени) улучшений речевой функции при введении в базовый курс реабилитации тренировки движений мелкой моторики кисти. Интегрально улучшение отмечается в 63 % по сравнению с базовым курсом реабилитации — 40 %.

Апробация информационной технологии целенаправленного управления движениями кисти для восстановления речи у больных ОНМК показала, что для восстановления речевой функции, ее моторного компонента, мало тренировать только артикуляцию и глобальные движения конечностей по известным технологиям, необходимо тренировать движения кисти по технологии целенаправленного управления ее мелкими движениями.

Выводы

Теоретическим обоснованием синтеза информационной технологии управления движениями кисти для восстановления речи являются механизмы нейропластичности, связь развития речи с развитием движений пальцев рук и близкая локализация в коре головного мозга представительства кисти и центров речи.

При тренировке мелких движений кисти на основе электростимуляции мышц по искусственно синтезированным программам благодаря нейропластичности происходит формирование новых двигательных центров кисти и речи. Тренировка движений кисти по программе «Донор», которая «считывается» с собственных здоровых мышц пациента, позволяет включить дополнительные механизмы нейропластичности за счет активации коры ипсилатерального полушария головного мозга.

Для передачи информационно-энергетических стимулирующих сигналов целесообразно использовать удобные в эксплуатации поверхностные электроды. При этом процедура тренировки носит неинвазивный характер.

Критериями отбора мелких движений кисти для восстановления речи являлось развитие мелкой моторики кисти в онтогенезе и доступность двигательных точек мышц при электростимуляции с использованием поверхностных электродов.

Результаты использования разработанной информационной технологии управления движениями кисти в комплексе реабилитационных мероприятий по восстановлению речи у постинсультных больных с моторной афазией показали, наряду с улучшением двигательных функций верхней конечности и моторики кисти, улучшение речевой функции в 63 %, по сравнению с базовым курсом реабилитации — 40 %.

1. Вовк М.И. Восстановление моторного компонента речи на базе управления мышечными движениями. Теоретическое обоснование / М.И. Вовк, Е.Б. Галян // Кибернетика и вычисл. техника. — 2012. — Вып.167. — С. 51–60.
Vovk M.I., Galyan Ye.B. Restoring of motor component of speech based on muscle movement control. Theoretical grounding. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2012, issue 167, pp. 51–60.
2. Кадыков А.С. Реабилитация неврологических больных / А.С. Кадыков, Л.А. Черникова, Н.В. Шахпаронова. — М. : МЕДпресс-информ, 2009. — 509 с.

- Kadykov A.S., Chernikova L.A., Shahparonova N.V. Rehabilitation of neurological patients. Moscow: MEDpress-inform, 2009. 509 p.
3. Использование функциональной магнитно-резонансной томографии для изучения функциональной реорганизации двигательной системы после инсульта / А.С. Кадыков, З.А. Сулина, М.В. Кротенкова, С.Н. Бушенева // Медицинская визуализация. — 2007. — Вып. 3. — С. 13–18.
Kadykov A.S., Suslina Z.A., Krotenkova M.V., Busheneva S.N. The use of functional magnetic resonance imaging to study the functional reorganization of the motor system after stroke. *Medical visualization*, 2007, issue 3, pp. 13–18.
 4. Дамулин И.В. Основные механизмы нейропластичности и их клиническое значение. / И.В. Дамулин // Международный неврологический журнал 5 (35). — 2010. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.mif-ua.com/archive/article/13682> (дата обращения 21.10.2013).
Damulin I.V. The Basic mechanisms of neural plasticity and their clinical value. *The int. neurologic magazine*, 5 (35), 2010. Available at <http://www.mif-ua.com/archive/article/13682> (accessed 21 October 2013).
 5. Weiller C., Chollet F., Friston K.J., et al. Functional reorganization of the brain in recovery from striatocapsular infarction in man. *Ann. Neurol*, 1992, vol. 31, pp. 463–472.
 6. «Миотон» в управлении движениями / Л.С. Алеев, М.И. Вовк, В.М. Горбанев, А.Б. Шевченко. — К. : Наукова думка, 1980. — 142 с.
Aleev L.S., Vovk M.I., Gorbanev V.N., Shevchenko A.B. *«Mioton» in motor control*. Kyiv: Naukova dumka, 1980. 142 p.
 7. Вовк М.И. Биоинформационная технология управления движениями человека / М.И. Вовк // Кибернетика и вычислительная техника. — 2010. — Вып. 161. — С. 42–52.
Vovk M.I. Bioinformation technology of motor control of a person. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2010, issue 161, pp. 42–52.
 8. Гриценко В.И. «Тренар» — инновационная технология восстановления движений / В.И. Гриценко, М.И. Вовк // Матеріали Міжн. науково-практ. форуму «Наука і бізнес — основа розвитку економіки». — Дніпропетровськ, 2012. — С. 204–206.
Gritsenko V.I., Vovk M.I. “Trenar” — innovational technology of movements restoration. *Materials of the International scientific — practical forum “The Science and Business — a basis of development of economy”*. Dnepropetrovsk, 2012, pp.204–206.
 9. Peckham P. Hunter, Kilgore Kevin L., “Challenges and Opportunities in Restoring Function after Paralysis,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2013, vol. 60, no. 3, pp. 602–609.
 10. Halverson H.M. The acquisition of skill in infancy. *Journal of Genetic Psychology*, 1933, vol. 43, p. 3–48.
 11. Иванов В.В. Функціонально-технологічний модуль синтезу програм керування рухами. / В.В. Иванов // Біологічна і медична інформатика та кібернетика: матеріали щорічної науково-практичної школи-семінару ФМШ Жукін, 18–22 червня 2012 р. — К. : НАН України, Міжн. науково-навчальний центр ІТ та систем, 2012. — Ч. 2. — Режим доступа: www.dept220.org.ua/dep220/bmik2012.htm (дата обращения 21.10.2013).
Ivanov V.V. Functional and technological module program synthesis control movements. *Biological and Medical Informatics and Cybernetics: materials of annual science and technology seminar PMS Zhukin, 18–22 June 2012*. Kyiv: Acad. of Sciences of Ukraine, ITRC of IT and S, 2012. — Part 2. Available at www.dept220.org.ua/dep220/bmik2012.htm (accessed 21 October 2013).

Получено 20.10.2013

Сложные системы управления

УДК 519.83

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПОРЯДКЕ ПРОСМОТРА ГРУПП В ЗАДАЧЕ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕГО ЭЛЕМЕНТА С ГРУППОВЫМ ПРОСМОТРОМ КАНДИДАТОВ

С.И. Доценко, П.А. Негадайлов

Киевский Национальный Университет имени Тараса Шевченко

Рассмотрена задача выбора наилучшего элемента для случая, когда элементы разбиты на группы и за один шаг осуществляется одновременный просмотр элементов всей группы. Вначале доказывается две леммы относительно вида оптимального порядка просмотра групп, позволяющие понять структуру оптимального решения. Затем, в рамках найденной структуры, строится генетический алгоритм, приближенно находящий оптимальное решение.

Розглянуто задачу оптимального вибору у випадку, коли елементи розбито на групи та за один крок здійснюється одночасний перегляд елементів групи. Спочатку доведено дві леми, щодо оптимального порядку перегляду груп, які дозволяють зрозуміти структуру оптимального розв'язку. Потім, з урахуванням знайденої структури, знайдено генетичний алгоритм, що знаходить оптимальний розв'язок.

ВВЕДЕНИЕ

Задача оптимального выбора (известная также как задача секретаря) является одной из классических задач теории вероятностей и служит иллюстративным примером таких разделов математики, как оптимальная остановка марковских процессов, динамическое программирование, принятие решения в условиях риска или неопределенности. Наиболее известный и простой случай задачи (называемый классическим) состоит в следующем. Пусть есть n объектов, упорядоченных по качеству. Пусть некто знакомится с данными объектами в случайном порядке (т.е. это означает, что все $n!$ перестановок объектов, задающих порядок, в котором они могут встретиться просматривающему, равновероятны). При просмотре каждого из объектов нужно принять решение: остановить просмотр на данном объекте в надежде, что он окажется наилучшим среди всех, либо отвергнуть его и продолжить просмотр. Возвращаться к ранее просмотренным (и отвергнутым) объектам нельзя.

Целью данной статьи является обобщение процедуры просмотра в случае, когда объекты разбиты на группы различной численности и осуществляется одновременный просмотр всех объектов группы.

В [1] было рассмотрено обобщение задачи оптимального выбора на случай, когда объекты разбиты на группы и осуществляется одновременный

просмотр кандидатов в каждой группе. После просмотра кандидатов группы аналогично классической задаче в случае, если в группе присутствует наилучший кандидат среди всех ранее просмотренных элементов (такой элемент принято называть максимальным) нужно принять решение: выбрать этого кандидата и закончить просмотр либо же отвергнуть его и продолжить просмотр; возвращаться к ранее отвергнутым кандидатам нельзя.

В этом случае оптимальное правило выбора наилучшего кандидата базируется на так называемой теореме шансов (или теореме Брюса), рассмотренной в [2]. Возникает естественный вопрос: в каком порядке следует осуществлять просмотр групп, чтобы максимизировать вероятность выбора наилучшего кандидата.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО ПРОСМОТРА

Пусть выбираемые объекты разбиты на группы численностью x_1, x_2, \dots, x_m и пусть порядок просмотра групп фиксирован.

Оказывается, что просмотр нужно остановить в случае, если в очередной просматриваемой группе, начиная с некоторого номера k , будет выявлен максимальный элемент. При этом индекс k , согласно [1], определяется следующим образом.

$$\text{Пусть } p_i = \frac{x_i}{x_1 + \dots + x_i}, q_i = 1 - p_i, r_i = \frac{p_i}{q_i}, \text{ тогда}$$

$$r_i = \frac{x_i}{x_1 + \dots + x_{i-1}}, i \geq 2, r_1 = +\infty, k = \max(i | r_i + \dots + r_n \geq 1). \quad (1)$$

Принципиальным моментом, позволяющим применить теорему Брюса к задаче выбора наилучшего элемента с групповым просмотром кандидатов является то, что независимо от появления максимальных элементов при просмотре предыдущих групп, вероятность того, что максимальный элемент будет обнаружен в очередной просматриваемой i -й группе равна p_i .

При этом вероятность нахождения наилучшего элемента выражается следующим образом:

$$V(k) = \prod_{j=k}^m q_j \sum_{j=k}^m r_j, k \geq 2; \quad V(1) = p_1 = \frac{x_1}{x_1 + \dots + x_m}. \quad (2)$$

Однако в данной постановке задачи предполагается, что порядок просмотра групп фиксирован.

Целью данной статьи является нахождение оптимального порядка просмотра групп в случае, когда можно варьировать данный порядок. Забегая вперед, отметим, что в точности найти оптимальный порядок просмотра не удастся. Однако применение теорем, доказанных ниже, позволяет существенно сузить количество перестановок, задающих порядок просмотра групп, среди которых может быть оптимальный (а именно с множества $m!$ всех перестановок до 2^{m-1} «перспективных»).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим некоторые частные случаи:

1) $m = 2$. Пусть $x_1 \leq x_2$. Тогда порядок просмотра групп не имеет значения и оптимальным алгоритмом является остановка на максимальном элементе из большей группы, при этом $V = \frac{x_2}{x_1 + x_2}$.

2) $m = 3$. Пусть $x_1 \leq x_2 \leq x_3$. Зафиксируем некоторый порядок просмотра и обозначим $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$ номера работ в исходной нумерации, которые просматриваются 1-й, 2-й и 3-й соответственно при данном порядке просмотра. Обозначим через V_1, V_2, V_3 вероятности нахождения наилучшего элемента при условии, что при просмотре соблюдается пороговая стратегия, начиная с 1-й, 2-й либо 3-й группы соответственно.

Тогда

$$V_1 = \frac{x_{\{1\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}} + x_{\{3\}}};$$

$$V_2 = q_{\{3\}}q_{\{2\}}(r_{\{3\}} + r_{\{2\}}) = \frac{x_{\{2\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}} + x_{\{3\}}} + \left(\frac{x_{\{1\}}x_{\{3\}}}{(x_{\{1\}} + x_{\{2\}})(x_{\{1\}} + x_{\{2\}} + x_{\{3\}})} \right);$$

$$V_3 = q_{\{3\}}r_{\{3\}} = \frac{x_{\{3\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}} + x_{\{3\}}}.$$

Тогда

$$V = \max(V_1, V_2, V_3) = \frac{1}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}} + x_{\{3\}}} \max \left(x_{\{1\}}, x_{\{2\}} + \frac{x_{\{1\}}x_{\{3\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}}}, x_{\{3\}} \right).$$

Предположим, что $x_{\{1\}} \leq x_{\{3\}}$. При данном предположении первый и третий члены, стоящие под знаком максимума, могут поменяться местами, а второй член не уменьшится. Таким образом, весь максимум не уменьшится и его можно будет представить в виде

$$V' = \max \left(x_{\{2\}} + \frac{x_{\{1\}}x_{\{3\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}}}, x_{\{3\}} \right).$$

Рассмотрим альтернативный порядок просмотра групп. Поменяем местами вторую и третью группы, тогда выражение для максимума приобретает вид

$$V'' = \max \left(x_{\{3\}} + \frac{x_{\{1\}}x_{\{2\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{3\}}}, x_{\{2\}} \right).$$

Сравнение $x_{\{2\}} + \frac{x_{\{1\}}x_{\{3\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{2\}}} \vee x_{\{3\}} + \frac{x_{\{1\}}x_{\{2\}}}{x_{\{1\}} + x_{\{3\}}}$ после элементарных

преобразований сводится к сравнению $x_{\{2\}} \vee x_{\{3\}}$.

Таким образом, если $x_{\{2\}} \geq x_{\{3\}}$, то $V' \geq V''$, что свидетельствует о том, что порядок просмотра групп, при котором $x_{\{2\}} \geq x_{\{3\}} \geq x_{\{1\}}$ (т.е. маленькая, большая, средняя) не хуже всех остальных.

Рассуждая аналогичным образом, легко показать, что наилучшим порядком просмотра групп является большая, маленькая, средняя.

Далее, докажем две леммы, позволяющие понять структуру оптимального порядка просмотра групп для произвольного m .

Лемма 1. Пусть задан некоторый порядок просмотра групп $\{1\}, \{2\}, \dots, \{m\}$ и согласно оптимальному алгоритму, нужно придерживаться пороговой стратегии, начиная с номера k , и пусть, начиная с этого номера группы расположены, в любом порядке, отличном от порядка убывания численности. Тогда такой порядок не является оптимальным.

Доказательство. Пусть реализуется пороговая стратегия, начиная с k -й группы. Тогда, согласно формуле полной вероятности, вероятность того, что в группах $k, \dots, j-1$ не было максимальных элементов, а в группе j он появился (и согласно пороговой стратегии на нем была сделана остановка) и этот элемент к тому же оказался наилучшим, равна

$$\frac{x_1 + \dots + x_{k-1}}{x_1 + \dots + x_{j-1}} \cdot \frac{x_j}{x_1 + \dots + x_j} \cdot \frac{x_1 + \dots + x_j}{x_1 + \dots + x_m} = \frac{x_1 + \dots + x_{k-1}}{x_1 + \dots + x_m} \cdot \frac{x_j}{x_1 + \dots + x_{j-1}}.$$

Суммируя по j от k до m , получим оптимальное значение вероятности нахождения наилучшего элемента при данном порядке просмотра:

$$V'(k) = \frac{x_1 + \dots + x_{k-1}}{x_1 + \dots + x_m} \sum_{j=k}^m \frac{x_j}{x_1 + \dots + x_{j-1}}.$$

Поскольку, согласно предположению леммы, порядок численностей групп отличен от убывающего, среди групп k, \dots, m найдутся две соседние группы, такие, что $x_i < x_{i+1}$. Поменяем эти две группы местами, остальные группы оставим на месте и выпишем значение $V''(k)$ для альтернативного порядка просмотра. Очевидно, в выражениях $V'(k)$ и $V''(k)$ одинаковые множители перед знаком суммы, а под знаком суммы меняется вид только слагаемых с индексами i и $(i+1)$. Обозначим сумму этих двух слагаемых в первом и во втором случаях через S' и S'' соответственно. Обозначим

$$\sigma = x_1 + \dots + x_{i-1}, \text{ тогда } S' = \frac{x_i}{\sigma} + \frac{x_{i+1}}{\sigma + x_i}, \quad S'' = \frac{x_{i+1}}{\sigma} + \frac{x_i}{\sigma + x_{i+1}}.$$

После элементарных преобразований имеем

$$S' - S'' = \frac{x_i x_{i+1} (x_i - x_{i+1})}{\sigma(\sigma + x_i)(\sigma + x_{i+1})} < 0.$$

Значит это свидетельствует о том, что порядок просмотра групп не является оптимальным.

Таким образом, группы, на которых следует делать остановку в случае появления в них максимального элемента, должны следовать в убывающем (точнее, невозрастающем) порядке численности элементов.

Лемма 2. Последовательность групп, на которых следует делать остановку в случае появления в них максимального элемента, должна начинаться с группы, численность которой наибольшая среди всех групп (а если таких групп несколько, то с одной из них).

Доказательство. Пусть установлен оптимальный алгоритм просмотра групп $x_1, \dots, x_{k-1}, x_k, \dots, x_m$ и пусть алгоритм Брюса предписывает останавливаться на максимальном элементе, начиная с k -й группы. Если установлен оптимальный порядок просмотра групп, то, согласно лемме 1 должно выполняться условие $x_k \geq x_{k+1} \geq \dots \geq x_m$.

Обозначим через $V(k)$ вероятность нахождения наилучшего элемента при условии, что просмотр начат с k -й группы. Пусть $x_k \neq \max(x_1, \dots, x_m)$, тогда среди групп $1, \dots, k-1$ найдется группа i такая, что $x_i > x_k$.

Переупорядочим группы $1, \dots, k-1$ так, чтобы эта группа оказалась на $(k-1)$ -м месте. Это не повлияет на вычисление $V(k)$ и прочих $V(j)$ при $j > k$, поскольку не имеет значения порядок следования пропускаемых групп, имеет значение только их общая численность $x_1 + \dots + x_{k-1}$. После переупорядочения $x_{k-1} > x_k$. Поскольку алгоритм Брюса предписывает

начать просмотр именно с k -й группы, то $\sum_{j=k}^m r_j \geq 1$, но $\sum_{j=k+1}^m r_j < 1$.

Покажем, что условие $V(k) > V(k+1)$ равносильно условию $\sum_{j=k+1}^n r_j < 1$.

Действительно, пусть $V(k) > V(k+1)$. Тогда, согласно (1)

$$\begin{aligned} \prod_{j=k}^m q_j \sum_{j=k}^m r_j &> \prod_{j=k+1}^m q_j \sum_{j=k+1}^m r_j \Leftrightarrow q_k \sum_{j=k}^m r_j > \sum_{j=k+1}^m r_j \Leftrightarrow \\ & q_k r_k + q_k \sum_{j=k+1}^m r_j > \sum_{j=k+1}^m r_j. \end{aligned}$$

Но $q_k r_k = p_k$, тогда, перенося второе слагаемое левой части вправо и принимая во внимание, что $1 - q_k = p_k$, переходим к равносильному

неравенству $p_k > p_k \sum_{j=k+1}^m r_j \Leftrightarrow \sum_{j=k+1}^m r_j < 1$, что и требовалось доказать.

Докажем еще одно вспомогательное утверждение. Пусть $V(k) > V(k+1)$.

Заменим p_k на некоторую другую вероятность p'_k , такую, что $p'_k > p_k$, остальные вероятности оставим без изменения. Соответствующую новой ситуации вероятность нахождения наилучшего элемента при той же самой пороговой стратегии выбора обозначим через $V'(k)$. Тогда $V'(k) > V(k)$.

Действительно, согласно формуле полной вероятности имеет место рекуррентная формула

$$V(k) = p_k \prod_{j=k+1}^m q_j + (1 - p_k)V(k+1), \quad (3)$$

где первое слагаемое описывает вероятность ситуации, когда k -е испытание Бернулли привело к успеху, а последующие испытания окончились неудачей, а второе слагаемое — ситуацию, когда в k -м испытании произошла неудача. Принимая во внимание исходное предположение $V(k) > V(k+1)$, имеем:

$$\prod_{j=k+1}^n q_j > V(k+1). \quad (4)$$

С другой стороны,

$$V'(k) = p'_k \prod_{j=k+1}^m q_j + (1 - p'_k)V(k+1). \quad (5)$$

Вычитая из (5) выражение (3), имеем:

$$V'(k) - V(k) = (p'_k - p_k) \left(\prod_{j=k+1}^m q_j - V(k+1) \right). \quad (6)$$

Заметим, что выражение, стоящее в правой части (*4) строго положительно, поскольку первый сомножитель положителен в силу предположения $V'(k) > V(k)$, а второй — в силу (4). Таким образом, $V'(k) > V(k)$, что противоречит предположению об оптимальности исходного порядка просмотра групп.

Оказывается, что в оптимальном порядке просмотра в роли отбрасываемых групп не всегда выступают группы наименьшей численности. Рассмотрим численный пример. Пусть $n = 6$, $\bar{x} = (5, 8, 10, 10, 10, 10)$. Согласно леммам 1 и 2 оптимальными могут быть только три порядка просмотра, а именно: $\bar{x}_1 = (5, 8, 10, 10, 10, 10)$, $\bar{x}_2 = (5, 10, 10, 10, 10, 8)$, $\bar{x}_3 = (8, 10, 10, 10, 10, 5)$. Оказывается, что во всех трех порядках просмотра $k = 3$, при этом \bar{x}_1 является наихудшим из трех приведенных ($V(\bar{x}_1) \approx 0,427$) и $V(\bar{x}_2) \approx 0,433 < V(\bar{x}_3) \approx 0,435$.

Аналогично задаче о ранце, «жадный» алгоритм не всегда срабатывает.

Численный поиск оптимального расположения для n групп, в общем случае, требует перебора всех возможных перестановок в последовательности чисел $1 \dots m$ (индексов групп), т.е. $m!$ итераций. Леммы 1 и 2 дают возможность существенно сократить количество вариантов, тем не менее, количество итераций алгоритма полного перебора имеет факториальную зависимость от начального количества групп, что не позволяет его использовать даже при сравнительно небольших n . Поэтому было принято решение использовать так называемые «генетические

алгоритмы», которые находят приближительное решение задачи. Эффективность такого подхода подтверждается его многочисленными использованиями при решении задач дискретной оптимизации [3, 4].

Как известно (см., например, [2]), для описания генетического алгоритма достаточно указать функцию приспособленности и операторы мутации и скрещивания. В качестве функции приспособленности естественно использовать вероятность выбора оптимального индивидуума (кандидата). Согласно лемме 2 выбор должен начинаться с группы наибольшей размерности. Пусть $x^* = \max_{i=1, m} x_i$. Рассмотрим последовательность $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_{m-1}$, которая получена из последовательности x_1, \dots, x_n путем исключения из нее группы x^* (если групп такого типа размера несколько, то исключаем ту, что имеет наименьший индекс). Тогда для любой перестановки $\tilde{x}_{i_1}, \dots, \tilde{x}_{i_{m-1}}$ оптимальное расположение x^* определяется

однозначно, как $k^* = \max_k \sum_{i=k}^m r_i(k)$, где

$$r_i(k) = \begin{cases} \frac{x^*}{S_k}, & \text{при } i = k \\ \frac{S_k}{\tilde{x}_i}, & \text{при } i > k \end{cases}, \text{ а } S_k = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i.$$

Согласно Лемме 1 группы в последовательности $\tilde{x}_{i_{k^*+1}}, \dots, \tilde{x}_{i_{m-1}}$ должны быть расположены в порядке убывания. Таким образом, для выбора оптимального расположения групп x_1, \dots, x_m достаточно рассматривать последовательности $\tilde{x}_{i_1}, \dots, \tilde{x}_{i_{m-1}}$, вставляя группу x^* на позицию k^* и отсортировать хвост $\tilde{x}_{i_{k^*+1}}, \dots, \tilde{x}_{i_{m-1}}$ в порядке убывания. При этом вероятность выбора оптимального индивидуума (она же функция приспособленности)

$$F(i_1, \dots, i_{m-1}) = \prod_{j=k}^m q_j(k^*) \sum_{j=k^*}^n r_j(k^*), \text{ где}$$

$$q_i(k) = \begin{cases} \frac{S_{k-1}}{S_{k-1} + x^*}, & \text{при } i = k \\ \frac{S_{i-1} + x^*}{S_i + x^*}, & \text{при } i > k \end{cases}.$$

В качестве оператора скрещивания используется односточный кроссовер ([2]). Пусть есть две перестановки $1 \dots m-1 : i_1, \dots, i_{m-1} \cap$ и j_1, \dots, j_{m-1} .

Они порождают двоих потомков по следующему принципу: выбираем случайным образом точку (индекс) скрещивания k в пределах $1, \dots, n$ и формируем перестановки

$$i_1, \dots, i_k, \tilde{j}_{k+1}, \dots, \tilde{j}_m \text{ и } j_1, \dots, j_k, \tilde{i}_{k+1}, \dots, \tilde{i}_m,$$

где $\tilde{j}_{k+1}, \dots, \tilde{j}_m$ образуются из последовательности j_{k+1}, \dots, j_m путем замены повторяющихся индексов в i_1, \dots, i_k на уникальные. Аналогично формируется последовательность $\tilde{i}_{k+1}, \dots, \tilde{i}_m$.

Полученные последовательности индексов образуют потомков $\tilde{x}_{i_1}, \dots, \tilde{x}_{i_k}, \tilde{x}_{j_{k+1}}, \dots, x_{j_m}$ и $\tilde{x}_{j_1}, \dots, \tilde{x}_{j_k}, \tilde{x}_{i_{k+1}}, \dots, x_{i_m}$, которые принимают участие на этапе отбора генетического алгоритма.

Оператор мутации меняет местами два произвольных (выбранных случайным образом) индекса в перестановке.

В следующей таблице приведены результаты работы описанного выше генетического алгоритма. Тут P_{\max} — вероятность выбора наилучшего индивидуума при оптимальной последовательности групп, а P_{\min} — вероятность выбора наилучшего индивидуума при наихудшей перестановке последовательности групп.

Кол-во групп	P_{\max}	P_{\min}	Среднее число итераций
100	0,373064	0,370633	580
200	0,370539	0,369356	1418
500	0,368929	0,368515	3217

Так как генетический алгоритм не гарантирует точного оптимального решения и относится к классу так называемых эвристических алгоритмов, то для получения лучшего результата алгоритм применяется несколько раз подряд для одной и той же задачи, но с различными начальными выборками.

Для оценки результата для каждой задачи находится наихудший вариант перестановок, т.е. такая последовательность групп, для которой, применяя алгоритм оптимального поиска, вероятность выбора наилучшего индивидуума наименьшая (P_{\min}). Для этого используется генетический алгоритм с теми же операторами скрещивания и мутации. Хромосомами (индивидуумами алгоритма) служат перестановки начальной последовательности x_1, \dots, x_m , а функцией приспособленности является вероятность выбора наилучшего индивидуума в этой последовательности.

Выводы

Последовательность групп, позволяющая максимизировать вероятность выбора наилучшего индивидуума в обобщенной задаче оптимального выбора, должна удовлетворять ряду правил, приведенных в леммах 1 и 2. Тем не менее, количество вариантов расстановок групп, удовлетворяющих данным правилам, остается достаточно большим (при большом количестве исходных групп) и перебрать их все не представляется возможным.

Предлагаемый генетический алгоритм численного поиска приближительного решения задачи обеспечивает нахождение решения, близкого к оптимальному, с высокой точностью.

1. Shou-Ren Hsiau, Jiing-Ru Yang. A natural variation of the standard secretary problem. *Statistica Sinica*, vol. 10 (2000), pp. 639–646.
2. Thomas Bruss. Sum the odds to one and stop. *The annals of probability*, 2000, vol. 28, no. 3, pp. 1384–1391.
3. Fonseca C.M., Fleming P.J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. *Proc. of the 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, 1993, pp. 416–423.
4. Potvin J. Genetic algorithms for the travelling salesman problem. *Annals of Operation Research*, vol. 63 (1996), pp. 339–370.

Получено 12.01.2014

Дискретные системы управления

УДК 519.7 : 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО ПО ПРИБЛИЖЕННОЙ ИДЕНТИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

А.В. Гуммель

Институт космических исследований НАН Украины и НКА Украины

Рассмотрена задача синтеза управления с использованием модели, идентифицированной в условиях ограниченной неопределенности. Для синтеза такого управления предлагается метод комбинирования идентификации системы, основанной на 4SID-методе, и использования асимптотического идентификатора состояний для позиционирования полюсов идентифицированной модели неизвестной системы. С помощью численного моделирования проводится анализ влияния синтезированного управления на скорость переходного процесса и уровня шума в исходной системе.

Розглянуто задачу синтезу керування з використанням моделі, ідентифікованої в умовах обмеженої невизначеності. Для синтезу такого керування пропонується метод комбінування ідентифікації системи, що базується на 4SID-методі, та використання асимптотичного ідентифікатору стану для позиціонування полюсів ідентифікованої моделі невідомої системи. За допомогою чисельного моделювання проводиться аналіз впливу синтезованого керування на швидкість перехідного процесу і рівня шуму у вихідній системі.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматривается синтез управления объекта с априори неизвестной структурой и параметрами в условиях ограниченной неопределенности. В большинстве существующих методов управления предполагается, что математическая модель управляемого объекта и значения ее параметров известны. Если же она неизвестна, то прибегают к методам идентификации. Эти методы позволяют восстановить модель исследуемого объекта по данным входа и выхода, которые получены из экспериментов, проведенных на этом объекте. В случае когда информация, полученная из экспериментов на объекте, содержит стохастическую неопределенность типа белого шума, все усилия направляются на то, чтобы получить структуру модели и несмещенную оценку ее параметров, соответствующих детерминированному случаю. При этом точность идентификации позволяет применять существующие методы робастного синтеза, которые позволяют найти приемлемое управление, обеспечивающее желаемые показатели замкнутой системы. Если о погрешностях известно лишь, что они ограничены по величине или по мощности, то восстановление полной модели с несмещенными параметрами оказывается во многих случаях

принципиально невозможным. Для многомерных систем это особенно актуально по ряду объективных причин, связанных главным образом с плохой обусловленностью информационных матриц, которые приходится обращать практически во всех известных методах идентификации. В результате восстановить удастся только аппроксимирующие модели, размерность которых будет меньше, чем у исходной системы, генерирующей данные в экспериментах.

В предшествующих исследованиях удалось разработать методы идентификации, ориентированные на случаи с такой нестохастической неопределенностью, которые позволяют строить аппроксимирующие модели, согласованные по точности с погрешностями в исходных данных. Для линейных стационарных систем эти методы состоят из двух основных этапов. На первом — определяется структура модели, т.е. ее размерность, которая устанавливается по значениям сингулярных чисел при SVD (сингулярном разложении) информационных матриц, составляемых из исходных входных и выходных данных. На втором этапе решается задача параметрической идентификации при известной структуре модели. Более подробное описание этих методов дано в работах [1–3].

Цель данного исследования состоит в том, чтобы установить, в какой мере аппроксимирующие модели, получаемые при идентификации, пригодны для решения прикладных задач и как такие модели следует использовать в задачах синтеза управления, а в конечном итоге предложить обоснованный метод решения задач синтеза управления на основе идентифицированной модели. В рамках данной статьи будет рассмотрен лишь случай дискретной динамической системы с одним входом и одним выходом.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Предположим, что система, для которой необходимо синтезировать управление, есть стационарная дискретная линейная динамическая система с одним входом и одним выходом, для которой может быть использовано следующее описание:

$$\begin{cases} x_{t+1} = Ax_t + bu_t + \xi_t, \\ y_t = cx_t + du_t + \eta_t, \end{cases} \quad (1)$$

где x_t — вектор состояния для момента t размерности n ; u_t — скалярный вход, а y_t — скалярный выход системы; $\dim A = n \times n$, b, d — вектор-столбцы размерности n , а c — вектор-строка размерности n ; η_t — погрешности измерений, ограниченные по норме l_2 , а ξ_t — возмущения на входе, так же ограниченные по норме. Известными являются данные входного и выходного воздействий u_t и y_t на интервале $[0, N]$. Нам неизвестны размерности системы n и значения коэффициентов соответствующих матриц, которые требуется определить. Для получения данных выхода будем проводить активные эксперименты на объекте. Чтобы определить размерность системы, желательно обеспечить возбуждение всех

мод спектра, близкое к равностепенному, во время проведения эксперимента. В исследовании будет использоваться 4SID-метод, который в основном развит для задач со стохастической неопределенностью. Однако с применением некоторых модификаций данный метод может быть использован в задаче с ограниченной погрешностью.

В данной работе будем использовать серию прямоугольных импульсов максимально возможной амплитуды, чередующихся с интервалами свободного движения. Наибольшую продолжительность импульса следует выбрать равной времени переходного процесса системы. Применение импульсов большей продолжительности приведет к появлению стационарного режима в выходных данных системы, которые не имеют дополнительной ценности для процесса идентификации. Продолжительность последующих импульсов уменьшается до пределов, целесообразных для каждой конкретной задачи. Интервал свободного движения между импульсами должен быть достаточен для возвращения системы к исходному режиму:

$$u_t = \begin{cases} u_0, & t \in S_0, S_2, \dots, S_{2k}, \\ 0, & t \in S_1, S_3, \dots, S_{2k+1}, \end{cases} \quad (2)$$

где S_0, S_2 — интервалы возбуждения, а S_1, S_3 — интервалы свободного движения.

Идентификацию системы (1) по этим входным и соответствующим им выходным данным будем проводить с использованием метода выделяемого подпространства, или 4SID-метода. Этот метод основан на теории реализации и активно развивается последние 40 лет. В предположении о стохастической природе шумов и возмущений и при выполнении условий идентифицируемости обоснована состоятельность оценок, получаемых этим методом. Метод ориентирован на многомерные многосвязные системы с описанием в пространстве состояний.

Следуя 4SID-методу, составим расширенные ганкелевы матрицы, используя вход и выход системы:

$$\begin{aligned} U &= [u(1), \dots, u(N - \alpha)], \\ Y &= [y(1), \dots, y(N - \alpha)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $y(t) = [y_t, y_{t+1}, \dots, y_{t+\alpha-1}]^T$, $u(t) = [u_t, u_{t+1}, \dots, u_{t+\alpha-1}]^T$, а $n < \alpha < N$, где $n < \alpha < N$ — предполагаемая размерность модели. Из (1) и (3) можем получить систему матричных уравнений

$$Y = \Gamma_\alpha X + \Phi_\alpha U + Z, \quad (4)$$

где

$$\Gamma_{\alpha} = \begin{pmatrix} c \\ cA \\ \vdots \\ cA^{\alpha-1} \end{pmatrix}; \quad \Phi_{\alpha} = \begin{pmatrix} d & 0 & \dots & 0 \\ cb & d & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ cA^{\alpha-2}b & \dots & cb & d \end{pmatrix}, Z = \Psi_{\alpha}W + V,$$

$$\Psi_{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ c & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ cA^{\alpha-2} & \dots & c & 0 \end{pmatrix}, W = [\xi(1), \dots, \xi(N-\alpha)], V = [\eta(1), \dots, \eta(N-\alpha)].$$

Умножив справа выражение (5) на матрицу $\Pi_{UT}^{\perp} = I - U^T(UU^T)^{-1}U$, получим

$$U\Pi_{UT}^{\perp} = \Gamma_{\alpha}X\Pi_{UT}^{\perp} + Z\Pi_{UT}^{\perp}, \quad (5)$$

где Π_{UT}^{\perp} — проектор на собственное подпространство U , такой, что $U\Pi_{UT}^{\perp} = 0$. Следует заметить, что это возможно только в случае невырожденности матрицы UU^T . Это условие выполняется, например, если на вход подается постоянно возбуждающее воздействие, в данном случае серия прямоугольных импульсов. Так как воздействие постоянно возбуждающее, $\alpha > n$ и N достаточно большое, то $X\Pi_{UT}^{\perp}$ будет иметь ранг не меньший, чем n . Тогда гарантируется и полный ранг матрицы $\Gamma_{\alpha}X\Pi_{UT}^{\perp}$.

В результате сигнальное подпространство, соответствующее одной из реализаций системы, генерирующей данные, может быть выделено, если осуществить SVD (сингулярное разложение) матрицы $U\Pi_{UT}^{\perp}$, т.е. представить ее в виде

$$U\Pi_{UT}^{\perp} = \hat{Q}_s \hat{S}_s \hat{V}_s^T + \hat{Q}_n \hat{S}_n \hat{V}_n^T, \quad (6)$$

где выделены сигнальная часть с индексом s и часть соответствующая шумам и возмущениям, обозначенная индексом n . При отсутствии погрешностей $\hat{S}_n = 0$, а \hat{S}_s имеет n сингулярных чисел, число которых равно размерности генерирующей системы. Наличие ошибки в исходных данных с вероятностью почти равной единице приводит к полным сингулярным матрицам, т.е. матрицам с полным рангом. Процедура разделения на сигнальную и шумовую части сводится тогда к принятию решения, какие сингулярные числа считаем принадлежащими \hat{S}_s , а какие — \hat{S}_n . При увеличении уровня шума количество сингулярных чисел, описывающих динамику идентифицируемой системы, уменьшается. Однако при том же

уровне погрешности, изменение порядка аппроксимирующей модели слабо влияет на вариацию величины

$$S = \sum_{j=1}^{q_1} \frac{|\hat{b}_j \cdot \hat{c}_j|}{|\hat{\lambda}_j|} + \sum_{j=1}^{2q_2} \frac{|\hat{b}_j \cdot \hat{c}_j|}{(\alpha_j^2 + \beta_j^2)}, \quad (7)$$

где q_1 — число действительных собственных значений, а q_2 — количество пар комплексно сопряженных собственных значений $\alpha_j \pm \beta_j$.

При увеличении порядка приближенной модели количество слагаемых в (7), которые по порядку величин существенно отличаются от уровня шума, остается постоянным. Таким образом, количество слагаемых в (7) можно использовать для определения размерности идентифицированной модели, при которой восстанавливается максимально возможное количество мод неизвестной системы при заданном уровне шума, но при этом позволит избежать наличия мод шумовой части в спектре идентифицированной модели. Одним из способов такого использования является итеративная процедура, в которой на каждом этапе производится идентификация с увеличением размерности получаемой модели. Критерием остановки процедуры является наличие слагаемых в выражении (7), порядок которых соответствует уровню погрешности. В результате такой процедуры получена «оптимальная» размерность аппроксимирующей модели Q_{opt} . Так как данная величина зависит от уровня шума в системе, в пределах реальных шумов оценка размерности аппроксимирующей модели по сингулярным числам с устойчивыми параметрами дает модель третьего, реже четвертого порядка. При уменьшении уровня шума значение Q_{opt} стремится к истинной размерности системы.

Этим завершается структурная идентификация системы, т.е. определение порядка аппроксимирующей модели. На следующем этапе 4SID определяются элементы матриц, входящих в (1). Для этого матрица $\hat{Q}_s \hat{S}_s \hat{V}_s^T$ разбивается на произведение двух матриц полного ранга, одна из которых будет Γ_α , а другая — $X \Pi_{U^T}^\perp$. Согласно теории реализаций можно записать, что $\Gamma_\alpha X \Pi_{U^T}^\perp = \Gamma_\alpha T T^{-1} X \Pi_{U^T}^\perp = \tilde{\Gamma}_\alpha \tilde{X} \Pi_{U^T}^\perp$, где $\tilde{\Gamma}_\alpha = \Gamma_\alpha T$; $\tilde{X} = T^{-1} X$, а T — неособая матрица преобразования к другой реализации. Поскольку матрица \hat{Q}_s составлена из n главных сингулярных векторов, и является полноранговой, то можно положить

$$\tilde{\Gamma}_\alpha = \hat{Q}_s. \quad (8)$$

Чтобы найти матрицу A , следует использовать инвариантность сдвига матрицы Γ_α и найти \tilde{A} из переопределенной системы уравнений

$$\Gamma_{2:\alpha} = \Gamma_{1:\alpha-1} A, \quad (9)$$

где $\Gamma_{2:\alpha}$ — матрица, получаемая из Γ_α исключением первого блока c , а $\Gamma_{1:\alpha-1}$ — последнего блока $cA^{\alpha-1}$.

Ортогональность матриц $\hat{Q}_s = \tilde{\Gamma}_\alpha$ и \hat{Q}_n позволяет из (6) получить переопределенную систему уравнений

$$\hat{Q}_n Y = \hat{Q}_n \Phi_\alpha U. \quad (10)$$

Используя МНК, можно определить оставшиеся элементы системы b и d . Этим завершается вся процедура идентификации классическим 4SID-методом.

Однако при малых погрешностях сингулярные числа, соответствующие возмущениям или плохо наблюдаемым модам системы, становятся очень малыми, что приводит к неустойчивой процедуре нахождения матрицы Q_n . Поэтому более эффективной представляется модификация 4SID-метода, основанная на представлении модели системы в канонической жордановой форме с уже существенными собственными значениями и разложением выхода по соответствующим им собственным функциям. Так как в данных условиях различные реализации системы эквивалентны между собой по выходу, без потери общности можем положить, что мы находим оценки параметров системы в канонической жордановой реализации, в которой $\hat{A} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{Q_{\text{opt}}}\}$, действительные собственные значения λ_j , $j = \overline{1, q_1}$ и комплексные $\alpha_j \pm i\beta_j$, $j = q_1 + 2s - 1$, $s = \overline{1, q_2}$, где $Q_{\text{opt}} = q_1 + 2q_2$, а $b_j = 1$, $j = \overline{1, q_1}$; $b_j = 0$, $j = q_1 + 2s - 1$, $s = \overline{1, q_2}$; $b_j = 1$, $j = q_1 + 2s$, $s = \overline{1, q_2}$. Здесь q_1 определяет число установленных действительных, а q_2 — пар комплексных собственных значений. Тогда для нахождения \hat{c} используем разложения выходного сигнала по собственным функциям

$$y_k = \sum_{j=1}^{q_1} c_j x_j^r(k) + \sum_{j=1}^{q_2} \left(c_{q_1+2j-1} x_{q_1+2j-1}^c(k) + c_{q_1+2j} x_{q_1+2j}^c(k) \right), \quad k = \overline{1, N}, \quad (11)$$

где $x_j^r(k)$ ($j \in \overline{1, q_1}$) — базисные решения, соответствующие действительным собственным значениям λ_j , а пара с $x_{n_1+2j-1}^c(k)$ и $x_{n_1+2j}^c(k)$ $j = \overline{1, q_2}$ — комплексным значениям $\alpha_j \pm i\beta_j$ для заданного входного воздействия в виде последовательности прямоугольных импульсов.

Состояние системы $x_j^r(k)$ находится из решения задачи Коши для разностных уравнений

$$\begin{cases} x_{t+1j}^r = \lambda_j x_{t,j}^r + u_0, t \in S_0, S_2, \dots, S_{2k}, \\ x_{t+1j}^r = \lambda_j x_{t,j}^r, t \in S_1, S_3, \dots, S_{2k+1} \end{cases} \quad (12)$$

при нулевых начальных условиях $x_t^r \Big|_{t=0} = 0$.

Соответственно, $x_{n_1+2j-1}^c(k)$ и $x_{n_1+2j}^c(k)$ вычисляются из уравнений

$$\begin{cases} x_{t+1, q_1+2j-1}^c = \alpha_j x_{t, q_1+2j-1}^c + \beta_j x_{t, n_1+2j}^c, t \in S_0, S_2, \dots, S_{2k}, \\ x_{t+1, q_1+2j}^c = -\beta_j x_{t, q_1+2j-1}^c + \alpha_j x_{t, q_1+2j}^c + u^*, t \in S_0, S_2, \dots, S_{2k}, \\ x_{t+1, q_1+2j-1}^c = \alpha_j x_{t, q_1+2j-1}^c + \beta_j x_{t, q_1+2j}^c, t \in S_1, S_3, \dots, S_{2k+1}, \\ x_{t+2, q_1+2j}^c = -\beta_j x_{t, q_1+2j-1}^c + \alpha_j x_{t, q_1+2j}^c, t \in S_1, S_3, \dots, S_{2k+1} \end{cases} \quad (13)$$

с нулевыми начальными условиями $x_{t, q_1+2j+1}^c \Big|_{t=0} = x_{t, q_1+2j}^c \Big|_{t=0} = 0$.

Из (11), (12) и (13) при помощи регрессии определяем оценку \hat{c} .

В результате описанного процесса идентификации получаем аппроксимирующую модель неизвестной системы в канонической жордановой форме.

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА

Хотя полученная в результате процесса идентификации модель имеет меньшую размерность по сравнению с реальной системой, есть основания полагать, что, исходя из близости выходов неизвестной системы и полученной модели, можно получить приемлемое управление по выходу исходной системы на основе упрощенной модели, полученной при идентификации. Поскольку установить однозначное взаимоотношение между модами неизвестного процесса и модели невозможно, провести синтез классического модального управления для исходной системы нельзя. В рамках данного исследования построим модальное управление для полученной упрощенной модели, а затем полученный результат используем для синтеза управления по выходу исходной модели.

Для реализации такой обратной связи необходимо провести определенные преобразования системы и добавить идентификатор состояний. Тогда построение управления сведется к нескольким шагам. На первом из них необходимо привести модель к каноническому управляемому представлению. Затем следует записать идентификатор состояния модели и, если это возможно, оптимизировать его параметры. На следующем шаге выбирается желаемый спектр замкнутой системы и вычисляются соответствующие коэффициенты обратной связи. На завершающем этапе численным моделированием проводится исследование процесса управления замкнутого обратной связью исходной реальной системы.

Для перехода к управляемому каноническому представлению, воспользуемся несингулярным оператором:

$$P = \begin{pmatrix} \hat{b} & \hat{A}\hat{b} & \dots & \hat{A}^{Q_{\text{opt}}-1}\hat{b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{b}_1 & \hat{A}_1\hat{b}_1 & \dots & \hat{A}_1^{Q_{\text{opt}}-1}\hat{b}_1 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (14)$$

Система может быть записана в виде

$$\begin{cases} x_{t+1} = P\hat{A}P^{-1}x_t + P\hat{b}u_t + \xi_t \\ y_t = \hat{c}P^{-1}x_t + \eta_t \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_{t+1} = \hat{A}x_t + \hat{b}u_t + \xi_t \\ y_t = \hat{c}x_t + \eta_t \end{cases}. \quad (15)$$

Идентификатор состояния. Опишем один из возможных способов построения идентификатора состояний. В рассматриваемом случае системы с одним входом и одним выходом можно взять идентификатор, который описывается следующим уравнением:

$$\hat{x}_{k+1} = \begin{pmatrix} \hat{A} - l\hat{c}^T \end{pmatrix} \hat{x}_k + ly_k + \hat{b} \cdot u_k, \quad (16)$$

где вектор l выбирается так, чтобы матрица $\begin{pmatrix} \hat{A} - l\hat{c}^T \end{pmatrix}$ была устойчивой, а \hat{x}_k — текущий вектор состояния, соответствующий аппроксимирующей модели в управляемой канонической форме. Так как для синтеза управления не имеет значения, в каком базисе рассматривается задача, нет необходимости возвращаться к жордановой канонической форме.

Параметр l отвечает за скорость, с которой идентификатор будет адаптироваться к изменению выходного сигнала исходной системы. В принципе при точных данных можно построить идентификатор, который идеально следит за выходом системы. Однако при наличии шума уменьшение времени переходного процесса в (16) может привести к усилению шума на выходе идентификатора. Исходя из этого, чтобы минимизировать влияние идентификатора состояния на качество синтезированной обратной связи, предлагается искать параметр l как решение задачи оптимизации. Целевым функционалом, который предстоит минимизировать, будет выступать норма невязки выхода исходной системы и выхода модели с идентификатором состояния. Такая задача эквивалентна классической параметрической идентификации. Оптимизация будет производиться по параметру идентификатора l . Ограничения на параметр l , которые следуют из условия устойчивости идентификатора, могут быть опущены, так как неустойчивость идентификатора приведет только к увеличению целевого функционала. Для решения данной задачи целесообразно использовать выходные данные исходной системы, на которых проводилось решение задачи идентификации. В качестве демонстрации на рис. 1, где приведена зависимость нормы невязки выхода исходной системы и выхода модели с идентификатором состояния от параметра l , представлен результат решения этой задачи для случая скалярного параметра идентификатора состояния l . В случае когда размерность параметра больше единицы оптимизация проводится в пространстве размерности, соответствующей размерности идентификатора состояния.

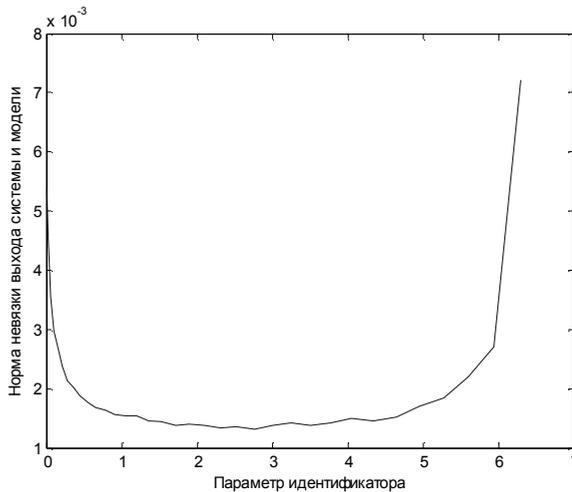


Рис. 1. Зависимость уровня шума замкнутой исходной системы от смещения значений спектра

Принцип управления. При модальном управлении следует определить желаемый спектр системы после ее замыкания. Для этого выберем необходимое смещение каждого собственного значения и определим коэффициенты обратной связи. Детальное описание данной процедуры может быть найдено в [6].

Предлагается последовательный синтез модального управления, начиная со смещения собственного значения самой медленной моды, более сложные виды смещения собственных значений требуют более детального анализа.

В завершении синтеза управления $u_k = -k^T \hat{x}_k + v$ получаем замкнутую систему, которая обеспечивает желаемый спектр собственных значений для аппроксимирующей модели. В то же время замыкание этой же обратной связью, синтезированной на основе аппроксимирующей модели и идентификатора (16), даст замкнутую систему размерности $n + Q_{opt}$, которая записывается в виде

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + \xi_k \\ \hat{x}_{k+1} = (\hat{A} - l\hat{c})\hat{x}_k + ly_k + \hat{b}\hat{u}_k \\ y_k = cx_k + \eta_k \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + B\hat{u}_k + \xi_k \\ \hat{x}_{k+1} = (\hat{A} - l\hat{c})\hat{x}_k + l(cx_k + \eta_k) + \hat{b}\hat{u}_k \\ y_k = cx_k + \eta_k \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ \hat{x}_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ lc & \hat{A} - l\hat{c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ \hat{x}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ \hat{b} \end{pmatrix} \hat{u}_k + \begin{pmatrix} \xi_k \\ l\eta_k \end{pmatrix} \\ y_k = cx_k + \eta_k \end{cases} \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ \hat{x}_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -Bk \\ lc & \hat{A} - l\hat{c} - \hat{b}k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ \hat{x}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ \hat{b} \end{pmatrix} u_k + \begin{pmatrix} \xi_k \\ l\eta_k \end{pmatrix} \\ y_k = cx_k + \eta_k \end{cases}$$

В результате ожидается, что синтезированная таким образом обратная связь, при замыкании выходной переменной y реальной системы, обеспечит

улучшение ее динамических свойств. Основанием для этого является то, что идентификация системы проводилась с использованием постоянно возбуждающего информативного воздействия. Задачей численного эксперимента будет оценка качества полученного управления при помощи анализа времени переходного процесса и уровня шума при стационарном режиме. Синтезированное управление будет считаться приемлемым, если оно способно обеспечить меньшее время переходного процесса, при этом уровень шума в замкнутой реальной системе после достижения стационарного режима не должен значительно превышать исходного уровня шума в системе.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

При численном моделировании были получены данные, позволяющие сделать определенные оценки относительно качества синтезированного управления. На рис. 2 сплошной линией изображена зависимость времени переходного процесса замкнутой системы от величины смещения самой медленной моды идентифицированной модели. Как видно из рисунка, подобное управление способно обеспечить меньшее время переходного процесса замкнутой системы.

Что же касается уровня шума, на рис. 3 можно видеть, что увеличение расстояния смещения мод влечет за собой увеличение уровня шума в замкнутой системе (17)

$$\varepsilon = \frac{\|y_t - \tilde{y}_t\|_2}{\|y_t\|_2}, \quad (18)$$

где y_t — выход идентифицируемой системы после замыкания обратной связью при воздействии шума, \tilde{y}_t — выход идентифицируемой системы после замыкания обратной связью без воздействия шума. Таким образом, уменьшение времени переходного процесса приводит к росту шумов выходного сигнала.

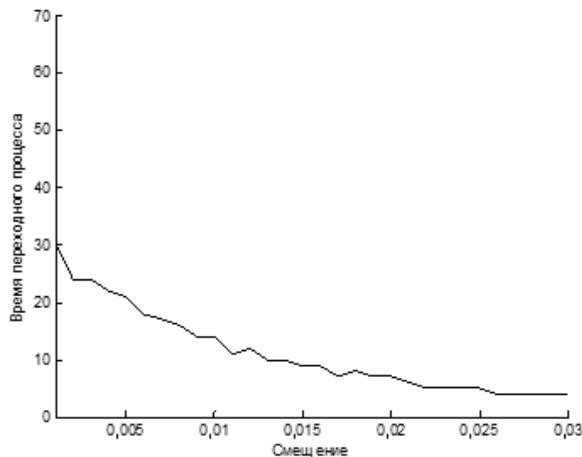


Рис. 2. Время переходного процесса в зависимости от смещения мод

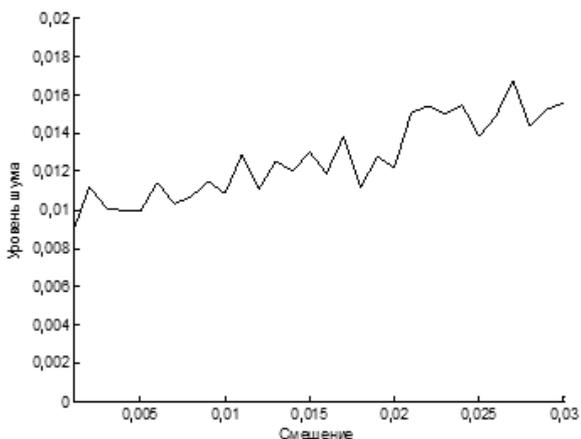


Рис. 3. Уровень шума в зависимости от смещения мод

Выходной сигнал замкнутой системы на стационаре может не соответствовать уровню выходного сигнала исходной системы при той же амплитуде входного воздействия. Равенство выходных сигналов исходной и замкнутой систем на стационаре достигается с помощью изменения амплитуды управляющего сигнала в зависимости от смещения спектра, как это показано на рис. 4, где выходной сигнал исходной системы изображен непрерывной линией.

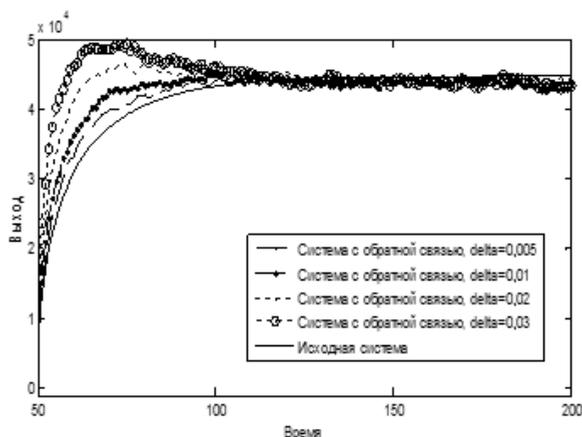


Рис. 4. Выход систем с обратной связью и исходной системы при различных амплитудах входа

Выводы

На основе результатов, полученных в ходе исследования, можно сделать вывод, что аппроксимирующие модели, полученные в процессе идентификации, возможно использовать для улучшения динамических характеристик неизвестной исходной системы.

Исходя из свойств синтезированного управления, можем сделать вывод, что применяя описанную выше обратную связь можно получить замкнутую систему с меньшим временем переходного процесса, сохранив желаемый уровень сигнала выхода. При этом уровень шума замкнутой системы будет

оставаться на уровне шума в выходном сигнале исходной системы или, по крайней мере, не будет его сильно превышать. Однако уменьшение времени переходного процесса приводит к увеличению уровня шума в замкнутой системе, поэтому такой синтез управления необходимо рассматривать как компромисс между допустимым уровнем шума и необходимой скоростью переходного процесса.

Направлением дальнейшего развития описанного подхода является анализ различных способов перемещения собственных значений исходной системы, в том числе и итеративного синтеза управления, для достижения большей эффективности управления.

1. Губарев В.Ф. Метод итеративной идентификации многомерных систем по неточным данным. Часть 1. Теоретические основы / В.Ф. Губарев // Проблемы управления и информатики. — 2006. — № 5–2. — С. 16–31.
Gubarev V.F. Method of iterative identification of multidimensional systems using biased data. Part 1. Theoretical bases. *Problems of control and informatics*, 2006, no. 5–2, pp. 16–31.
2. Губарев В.Ф. Метод итеративной идентификации многомерных систем по неточным данным. Часть 2. Алгоритмы / В.Ф. Губарев, П.А. Тигунов // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 2. — С. 5–16.
Gubarev V.F., Tigonov P.A. Method of iterative identification of multidimensional systems using biased data. Part 2. Algorithms. *Problems of control and informatics*, 2007, no. 2, pp. 5–16.
3. О структурно-параметрической идентификации в условиях ограниченной неопределенности и аппроксимирующих моделях многомерных систем / В.Ф. Губарев, А.В. Гуммель, А.А. Кришталь, В.Ю. Олесь // Проблемы управления и информатики. — 2011. — № 3. — С. 42–56.
Gubarev V.F., Gummel A.V., Krishtal A.A., Oles V.Ju. About structural and parametric identification in case of bounded error and approximating models of multidimensional systems. *Problems of control and informatics*, 2011, no. 3, pp. 42–56.
4. Van Overshee P., De Moor. *Subspace Identification of Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996. 157 p.
5. Губарев В.Ф. Особенности и взаимосвязь задач идентификации и управления в условиях неопределенности / В.Ф. Губарев, А.В. Гуммель, А.О. Жуков // Проблемы управления и информатики. — 2010. — № 1. — С. 50–62.
Gubarev V.F., Gummel A.V., Jukov A.O. Specifics and interconnection of identification and control problems in case of uncertainty. *Problems of control and informatics*, 2010, no. 1, pp. 50–62.
6. Андреев Н.А. Управление конечномерными линейными объектами / Н.А. Андреев. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. — 424 с.
Andreev N.A. *Control finite linear objects*. Moscow: Science, 1976. 424 p.
7. Viberg M. Subspace-based methods for the Identification of linear time-invariant systems. *Automatica*, 1995, vol. 31, no. 12, pp. 1835–1852.
8. Verhaegen M., Dewilde, P. Subspace model identification. Part 1. The output-error state-space model identification class of algorithms. *Int. Journal of Control*, 1992, vol. 56, no. 5, pp. 1187–1210.
9. Verhaegen M., Dewilde P. Subspace model identification. Part 3. Analysis of the ordinary output-error state-space model identification algorithms. *Int. Journal of Control*, 1993, vol. 58, no. 3, pp. 555–586.
10. Verhaegen M. Identification of the deterministic part of MIMO state space models given in innovations form from input-output data. *Automatica*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 61–74.

Получено 24.12.2013

Эргатические системы управления

УДК 681.513

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Павлов, Ю.М. Шепетуха

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины

Рассмотрена методология построения сетевых структур, основанная на системной интеграции взаимодействующих функционально-операционных сегментов и распределенных прикладных процессов. В дополнение к традиционной классификации человеко-машинных систем управления, действующих в условиях определенности, риска либо неопределенности, предложено также выделять системы, функционирующие при так называемом детерминированном хаосе, когда малые вариации начальных условий порождают принципиально отличные друг от друга фазовые траектории. В этих случаях моделирование прикладных процессов в распределенных функциональных и операционных компонентах сетевых структур позволяет выявить возможные сценарии, описывающие порождение и развитие хаотического поведения, а также исследовать различные варианты восстановления зон организованного состояния сетевых структур.

Розглянуто методологію побудови мережецентричних структур, що базується на системній інтеграції взаємодіючих функціонально-операційних сегментів та розподілених прикладних процесів. Доповнюючи традиційну класифікацію людино-машинних систем управління, що діють в умовах визначеності, ризику або невизначеності, запропоновано також вирізняти системи, що функціонують за так званого детермінованого хаосу, коли незначні варіації початкових умов породжують принципово відмінні фазові траєкторії. В цих випадках моделювання прикладних процесів у розподілених функціональних і операційних компонентах мережевих структур дозволяє виявити можливі сценарії, що описують породження та розвиток хаотичної поведінки, а також дослідити різні варіанти відновлення організованого стану мережецентричних систем.

ВВЕДЕНИЕ

Возникшее в последнее десятилетие и интенсивно развивающееся научное направление, связанное с созданием так называемой сетевых структур (net-centric) концепции и разработкой на ее основе сетевых систем, находит все более широкое применение в различных областях деятельности человека. Технической основой создания сетевых систем являются современные компьютерные и коммуникационные технологии, используемые для формирования интегрированного информационного пространства, позволяющего

© В.В. Павлов, Ю.М. Шепетуха, 2013

моделировать и исследовать в реальном масштабе времени распределенные функциональные и операционные компоненты сложных прикладных процессов. Так, в настоящее время имеет место все более широкое использование сетецентрического подхода для решения различных задач оперативного анализа ситуации, планирования и осуществления эффективных действий по управлению динамическими объектами различной природы. На смену вертикально организованным иерархическим системам управления постепенно приходят более гибкие горизонтальные сетевые структуры, что позволяет получать своевременный доступ ко всей необходимой информации, достаточно быстро адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям внешней среды и, как следствие этого, принимать более взвешенные, скоординированные и быстрые управляющие решения даже в ситуациях повышенной сложности.

Постановка задачи. Формирование единого информационного пространства дает возможность эффективно координировать, структурировать и интегрировать распределенные в пространстве и времени компоненты информации и знаний, а также других видов ресурсов — с целью создания целостных систем распределенного интеллектуального управления. При этом отдельные локальные элементы системы распределенного управления могут, в свою очередь, описываться достаточно сложными нелинейными математическими моделями. Необходимо отметить, что в данной работе мы не рассматриваем модели физических, химических, биологических процессов, а исключительно модели информационных процессов. Поэтому отдельные функциональные и операционные компоненты интегрированной системы характеризуются некоторыми прикладными процессами преобразования информации, задаваемыми с помощью тех или иных математических моделей, например дискретных отображений, разностных соотношений, дифференциальных уравнений и т.д. Под термином «сеть» будем понимать системную организацию совокупности прикладных процессов и их информационных моделей, определенным образом распределенных как во времени, так и в пространстве. Тогда вышеуказанные математические модели задают не только текущее состояние сети, но и динамические характеристики как всей системы, так и отдельных ее компонентов — прикладных процессов. Такие прикладные процессы могут, в свою очередь, быть линейными либо нелинейными, непрерывными либо дискретными, сосредоточенными либо распределенными, консервативными либо диссипативными.

Каждый из локальных функционально-операционных сегментов характеризует определенный прикладной процесс переработки информации, который может описываться достаточно сложными соотношениями. Например, в [1] приведено следующее выражение для анализа устойчивости поведений оптического резонатора, описываемого сравнительно простой системой дифференциальных уравнений с временными задержками:

$$\begin{aligned} \|\Gamma_1(t)\| &= \|\exp\{\int_{t_{j-1}}^t [-2(\lambda + K_j - |m_1|/2) + \vartheta|m_1|]ds\} \dots \times \\ &\times \exp\{\int_{t_0}^{t_1} [-2(\lambda + K_j - |m_1|/2) + \vartheta|m_1|]ds\} V_0\| \leq \\ &\exp\{\int_{t_{j-1}}^t [-2(\lambda + K_j - |m_1|/2) + |m_1|]ds\} \dots \times \\ &\times \exp\{\int_{t_0}^{t_1} [-2(\lambda + K_j - |m_1|/2) + |m_1|]ds\} V_0, \end{aligned}$$

где $\Gamma_1(t)$ — функция, ограничивающая сверху соответствующую функцию Ляпунова, $t_0, t_1, \dots, t_{j-1}, \dots$ — моменты переключения резонатора, λ — коэффициент релаксации, K_j — коэффициент связи, ϑ — расчетный параметр, m_1 — величина входного сигнала, V_0 — начальное значение функции Ляпунова. Но значительно более сложные и трудно предсказуемые явления возникают при взаимодействии этих локальных функционально-операционных сегментов. В таких случаях может иметь место совместное действие различных нелинейных эффектов, например переходы некоторой совокупности сегментов из упорядоченных состояний в хаотические, а также переходы из одних видов хаотических состояний в другие.

Цель работы — разработка концептуальных аспектов построения сетевых структур, а также систематизация возможных подходов к исследованию процессов взаимодействия и системной интеграции функционально-операционных сегментов в сетях высокой размерности и сложной конфигурации. Методологической основой работы являются общая теория систем, теория конфликтов, теория нелинейной инвариантности, теория возникновения хаотических процессов в нелинейных системах, теория синхронизации и управления хаосом.

ОСОБЕННОСТИ СЕТЕЙ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Специфической чертой нелинейных прикладных процессов преобразования информации в сетях высокой размерности является эффект возникновения так называемого детерминированного хаоса. Как показывает опыт, сеть сложной конфигурации, характеризуемая нелинейными соотношениями, сравнительно редко находится в полностью упорядоченном или полностью хаотическом состояниях. Как правило, ее текущее состояние является промежуточным, при этом соотношение между упорядоченными и хаотическими функционально-операционными сегментами непрерывно меняется как во времени, так и в пространстве. Это означает, что некоторые компоненты сети могут со временем переходить из упорядоченного в хаотическое состояние и обратно, а динамика таких изменений может задаваться различными типами соотношений, как правило нелинейных. Другими словами, имеют место процессы изменения во времени и пространстве границ между хаотическими и организованными зонами многомерной глобальной нелинейной системы. Это приводит к

непрерывному изменению структуры подобной нелинейной системы за счет появления, видоизменения, слияния и ликвидации локальных зон, соответствующих хаотическим и организованным состояниям. Кроме того, такая система может также включать в себя человека, что делает возникающие нелинейные интерактивные процессы преобразования информации явлениями еще более сложными, а траектории будущего развития глобальной системы еще более трудно предсказуемыми, особенно в условиях реального времени.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Принципиально возможным является эффект возникновения хаоса в системе, динамика которой задается детерминированными соотношениями, такими как нелинейные дифференциальные уравнения, не содержащие стохастических компонентов. Поэтому представляется целесообразным модифицировать традиционную классификацию [2] моделей поведения в человеко-машинных системах управления (пункты (а)–(в)) и разграничивать следующие типы систем:

(а) действующие в условиях полной определенности — задающие поведение системы математические соотношения не содержат стохастических компонентов и позволяют точно определить траекторию ее будущего поведения;

(б) действующие в условиях вероятностных оценок и риска — характеризующие поведение системы соотношения содержат один или несколько стохастических компонентов, что позволяет определить вероятностные зависимости для возможных траекторий будущего поведения данной системы;

(в) действующие в условиях неопределенности и слабой структурированности — например, могут быть известны лишь интервалы значений некоторых параметров, могут быть вообще неизвестны точные математические соотношения для описания отдельных элементов системы или их существенных взаимосвязей;

(г) действующие в условиях детерминированного хаоса — задающие поведение системы соотношения являются полностью детерминированными, не содержат стохастических компонентов, но при определенных условиях приводят к возникновению в системе хаотических явлений.

Прикладные процессы, происходящие в системе типа (г), характеризуются тем, что даже незначительные вариации их начальных условий по истечении определенного интервала времени могут порождать принципиально отличные друг от друга фазовые траектории. Подобная гиперчувствительность к начальным условиям является специфической особенностью большинства локальных элементов сложных распределенных систем. Во многих интересных практических случаях переход к хаосу достигается путем изменения в определенных пределах некоторых параметров модели, задающей алгоритмы преобразования информации в

данной системе. Вообще говоря, одной из основных проблем, возникающих при исследовании хаотических процессов, является, во-первых, определение набора существенных параметров $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, влияющих на изменение фазовых траекторий данной системы и, во-вторых, анализ процессов формирования хаоса при изменении значений этих параметров в определенных пределах. При этом сам переход от обычного состояния к хаосу характеризуется рядом характерных явлений, имеющих фундаментальное значение для понимания нелинейных прикладных процессов, таких как устойчивые колебания между двумя размерами — большим и меньшим, а также каскадное удвоение периода для широкого класса одномерных процессов [3]. Поэтому важным аспектом исследования и проектирования сетцентрических систем является проведение количественного и качественного анализа влияния изменения таких параметров на различные варианты развития сценариев, при которых происходит переход от организованного состояния системы к хаосу.

ТИПИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ ПОРОЖДЕНИЯ ХАОСА

Следует также отметить, что процессы порождения хаоса развиваются в соответствии со сравнительно небольшим числом стандартных сценариев, мало зависящих от конкретной системы [3], а сами хаотические поведения динамической системы характеризуются определенными видами фазовых траекторий. Поэтому важным вопросом анализа и синтеза сетцентрических структур является систематизация типичных сценариев порождения хаоса и исследование всего набора характерных для хаотических явлений функциональных и операционных компонентов. Эти типичные сценарии и характерные функционально-операционные компоненты могут служить элементами, из которых может быть построена сетцентрическая система значительно более сложной конфигурации. Выбор таких элементов должен отвечать двум противоречивым требованиям. Во-первых, они должны охватывать существенные составляющие происходящих в сети прикладных процессов обработки информации. Во-вторых, эти процессы не должны описываться чрезмерно громоздкими выражениями. Кроме того, желательно, чтобы данные функционально-операционные компоненты давали возможность формировать графические образы, позволяющие визуализировать отдельные составляющие сценариев формирования хаоса.

Важным практическим примером визуализации нестабильных периодических фазовых траекторий, характерных для хаотических явлений в детерминированных нелинейных динамических системах, являются спиралевидные кривые Лоренца. Динамическая система, описываемая уравнениями Лоренца [4], представляет собой модель конвекционного потока с тремя переменными состояниями. Переменная $x(t)$ характеризует скорость движения потока некоторой жидкости, а переменные $y(t)$ и $z(t)$ представляют собой пространственное распределение температур в слоях

этой жидкости.

Уравнения Лоренца представляют собой три обыкновенных дифференциальных уравнения, два из которых содержат нелинейные члены (произведения переменных):

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax - ay, \\ \dot{y} &= bx - y - zx, \\ \dot{z} &= cz + xy,\end{aligned}\tag{1}$$

где $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$ — дифференцируемые функции, a, b, c — числовые параметры.

Для качественного анализа системы уравнений Лоренца необходимо определить поведение системы вблизи критических точек, т.е. точек, в которых производные функций $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ обращаются в нуль. В наиболее общем случае система нелинейных дифференциальных уравнений (1) имеет три набора критических точек:

$$\begin{aligned}x_{1crit} &= 0, y_{1crit} = 0, z_{1crit} = 0, \\ x_{2crit} &= -\sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1, \\ x_{3crit} &= \sqrt{c(1-b)}, y_{3crit} = \sqrt{c(1-b)}, z_{3crit} = b-1.\end{aligned}\tag{2}$$

При этом одна из критических точек, которая существует при любых значениях числовых параметров, находится в начале координат. Очевидно, что вторая и третья критические точки существуют только при выполнении соотношения $b < 1$. При $b = 1$ все три критические точки сливаются воедино.

Для исследования свойств и визуализации фазовых траекторий вблизи критических точек целесообразно использовать подход, основанный на локальной линеаризации системы нелинейных уравнений (1) и последующем определении корней соответствующего характеристического полинома. В зависимости от конкретных числовых значений параметров a, b, c возможны следующие четыре качественно различных типа функциональных поведений системы:

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к началу координат,

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к точке

$$x_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = -\sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1,$$

— фазовые траектории системы асимптотически приближаются к точке

$$x_{2crit} = \sqrt{c(1-b)}, y_{2crit} = \sqrt{c(1-b)}, z_{2crit} = b-1,$$

— фазовые траектории образуют специфические двухлепестковые спиралевидные линии (называемые кривыми Лоренца), удаляясь от всех критических точек, но в то же время оставаясь в пределах некоторой ограниченной области фазового пространства.

Следует отметить, что даже сравнительно простая система уравнений (1) не решается в квадратурах, т.е. невозможно получить общее решение этой системы дифференциальных уравнений в виде аналитических выражений и

неопределенных интегралов. Поэтому человек, взаимодействующий с прикладными процессами, которые описываются подобными системами дифференциальных уравнений, не может представлять себе обобщенные визуальные образы происходящих в системе явлений. До настоящего времени эвристический метод перебора возможных вариантов является основным практическим средством решения возникающих проблем. В некоторых случаях этот метод позволяет получить ценные для практических приложений результаты.

Как уже говорилось выше, важной практической задачей при построении сетечентрических систем является определение таких функционально-операционных компонентов, которые, с одной стороны, отражают существенные качественные характеристики исследуемых прикладных процессов, а с другой стороны, являются максимально упрощенными и пригодными для анализа моделями этих процессов. Так, уравнения Росслера [5]

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -y - z, \\ \dot{y} &= x + dy, \\ \dot{z} &= e + z(x - f),\end{aligned}\tag{3}$$

где d, e, f — числовые параметры, представляют собой упрощенную модель рассмотренных выше классических уравнений Лоренца. В отличие от уравнений Лоренца, содержащих два нелинейных члена второго порядка, уравнения Росслера содержат единственный нелинейный член — произведение переменных в правой части третьего уравнения. Как результат, двухлепестковые спирали Лоренца превращаются в однолепестковые спирали Росслера. Соответствующее этим спиралям хаотическое поведение системы выражается в эффекте «растяжения» и «свертывания» ее фазовых траекторий.

Важной чертой систем уравнений Лоренца и Росслера является их сильная чувствительность к незначительным изменениям параметров. Это приводит к тому, что численные методы решения могут приводить к существенно различным результатам, например, в зависимости от выбора шага дискретизации. До настоящего времени эвристический метод подбора приемлемого шага дискретизации является наиболее часто встречающимся на практике подходом к количественному анализу влияния существенных параметров на варианты развития хаотических явлений в системе.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАОСОМ

Процесс перехода от упорядоченного состояния к хаотическому приводит к появлению так называемых деградированных зон, исследование которых представляет большой интерес. Также актуальными являются проблемы анализа и систематизации типичных механизмов обратного перехода. Такая трансформация от хаотического к организованному состоянию системы может возникнуть либо в результате самовосстановления деградированных

зон, либо в результате целенаправленного действия механизмов управления хаосом. Разработанные до настоящего времени подходы к управлению хаосом основаны на принудительной стабилизации фазовых траекторий системы путем ввода в нее небольших возмущающих воздействий. Эти возмущающие воздействия поступают на вход системы либо непрерывно, либо дискретно (в точно определенные моменты времени) — так называемый OSG-метод дискретного управления хаотическими явлениями. В связи с важностью обоих подходов для выявления и систематизации качественно характерных функциональных и операционных компонентов прикладных процессов в сетечентрических системах высокой размерности и сложной конфигурации, рассмотрим их основные положения более подробно.

Основная идея метода непрерывного управления хаосом [6] заключается в формировании такого непрерывного возмущающего воздействия, которое существенно не влияет на вид неустойчивых периодических фазовых траекторий, но позволяет осуществить их стабилизацию. Такое переменное по величине воздействие может как вводиться извне, так и формироваться внутри самой динамической системы с использованием принципа обратной связи.

Пусть рассматривается динамическая система, характеризуемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений в векторной форме:

$$\dot{y} = P(y, X) + F(t), \quad (4)$$

где y — измеряемая выходная переменная системы, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — вектор неизменяемых выходных переменных системы, $F(t)$ — действующее на систему переменное во времени возмущающее воздействие. Предполагается, что в отсутствие возмущающего воздействия множество Ω , ограничивающее фазовые траектории исследуемой системы, представляет собой странный аттрактор. При этом выходной сигнал $y_i(t) = y_i(t + T_i) \in \Omega$ соответствует i -й периодической траектории с периодом T_i . Таким образом, данный метод требует предварительного определения всей совокупности неустойчивых периодических траекторий динамической системы. Только после завершения этого этапа можно выбрать ту конкретную траекторию, которая будет стабилизироваться.

В случае когда возмущающее воздействие вводится в систему извне, его величина задается соотношением:

$$F(t) = K[y_i\{t\} - y(t)], \quad (5)$$

где K — экспериментально определяемый весовой коэффициент управляющего воздействия. Важной положительной чертой данного метода является то, что возмущающее воздействие не влияет на решение уравнения (4), соответствующее траектории $y(t) = y_i(t)$. После решения задачи стабилизации величина выходного сигнала $y(t)$ будет достаточно близка к величине сигнала $y_i(t)$ и, следовательно, возмущающее воздействие $F(t)$ будет достаточно малым. Автору не удалось строго доказать применимость

предлагаемого им метода в общем случае, но была экспериментально подтверждена его эффективность в некоторых важных частных случаях, например для стабилизации динамической системы, задаваемой вышеуказанными уравнениями Росслера. Поэтому его можно рассматривать в качестве типичного функционально-операционного сегмента базы знаний о свойствах прикладных процессов в сетевых системах сложной конфигурации.

Управление хаосом с помощью OSG-метода [7] во многом аналогично традиционным дискретным алгоритмам управления с использованием механизма обратной связи. Характерными особенностями метода, определяющими его применимость для решения практических задач, например для стабилизации элементов информационных сетей, задаваемых моделями дискретных преобразований, являются следующие положения: величина управляющего сигнала связи пропорциональна разнице между текущим и желаемым фазовыми состояниями; управляющий сигнал формируется в момент времени, когда нестабильные периодические фазовые траектории пересекают некоторые фиксированные поверхности фазового пространства; координаты вышеуказанных точек пересечения должны быть предварительно определены экспериментальным путем.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИКЛАДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Таким образом, отдельные сегменты прикладных процессов в сетевых системах сложной конфигурации могут моделировать переходы из организованного в хаотическое состояние и обратно. Для понимания динамических свойств многомерной системы необходимо исследовать также процессы взаимодействия между распределенными во времени и пространстве сегментами прикладных процессов. Поэтому в последнее десятилетие возникло новое перспективное направление в области анализа прикладных процессов — синхронизация фазовых траекторий двух взаимосвязанных нелинейных динамических систем — ведущей и ведомой. Так, в работе [8] показано, что диссипативная хаотическая система с временной задержкой в цепи обратной связи может влиять на поведение другой системы таким образом, что возникает синхронизация будущих траекторий этих систем. Другими словами, ведущая система

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax + f(x_\tau), \\ \{x \in R, x_\tau &= x(t - \tau)\}, \end{aligned} \quad (6)$$

порождает поведение ведомой системы, задаваемое соотношением

$$\dot{y} = -ay + f(x), \{y \in R\}, \quad (7)$$

где $x = x(t)$, $y = y(t)$, $f(t)$ — дифференцируемые функции, a, b, τ — числовые параметры.

При этом в момент времени t ведомая система (7) синхронизируется с

будущим состоянием ведущей системы (6) в момент $t + \tau$, т.е. ведомая система может предсказывать будущее поведение ведущей системы. Данное свойство является инвариантным не только по отношению к виду функции f , но и по отношению к величине задержки времени τ , что принципиально позволяет предвидеть будущее поведение сегментов хаотических систем высокой размерности на произвольно больших интервалах времени. Отметим, что синхронизация траекторий принципиально возможна даже в том случае, когда сегменты прикладных процессов, во-первых, находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга, и, во-вторых, обмен информацией между ними является не только двунаправленным, но и однонаправленным.

Следует подчеркнуть, что вышеописанный эффект синхронизации отдельных сегментов прикладных процессов является возможным и для хаотических систем без временной задержки. Однако в этом случае имеет место то ограничение, что максимально достижимое время достоверного предсказания становится достаточно коротким и соизмеримым с интервалами времени переходных процессов. Рассмотрим, например, динамическую систему [9], задаваемую следующим дифференциальным уравнением для вектора состояния X :

$$\dot{X} = F(X), \{X \in R_n\}. \quad (8)$$

Пусть также имеется сопряженная динамическая система, поведение которой задается следующим дифференциальным уравнением для вектора состояния Y :

$$\dot{Y} = F(Y) + K(X - Y), \{Y \in R_n\}. \quad (9)$$

Тогда система (8) является ведущей системой, а система (9) — ведомой. Уравнение для вектора состояния $\Delta = X - Y$ запишется в виде

$$\dot{\Delta} = F(X) - f(Y) + K(\Delta), \{\Delta \in R_n\}. \quad (10)$$

Можно показать, что если функция K является линейной, функция F — полиномом не выше второго порядка, а фиксированная точка $\Delta = 0$ является глобально асимптотически устойчивой, то ведущая и ведомая системы проявляют синхронное поведение по истечению некоторого времени переходного процесса.

Выводы

Сетцентрическая концепция основывается на системной интеграции совокупности взаимодействующих функционально-операционных сегментов и распределенных прикладных процессов. При этом необходимо принимать во внимание постоянное изменение границ между хаотическими и организованными зонами сложной системы.

В дополнение к традиционной классификации моделей поведения в человеко-машинных системах управления (действия в условиях определенности, риска, неопределенности) целесообразно выделить также

системы, функционирующие при так называемом детерминированном хаосе.

Важным аспектом исследования сетцентрических систем является выявление и систематизация качественно характерных функциональных и операционных сегментов, осуществляющих процесс обработки внутренних и внешних информационных потоков. Свойства каждого из подобных сегментов определяются некоторыми модельными представлениями, например разностными соотношениями или дифференциальными уравнениями.

Анализ прикладных процессов в распределенных сетевых структурах позволяет исследовать различные модели, описывающие порождение и развитие хаотического поведения системы:

- модели дискретных преобразований;
- модели конечномерного фазового пространства, описываемые системами обыкновенных дифференциальных уравнений (системы уравнений Лоренца, Росслера и др.);
- модели бесконечномерного фазового пространства, задаваемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздыванием (системы уравнений Икеды и др.).

Принципиальным вопросом исследования и проектирования сетцентрических систем является также решение обратной задачи — анализ процесса перехода от хаотических к детерминированным фазовым траекториям. Такой обратный переход можно осуществить с помощью алгоритмов модификации существенных параметров модели, описывающей динамику преобразования информации для данной системы.

1. Chen M., Kurths J. Synchronization of time-delayed systems. *Physical Review E*, 2007, vol. 76, pp. 036212-1–036212-5.
2. Шеридан Т.Б. Системы «человек-машина» / Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррелл. — М. : Машиностроение, 1980. — 400 с.
Sheridan T.B., Ferrell W.R. *Man-machine systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. 400 p.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт — М. : Ин-т компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
Mandelbrot B. *Fractal geometry of nature*. Moscow: Institute for space studies, 2002. 656 p.
4. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, no. 2, pp. 130–141.
5. Rossler O.E. An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 1976, vol. 57, no. 2, pp. 397–398.
6. Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Physics Letters A*, 1992, vol. 170, pp. 421–428.
7. Ott E., Gregory C., Yorke J.A. Controlling chaos. *Physics Review Letter*, 1990, vol. 64, pp. 1196–1199.
8. Voss H.U. Anticipating chaotic synchronization. *Physical Review E*, 2000, vol. 61, no. 5, pp. 5115–5119.
9. Voss H.U. Dynamic long-term anticipation of chaotic states. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 87, no. 1, pp. 014102-1–014102-4.

Получено 14.11.2013

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОМ ОБОБЩЕННЫХ ЭНТРОПИЙ

А.А. Тризна¹, С.А. Янкова²

¹*Национальный авиационный университет*

²*Научно-методологический центр процессного анализа*

Приведены обобщенные данные по существующим показателям и критериям технической эксплуатации авиационной техники и безопасности полетов, а также классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных мер и определены области их практической применимости. Впервые предложена обобщенная таблица с номограммами для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер.

Наведено узагальнені дані щодо існуючих показників та критеріїв технічної експлуатації авіаційної техніки та безпеки польотів, а також класифікацію показників технічної експлуатації авіаційної техніки та інженерної психології як складних полікомпонентних імовірнісних мір та визначення області їх практичної застосовності. Вперше запропоновано узагальнену таблицю з номограмами для інженерного розрахунку областей практичного застосування складних полікомпонентних імовірнісних мір.

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни техническая эксплуатация (ТЭ) воздушных судов (ВС), ее теория и практика, вступила в этап упорядочивания данных и научно-методологического обобщения в практическом, логическом и математическом смысле [1].

Обобщенной характеристикой этого этапа является рассмотрение эксплуатации не как независимого этапа, а как центрального этапа в жизненном цикле существования промышленной продукции; необходимость развитой классификации и уточнения определений всех показателей и критериев технической эксплуатации; обобщенная аналитика системных свойств (эффективность, надежность, ремонтпригодность, долговечность, стоимость и др.) и использование комбинаций этих свойств.

Цель — обобщение данных по существующим показателям и критериям технической эксплуатации авиационной техники (АТ) и безопасности полетов, классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных величин этих показателей и определение области их практической применимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для эффективного анализа уровня безопасности полетов и качества технического обслуживания (ТО) ВС необходимо использовать наиболее

информативные показатели технической эксплуатации АТ, а также знать области применения этих показателей.

Основным математическим аппаратом для оценки показателей и критериев технической эксплуатации авиационной техники является теория вероятностей, теория случайных процессов и статистических методов (методы математической статистики и общая теория статистики) [2].

Для оценки информативности и областей применимости показателей был составлен обобщенный перечень, существующих показателей и критериев технической эксплуатации авиационной техники [3–5]. В данный перечень вошли следующие показатели:

1) вероятность безотказной работы сложного устройства:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N p_i, \text{ где } p_i \text{ — вероятность безотказной работы } i\text{-го элемента,}$$

N — число элементов системы;

2) вероятность появления отказа в системе:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^N q_i, \text{ где } q_i \text{ — вероятность появления отказа } i\text{-го элемента;}$$

3) вероятность безотказной работы системы с отдельным резервированием:

$$P_{\text{разд}} = \prod_{j=1}^N p_j, \text{ где } p_j \text{ — вероятность безотказной работы последовательно}$$

включенного элемента системы;

4) вероятность безотказной работы системы с общим резервированием:

$$P_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} q_i, \text{ где } q_i = 1 - P_i, m \text{ — число резервных каналов или}$$

компонентов,

5) минимально допустимая вероятность отказа:

$$q_{\min} = 1 - q_{\max};$$

6) вероятность появления не более k событий (замен компонентов ВС):

$$P(R > n) = \sum_{k=0}^n p_{kn}, \text{ где } R \text{ — общее число замен, } n \text{ — действительное число}$$

необходимых замен, p_{kn} — вероятность появления отказа компонента ВС;

7) вероятность появления идентичных ошибок P_T сразу у двух операторов (А та Б):

$$P_T = \sum_{s=1}^N \left[P_s \sum_{i=1}^N (P_{si} P'_{si}) \right], \text{ где } P_s \text{ — вероятность обеспечения времени,}$$

необходимого для выполнения операции S ; P_{si} — вероятность того, что оператор А совершит ошибку типа i при операции S ; P'_{si} — то же самое для оператора Б.

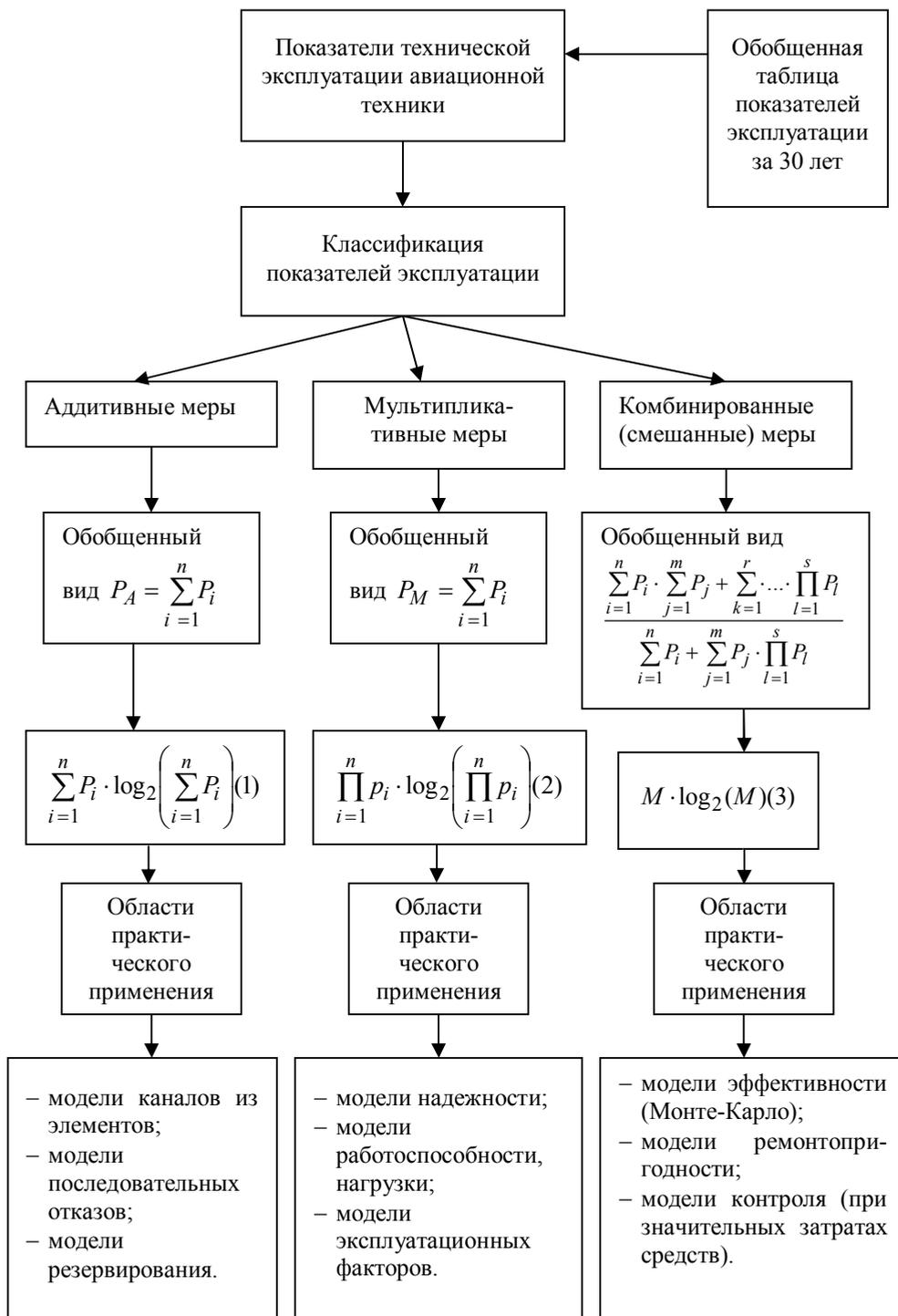


Рис. 1 Классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных мер

Анализ данного обобщенного перечня позволил нам создать классификацию показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии. Основываясь на том, что данные показатели являются поликомпонентными вероятностными величинами (мерами) [2], мы разделили их на три основных класса (см. рис. 1):

1) аддитивные (могут быть представлены функцией вида: $f(a + b) = f(a) + f(b)$);

2) мультипликативные (могут быть представлены функцией вида: $f(ab) = f(a) \cdot f(b)$);

3) комбинированные (представляют собой комбинацию первых двух классов).

В качестве объекта нашего исследования мы выбрали мультипликативные и аддитивные поликомпонентные вероятностные меры.

Для определения областей практической применимости исследуемых мер, мы использовали функцию энтропии Хохлова [6].

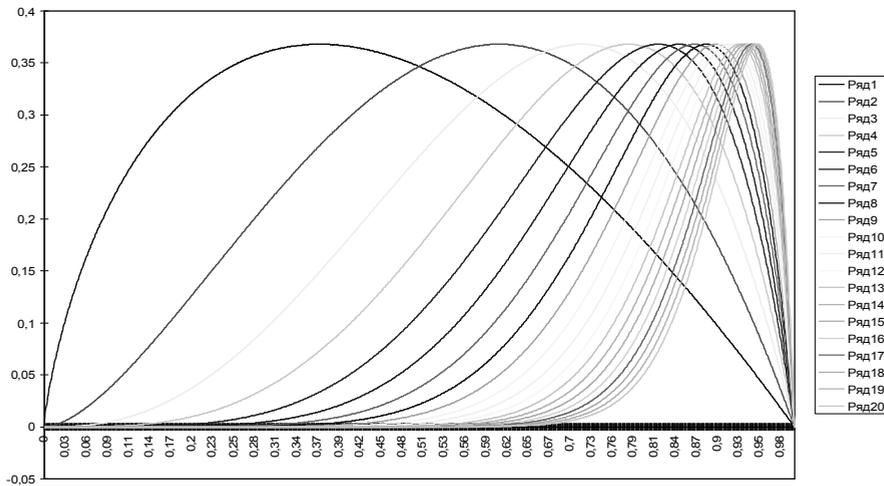


Рис. 2. Номограммы функции энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер

Для построения графиков по оси абсцисс отложены значения вероятностей $p_i = 0 \dots 1$ ($i = 1 \dots n$), которые входят в состав поликомпонентной вероятностной меры. По оси ординат отложены значения функции энтропии, вычисленные для разных значений вероятностей составляющих. Построенные графики представляют собой зависимости вида:

$$E(p_i) := - \left(\prod_{i=1}^n p_i \cdot \ln \left(\prod_{i=1}^n p_i \right) \right),$$

где n — число вероятностных компонент, которые входят в состав поликомпонентной вероятностной меры (рис. 2) [6, 7].

Рассмотрим анализ мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер. На рис. 2 показаны действия 1...20 факторов. В результате мультипликативной накладки область информации сжимается в область высоких вероятностей.

Для определения диапазона необходимого уровня информативности меры по оси абсцисс построенных графиков откладываем значения информативности меры $I(p_i)$. Поскольку максимальный уровень информации для реальных систем принимается равным $0,9-0,7$, примем за максимальное значение шкалы $I(p_i)$ значение $0,9$.

Таблица 1

Соответствие уровня информативности по шкалам энтропии $E(p_i)$ и меры $I(p_i)$

Значение по шкале $E(p_i)$	Значение по шкале $I(p_i)$
0,53	0,9
0,47	0,8
0,41	0,7
0,35	0,6
0,29	0,5
0,24	0,4
0,18	0,3
0,12	0,2
0,06	0,1
0	0

Функция энтропии достигает своего максимума при значении $E(p_i) = 0,53$, которое по шкале $I(p_i)$ эквивалентно максимальному значению $0,9$. Исходя из этого, мы составили табл. 1 соответствия шкал $E(p_i)$ и $I(p_i)$.

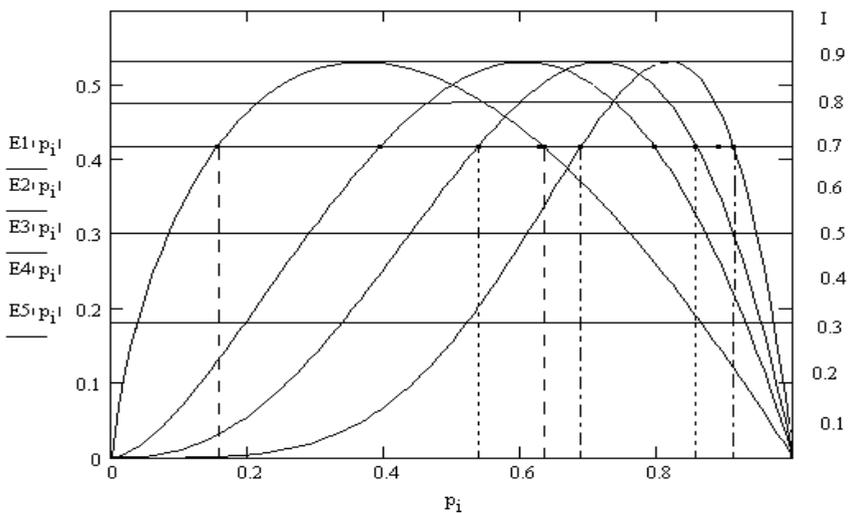


Рис. 3. Графический способ определения вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информативности

По этому графику можно определить вероятностный диапазон, в котором обеспечивается необходимый уровень информативности для данной меры (рис. 3). Пример результатов оценки вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информативности, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Пример расчетов вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информации

Количество компонент	Границы вероятностного диапазона	
	P_{\min}	P_{\max}
$I = 0,8 (E(p) = 0,47)$		
1	0,205	0,557
3	0,591	0,823
5	0,657	0,89
$I = 0,7 (E(p) = 0,42)$		
1	0,161	0,625
3	0,544	0,855
5	0,694	0,91
$I = 0,5 (E(p) = 0,29)$		
1	0,084	0,76
3	0,44	0,913
5	0,609	0,947

По результатам данных в табл. 2 можно сделать вывод, что диапазоны, в которых мультипликативные поликомпонентные вероятностные меры дают нам наибольшее количество информации, принадлежат части полного вероятностного диапазона $0,7 \div 1$. Соответственно показатели, которые представлены в виде мультипликативных функций, будут наиболее информативны для оценки событий (отказы техники, ошибки операторов), которые находятся в области высоких вероятностей (имеют высокую вероятность наступления события).

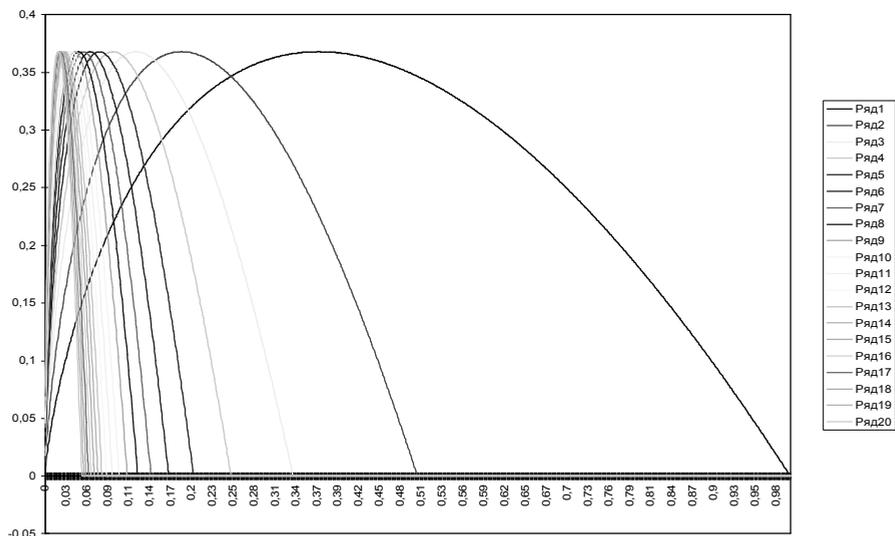


Рис. 4. Номограммы функции энтропии аддитивных поликомпонентных вероятностных мер

Аналогичным образом, проанализировав номограммы функции энтропии аддитивных поликомпонентных вероятностных мер, мы пришли к выводу, что наибольшее количество информации такие меры обеспечивают в области малых вероятностей ($0 \div 0,3$) (рис. 4). А показатели, которые представлены в виде аддитивных функций, будут наиболее информативны для оценки событий, которые имеют низкую вероятность наступления. Определить области практического применения основных показателей эксплуатации воздушных судов можно по табл. 3 и рис. 5.

Таблица 3

Определение областей практического применения основных показателей:
 надежности автоматики (вероятность безотказной работы),
 надежности оператора (вероятность безошибочной работы)

Аддитивность	Мультипликация
Вероятность безотказной работы	
$P_{AD} = \sum_{i=1}^n p_i(t)$	$P_{AD} = \prod_{i=1}^n p_i(t)$
Вероятность безошибочной работы	
$P_{on} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot P_{on/i}$	$P_{on} = \prod_{i=1}^n P_i(t)$
Обобщенная энтропия показателей	
$\pm \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) (I)$	$\pm \prod_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\prod_{i=1}^n p_i \right)$

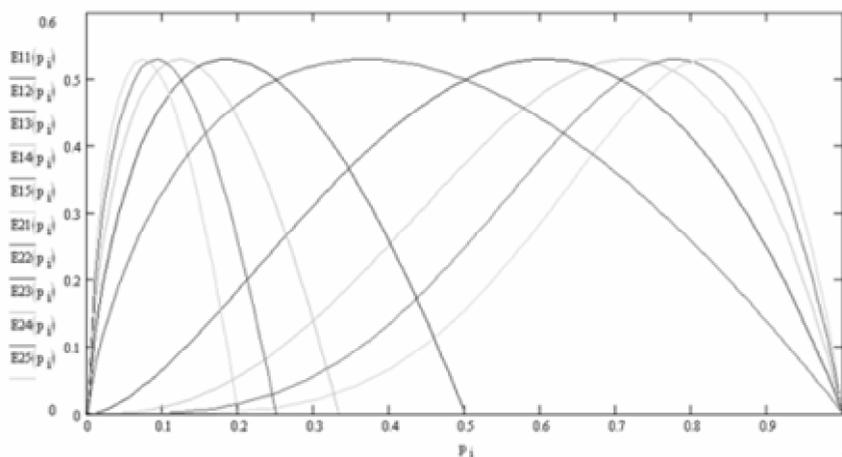


Рис. 5. Номограммы эффективности применения основных показателей

Из приведенных номограмм можно сделать следующие выводы:

1. Явление сжатия информации имеет большое значение, как в области малых вероятностей появления отказов техники или ошибок оператора, так и для области больших вероятностей.
2. Если для событий с малыми вероятностями использовать те же показатели, что и для событий с большими вероятностями появления этих событий, то это может привести к увеличению количества отказов техники или ошибок оператора. Это связано с тем, что эксплуатационный персонал

будет обладать недостаточным количеством информации для принятия правильного решения.

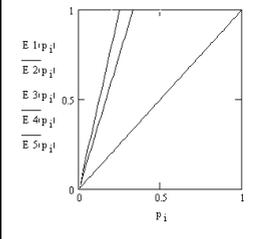
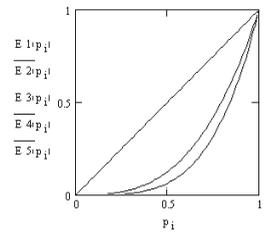
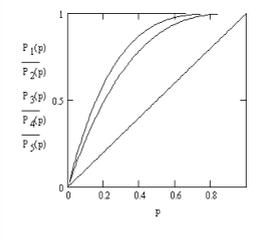
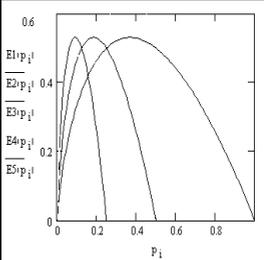
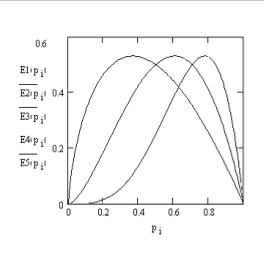
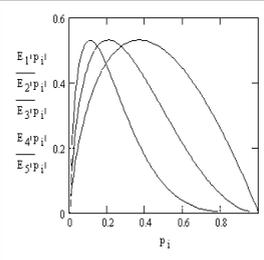
Для снятия ограничений методов теории информации в других областях можно использовать меру, которая называется энтропией Хохлова и в обобщенном виде записывается формулой $E = M \cdot \log_2 M$ и представляет собой формулу нормированной логарифмики [2, 6].

Примеры применения энтропии Хохлова для исследования поликомпонентных вероятностных мер приведены в таблице номограмм для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер (табл. 4).

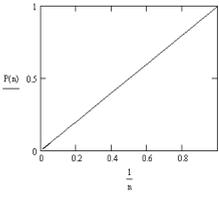
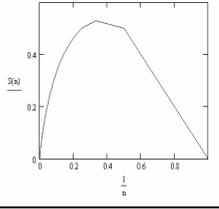
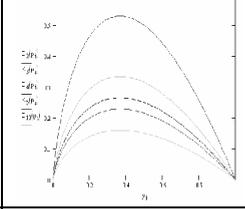
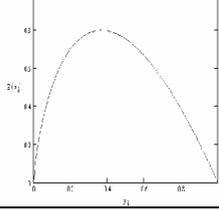
Данная таблица позволит повысить эффективность применения показателей технической эксплуатации АТ для оценки качества технического обслуживания ВС и уровня безопасности полетов.

Таблица 4

Таблица номограмм для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер

Характеристики меры	Аддитивные меры	Мультипликативные меры	Резервирование
Формула меры	$\sum_{i=1}^n P_i$	$\prod_{i=1}^n P_i$	$P_{II} = [1 - (1 - P)^n]$
Обобщенная энтропия меры $M \log_2 M$	$\pm \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\sum_{i=1}^n p_i \right)$	$\pm \prod_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\prod_{i=1}^n p_i \right)$	$[1 - (1 - p^n)] \cdot \log [1 - (1 - p^n)]$
Номограммы меры			
Номограммы $M \log_2 M$ (математические модели предельно сложных процессов)			
Диапазон вероятностей и его явления (область применения)	Малая вероятность (явление сжатия информации в сторону малых вероятностей)	Высокая вероятность (отсутствие сжатия информации в сторону малых вероятностей)	Явление расширения информации в процессе резервирования

Окончание таблицы 4

Характеристики меры	Формула равновероятности	Формула энтропии с произвольным основанием	Формула энтропии Шенона
Формула меры	$P_{II} = \frac{1}{n}$	—	—
Обобщенная энтропия меры $M \log_2 M$	$\frac{1}{n} \cdot \log_2 \left(\frac{1}{n} \right)$	$p_i \cdot \log_i(p_i)$	$-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2(p_i)$
Номограммы меры		—	—
Номограммы $M \log_2 M$ (математические модели предельно сложных процессов)			
Диапазон вероятностей и его явления (область применения)	Отсутствие эффективности мультипликации	Явление центрального ограничения	Отсутствие эффектов типа «мульти» и «адди»

Выводы

Теория и практика технической эксплуатации воздушных судов в настоящее время находится на стадии упорядочивания и обобщения данных. Для того чтобы стадия упорядочивания прошла эффективно, необходимо использование таких обобщающих подходов, как процессный подход, процессный анализ и обобщенная теория процессов.

Анализ показателей технической эксплуатации воздушных судов показал, что расчет областей практической применимости этих показателей необходимо проводить по обобщенной энтропии процесса. Разработанная классификация показателей эксплуатации ВС, которая базируется на рассмотрении данных показателей как поликомпонентных вероятностных величин (мер), позволяет определить область практического применения этих показателей при оценке качества технической эксплуатации авиационной техники.

Исследования закономерностей аддитивных и мультипликативных мер показал, что при увеличении числа компонент в показателе область практической применимости изменения аддитивного показателя переходит в область малых вероятностей, а мультипликативных — в область высоких вероятностей.

1. Хохлов Е.М. Процессная концепция безопасных полетов как формула мирового научного приоритета и методология защиты летного эксплуатанта / Е.М. Хохлов // ВИНТИ. Проблемы безопасности полетов. — 1994. — № 12. с. 28–39.
Khokhlov E.M. Process conception of flights safety as formula of world scientific priority and methodology of defence of flight operator. *VINITI. Problems of flight safety*, 1994, no 12, pp. 28–29.
2. Толковый словарь математических терминов. / О.В. Мантуров, Ю.К. Солнцев, Ю.И. Соркин, Н.Г. Федин. — М.: Просвещение, 1965. — 541 с.
Manturov O.V., Solntsev U.K., Sorokin U.I., Fedin H.G. *Explanatory dictionary of mathematical terms*. Moscow: Prosveschenie, 1965. 541 p.
3. Эксплуатация авиационного оборудования и безопасность полетов: Учеб. пособие для вузов гражданской авиации / В.Г. Денисов, В.В. Козарук, А.С. Кураев, М.И. Пальчих, И.М. Синдеев. — М. : Транспорт, 1979. — 240 с.
Denisov V.G., Kozaruk, V.V., Kuraev A.S., Palchikh M.I., Sindeev I.M. *Operation of aviation equipment and flight safety*. Moscow: Transport, 1979. 240 p.
4. Воробьев В.Г. Техническая эксплуатация авиационного оборудования: Учебник для вузов гражданской авиации / В.Г. Воробьев — М. : Транспорт, 1990. — 296 с.
Vorobev V.G. *Maintenance of aviation equipment*. Moscow: Transport, 1990. 296 p.
5. Павлов В.В. Эргономические вопросы создания и эксплуатации авиационных электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов воздушных судов: Учеб. пособие / В.В. Павлов, А.В. Скрипец — К. : КМУГА, 2000. — 460 с.
Pavlov V.V., Skripets A.V. *Ergonomic questions of creation and maintenance of the aviation electrical and flight-navigation complexes of aircrafts*. Kyiv: KMUGA, 2000. 460 p.
6. Хохлов Е.М. Анализ границ применения факторных процедур ИКАО и перспективы развития новых процедур при обеспечении безопасности труда авиаспециалистов комплексным анализом процессов. Проблемы охраны труда и окружающей среды: Сб. науч. трудов / Хохлов Е.М. — Киев, 1986. С. 16–21.
Khokhlov E.M. Analysis of scopes of application of factor procedures of ICAO and prospects of development of new procedures at providing of occupational safety of aviation specialists by complex analysis of processes. *Problems of occupational and environment safety*. Kyiv, 1986. pp.16–21.
7. Хохлов Е.М. Законы факторных переходов при прогнозировании и предотвращению маловероятных аварийных непроектных процессов. Проблемы охраны труда: Сб. науч. трудов. / Е.М. Хохлов — Киев, 1993. С. 34–39.
Khokhlov E.M. Laws of factor transitions at prognostication and prevention of improbable emergency unproject processes. *Problems of occupational safety*. Kyiv, 1993. pp. 34–39.

Получено 23.05.2013

Биологическая и медицинская кибернетика

УДК 681.518.2

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ

М.Л. Кочина¹, М.Н. Нессонова²

¹*Харьковская медицинская академия последипломного образования*

²*Харьковский Национальный фармацевтический университет*

Предложен метод построения классификаторов по обучающей информации, который базируется на метрическом подходе к представлениям, полученным методами геометрической интерпретации структуры данных. Получаемые на его основе математические модели алгоритмов вычисления оценок позволяют использовать в качестве предикторов разнотипных признаков с учетом возможной нелинейности и немонотонности их поведения при переходе от класса к классу. Методы формирования композиций классификаторов разработаны на основе совмещения эвристических принципов, используемых в комитетах с логикой старшинства, смесях экспертов и взвешенном голосовании. Приведены результаты использования разработанных методов на реальных данных.

Запропоновано метод побудови класифікаторів за навчальною інформацією, що базується на метричному підході до представлень, які отримано методами геометричної інтерпретації структури даних. Математичні моделі алгоритмів обчислення оцінок, що одержуються на його основі, дозволяють використання в якості предикторів різнотипних ознак із урахуванням можливої нелінійності та немонотонності їхньої поведінки при переході від класу до класу. Методи формування композицій класифікаторів розроблено на основі суміщення евристичних принципів, що використовуються у комитетах із логікою старшинства, сумішах експертів та зваженому голосуванні. Наведено результати застосування методів, що розроблено, до реальних даних.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки степени тяжести состояния пациента является одним из ключевых моментов в работе врача. Правильная и своевременная оценка во многом определяет исход заболевания, позволяет провести анализ эффективности различных методов лечения, рандомизацию групп пациентов с целью получения сопоставимых данных, используемых в научных исследованиях [1–5]. Однако в настоящее время в клинической практике для определения степени тяжести состояния пациента или пострадавшего с травмой, как правило, используется один из двух подходов: традиционная субъективная оценка, основанная на профессиональном опыте медицинского работника, или оценка, полученная при помощи специализированных систем и шкал [5, 1]. Справедливым можно считать мнение о том, что прогностические системы и критерии оценки

состояния пациентов должны разрабатываться или корректироваться не только с учетом специфики конкретного заболевания, но и даже региона и лечебного учреждения, в котором они применяются, с течением времени, а также в связи с другими факторами [6, 7].

Для объективизации оценки степени тяжести состояния пациентов разрабатываются математические модели, которые впоследствии становятся основой систем поддержки принятия решений медицинским персоналом. Поскольку медицинские данные, в большинстве случаев, являются случайными величинами, наиболее адекватными для математического моделирования являются стохастические и вероятностно-статистические методы. Существенными преимуществами при разработке таких моделей обладают методы многомерного статистического анализа, позволяющие установить характер и структуру взаимосвязей между признаками исследуемого объекта [8]. Актуальной задачей при разработке систем поддержки принятия решений в медицине является формирование решающих правил, согласно которым выполняется оценка степени тяжести состояния пациентов, а также выделение и формализация информативных структурных элементов, на основании которых синтезируются эти решающие правила [9].

Целью работы является разработка методов оценки степени тяжести состояния пациентов, включающих метод построения классификаторов по обучающей информации и способы формирования их композиций.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ КЛАССИФИКАТОРОВ

При разработке метода построения классификаторов решалась задача классификации с обучением в следующей постановке. Дано дискретное подмножество некоторого пространства объектов X , называемое обучающей выборкой: $\{x_i\}_{i=1}^L \subset X$. Каждый из объектов описывается с помощью некоторого набора признаков $\{f_i\}_{i=1}^m$, которые можно представить как функции, действующие из пространства объектов в некоторое пространство значений: $f_i: X \rightarrow D_{f_i}$, где D_{f_i} — область значений признака f_i . Кроме того известно, что пространство объектов X некоторым образом разделено на классы: $X = \bigcup \{C_j\}_{j=1}^m$, и для каждого объекта из обучающей выборки $\{x_i\}_{i=1}^L$ известно, к какому классу он принадлежит.

Требуется построить классификатор, который будет относить объекты к классам на основании значений их признаков $\{f_i\}_{i=1}^m$.

При решении данной задачи мы отошли от классического представления о классах, как о некоторых подмножествах (компактно расположенных областях) пространства объектов, обычно используемого в методах классификации на основании метрического подхода (рис. 1). В отличие от упомянутого подхода, класс представлялся как еще один из признаков, описывающих объект, с дискретной областью значений, соответствующей

набору меток классов: $c: X \rightarrow \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$. Данное представление о классах позволило разработать новый метод построения классификаторов, предлагаемый в работе.

Разработка метода построения классификаторов потребовала поэтапного получения ответов на ряд вопросов:

1. Насколько сильно влияет каждый из признаков на факт принадлежности объектов к классам? Т.е. каков вес, или важность, каждого из признаков в классификации?

2. Все ли предикторы одинаково важны при прогнозировании разных классов? Насколько изменяется их вес для различных классов?

3. Изменяется ли и как изменяется вес каждого предиктора в зависимости от его значений?

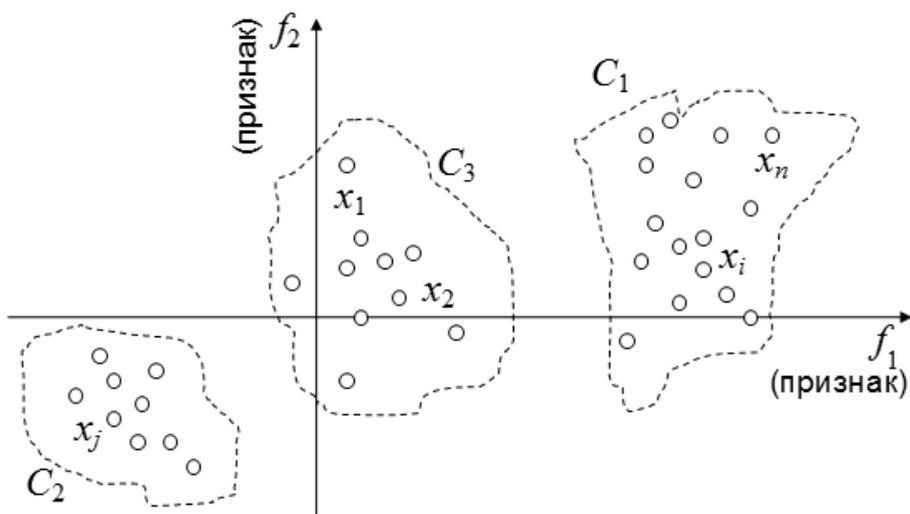


Рис. 1. Классическое представление о классах, объектах и признаках при решении задачи классификации

Для ответа на поставленные вопросы рассматривались проекции (карты), на которых целевой признак «класс» и характеризующие его признаки $\{f_i\}_{i=1}^n$ представлялись в виде однородных объектов (а именно точек) в некотором обобщенном координатном пространстве. Проекции для анализа получались методами геометрической интерпретации структуры данных (многомерного шкалирования [10] и корреспондентского анализа [11]). В этом пространстве вычислялись расстояния $\rho(f_i, c)$ от точек-признаков f_i до точки-выходного показателя c с помощью некоторой выбранной метрики ρ (рис. 2). Признакам, наиболее близким к c , назначались бóльшие веса (важность) в классификации. Пропорционально увеличению расстояния точки f_i от точки c уменьшался и вес этого признака для определения переменной c («класс»).

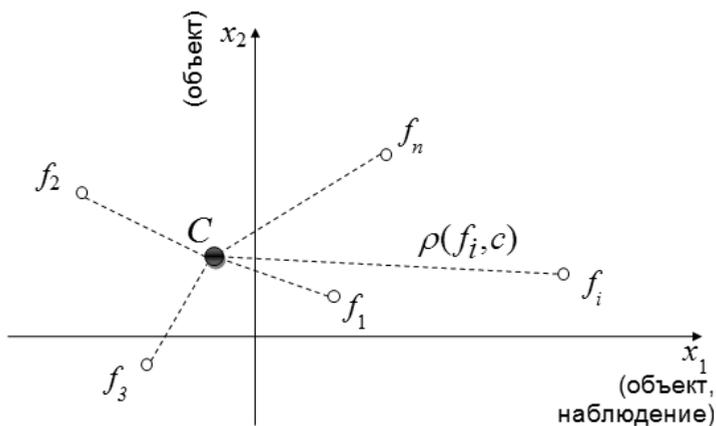


Рис. 2. Представление о классах, объектах и признаках при оценке важности признаков в классификации (карта, представляющая классы и описывающие их признаки в едином координатном пространстве)

Описанный подход отражает основную идею разработанного метода построения классификаторов по обучающей информации, однако в нем не учитывается возможная неравноценность описывающих признаков при отнесении объектов к разным классам, а также их возможная нелинейность и немонотонность в разных классах. Таким образом, при разработке метода классификации с обучением, учитывающего эти особенности, рассматривались карты, на которых, во-первых, каждый из классов представлялся отдельной точкой (рис. 3), и, во-вторых, вместо каждого описывающего признака рассматривался набор интервалов (категорий), на которые разбивается область его значений.

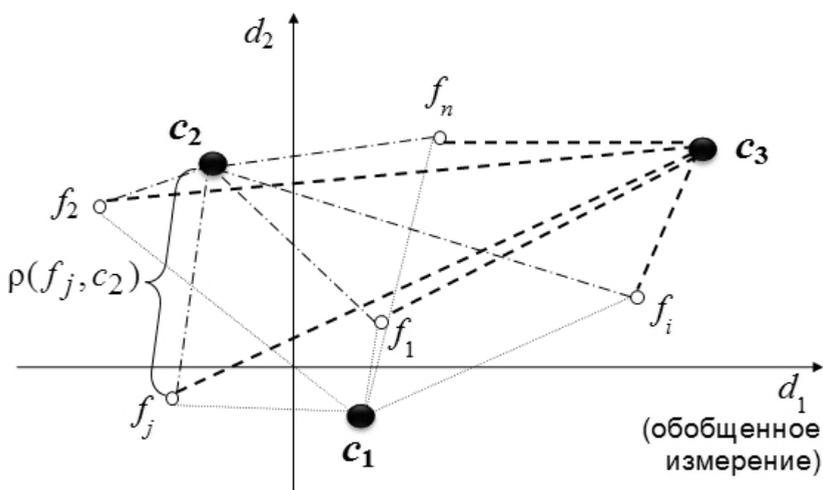


Рис. 3. Представление о классах, объектах и признаках при оценке влияния признаков на принадлежность объектов к разным классам

Разбиение области значений описывающего признака на категории должно происходить на основании анализа изменения его значений при переходе от класса к классу. По сути, выделяются интервалы области значений признака, характерные для каждого класса или группы классов.

С этой целью возможно применение статистических методов оценки достоверности различий между несколькими группами. Для качественных переменных выводы делаются на основе анализа их таблиц сопряженности с использованием критериев χ^2 Пирсона, максимального правдоподобия, точного критерия Фишера и т.п. Для количественных переменных необходимо применение критериев двух выборочных сравнений (например, Стьюдента, Манна — Уитни, Вальда — Вольфовица или др.) для попарных сравнений между значениями исследуемого признака в классах с обязательной поправкой на множественность сравнений, если классов более двух.

Формально, если признаки представляются как функции на множестве объектов $x \in X: f_i: X \rightarrow D_{f_i}$, то после категоризации $f_i(x)$ будет задаваться как вектор $f_i(x) = (\mu_{g_{il}}(x))_{l=1}^{k_i}$, где $\mu_{g_{il}}(x)$ — характеристические функции подмножеств-категорий значений признака $g_{il} \subset D_{f_i}$, k_i — число подмножеств, на которые разбивается область значений признака D_{f_i} ($1 \leq k_i \leq m$).

Признаковое описание объектов представлялось в виде конфигурации из $N = m + \sum_{i=1}^n k_i \leq m \cdot (n+1)$ точек пространства небольшой размерности, задающихся своими координатами. В полученной конфигурации отдельно позиционировались точки-представители классов c_j ($j = 1, \dots, m$), и отдельно — точки-представители категорий признаков v_l ($l = 1, \dots, \sum_{i=1}^n k_i$), отвечающих за принадлежность объектов к классам.

Мера влияния (весовой коэффициент w_{ij}) определенной категории признака (v_l) на принадлежность объекта к конкретному классу (C_j) оценивалась как величина, обратная расстоянию точки-представителя этой категории до точки-представителя этого класса, нормированная на сумму расстояний всех точек-представителей категорий признаков:

$$w_{ij} = \left(\rho(v_l, c_j) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{\sum_{b=1}^{\sum_{i=1}^n k_i} \rho(v_b, c_j)} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Далее, в предлагаемом методе классификации с обучением необходимо вычислить значения оценочных функций $W_j(x)$, характеризующих степень (вероятности) принадлежности некоторого объекта $x \in X$ к классам C_j ($j = 1, \dots, m$), по формулам

$$W_j(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{k_i} w_{lj} \cdot \mu_{g_{li}}(x) \quad (\forall j = 1, \dots, m). \quad (2)$$

Наиболее вероятным классом для объекта x будет тот класс C_τ , для которого получено наибольшее значение функции $W_j(x)$:

$$\tau = \arg \max_{j=1, \dots, m} W_j(x). \quad (3)$$

Таким образом, разработан метод классификации с обучением, который отличается способом определения весовых коэффициентов при объясняющих переменных в оценочных функциях, на основании которых можно судить о принадлежности объекта к каждому из классов $\{C_j\}_{j=1}^m$. Сформулирован алгоритм (1–3) применения разработанного метода классификации, который относится к классу алгоритмов вычисления оценок (АВО) [12]. Классификаторы, работающие по подобному алгоритму, называются в литературе [13, 14] каноническими моделями классификаторов. Новизна предлагаемого метода состоит в способе нахождения весовых коэффициентов w_{lj} признаков, объясняющих отнесение объектов к разным классам, который базируется на представлении класса не как подмножества пространства объектов, а как еще одного показателя, составляющего признаковое описание объекта. При отнесении объектов к классам предложенный метод позволяет учитывать как качественные, так и количественные признаки, описывающие объект. Кроме того, за счет категоризации значений каждого из объясняющих признаков, несмотря на представление формулы (2) в виде их линейной комбинации, становится возможным учесть нелинейность и немонотонность изменения оценки в зависимости от описывающих переменных.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОСТАВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИЙ КЛАССИФИКАТОРОВ

На практике нередки ситуации, когда использование разных подходов к построению классификатора (увеличение числа признаков, описывающих объект, выбор алгоритма из различных семейств, применение к нему более эффективных методов обучения) не позволяют добиться приемлемого качества распознавания всех классов [15, 16]. Наиболее перспективным направлением в подобных ситуациях считается объединение нескольких классификаторов в композицию (синонимы: комитет, ансамбль) с целью компенсации их взаимных ошибок [14, 17]. Для построения композиций стандартно используются три основных принципа голосования: простое, взвешенное и голосование по старшинству [14–17]. В данной работе для формирования композиций классификаторов разработано и формализовано два метода, названные нами «рейтинговым голосованием» и «рейтинговым голосованием по старшинству».

Метод рейтингового голосования является развитием процедуры формирования смеси экспертов [18], в которой голоса алгоритмов классификации учитываются с весами, зависящими от классифицируемого объекта. В наиболее часто реализуемом варианте процедуры смеси экспертов веса базовых алгоритмов зависят от области пространства объектов, в которую попадает классифицируемый объект (области компетентности). Предлагаемый же метод рейтингового голосования использует способ вычисления весов базовых классификаторов на основании их оцененной точности при распознавании различных классов, ошибок на других классах, и ответов, выдаваемых на конкретном объекте, что делает метод в какой-то степени похожим на взвешенное голосование.

Формально алгоритм работы метода можно представить следующим образом. Пусть имеется конечное множество из m классификаторов $\{T^k\}_{k=1}^m$, решающих задачу дискриминации объектов $x \in X$ на n классов $\{C_i\}_{i=1}^n$. Для всех T^k известна (например, оценена по обучающей выборке) их точность распознавания классов, которая может быть задана квадратными $n \times n$ -матрицами $P^k = (p_{ij}^k)_{i,j=1}^n$, где каждый элемент p_{ij}^k рассматривается как вероятность того, что объект, классифицированный алгоритмом T^k , как принадлежащий к классу C_j , в действительности принадлежит к классу C_i . Таким образом, диагональные элементы p_{ii}^k (т.е. p_{ij}^k при $i = j$) характеризуют точность алгоритмов T^k на классах C_i ($\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n$), а сумма элементов по каждому столбцу матриц P^k равна единице.

Результат действия множества построенных алгоритмов $\{T^k\}_{k=1}^m$ на некотором объекте x представляется бинарной индикаторной $n \times m$ -матрицей

$$V(x) = (v_{ik}(x))_{i=1, \dots, n}^{k=1, \dots, m}, \text{ где } v_{ik}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } T^k(x) = C_i, \\ 0, & \text{если } T^k(x) \neq C_i. \end{cases} \quad (4)$$

Матрица $V(x)$ обладает следующими свойствами:

1. Столбцы матрицы $V(x)$ соответствуют базовым классификаторам, строки — прогнозируемым классам для объекта x .
2. Суммы по строкам матрицы V представляют собой количество голосов в комитете, отданных за каждый класс:

$$\forall i = 1, \dots, n: \quad 0 \leq \sum_{j=1}^m v_{ij}(x) \leq n \quad (\forall x \in X).$$

3. В каждом столбце матрицы V может быть не более одной единицы:

$$\forall j = 1, \dots, m: \quad \sum_{i=1}^n v_{ij}(x) \leq 1 \quad (\forall x \in X).$$

Это утверждение соответствует тому, что каждый из базовых классификаторов на одном объекте может давать не более одного ответа, т.е. отнести объект только к одному из классов или отказаться от его классификации. В первом случае: $\sum_{i=1}^n v_{ij}(x) = 1$. В случае отказа алгоритма T^k

от классификации: $\sum_{i=1}^n v_{ij}(x) = 0$.

Далее формируется так называемая рейтинговая $n \times m$ -матрица W , каждый столбец которой получается умножением матрицы P^k на k -й столбец матрицы V :

$$W^{(k)}(x) = P^k \cdot V^{(k)}(x). \quad (5)$$

Таким образом, элементы матрицы $W \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall k = 1, \dots, m$ определяются соотношением

$$w_{ik}(x) = \sum_{j=1}^n p_{ij}^k \cdot v_{jk}(x),$$

что, в силу свойств матрицы $V(x)$, эквивалентно:

$$w_{ik}(x) = \begin{cases} p_{i\theta}^k, & \text{если } T^k(x) = C_\theta, \quad \text{где } \theta \in \{1, \dots, n\} \\ 0, & \text{если } T^k(x) \text{ отказывается от классификации.} \end{cases}$$

Рейтинг принадлежности объекта x к классу C_i вычисляется как сумма по i -й строке матрицы W :

$$r_{C_i}(x) = \sum_{k=1}^m w_{ik}(x) = \sum_{k=1}^m p_{i\theta}^k. \quad (6)$$

где $r_{C_i}(x)$ — рейтинг принадлежности объекта x к классу C_i , $\theta \in \{0, 1, \dots, n\}$ — номер класса, к которому алгоритм T^k относит объект x (при этом под $\theta = 0$ подразумевается отказ алгоритма от классификации данного объекта).

Итоговым результатом процедуры рейтингового голосования комитета классификаторов T является класс, которому соответствует наибольший рейтинг:

$$T(x) = C_\tau, \quad \text{где } \tau = \arg \max_{i=1, \dots, n} r_{C_i}(x). \quad (7)$$

Таким образом, для определения класса объекта с помощью композиции классификаторов, составленной методом рейтингового голосования, необходимо действовать по следующему алгоритму (рис. 4):

- 1) оценить точности и ошибки базовых классификаторов на различных классах, для чего можно использовать вспомогательную тестовую выборку;
- 2) сформировать общий $m \times n \times n$ -массив точностей и ошибок;
- 3) получить от каждого из базовых классификаторов ответ

(прогнозируемый класс) для классифицируемого объекта и сформировать бинарную $n \times m$ -матрицу ответов;

4) вычислить элементы рейтинговой матрицы по формуле (5);

5) произвести расчет элементов n -мерного вектора рейтингов классов по формуле (6);

6) определить максимальный элемент массива рейтингов и его индекс в массиве;

7) выдать ответ (прогноз класса) для классифицируемого объекта в соответствии с соотношением (7).

Метод рейтингового голосования по старшинству является модификацией метода рейтингового голосования за счет добавления к нему стандартного алгоритма действия-композиций с логикой старшинства, что в некоторых практических приложениях является более уместным и эффективным.

В классической процедуре голосования по старшинству [19, 20], классифицируемый объект x подается сначала на вход первого базового алгоритма и, если $T^1(x) = C_1$, то объект x относится к классу C_1 и процедура на этом останавливается. Если же $T^1(x) \neq C_1$, то объект передается второму алгоритму, и т.д., пока не будет получен результат $T^i(x) = C_i$ и произойдет остановка работы процедуры. Однако остановка голосования при получении первого подходящего ответа, на наш взгляд, не всегда является оправданной, т.к. это увеличивает вероятность ошибки классификации, особенно для объектов, лежащих на границах классов, а также в случаях, когда характеристики качества распознавания различных классов одним и тем же базовым классификатором соизмеримы. Предлагаемая процедура составления композиции классификаторов рейтинговое голосование по старшинству позволяет повысить качество классификации в случаях, описанных выше, за счет комбинирования эвристик, лежащих в основе голосования по старшинству, взвешенного голосования и смеси экспертов.

Как и в композиции с логикой старшинства, предполагается, что число алгоритмов совпадает с количеством классов, и каждый классификатор наилучшим образом настроен на распознавание объектов именно своего класса. Т.е. любой базовый алгоритм T^i имеет максимальную точность распознавания объектов из класса C_i , что может быть отражено соотношением: $\forall i = 1, \dots, n: p_{ii}^i \geq p_{jj}^i \quad \forall j \neq i, \quad j = 1, \dots, n.$

В стандартной процедуре голосования по старшинству сами базовые алгоритмы строятся как одноклассовые классификаторы. Каждый классификатор обучается таким образом, чтобы максимально точно определять объекты только из одного (своего) класса [19]. В рейтинговом голосовании по старшинству от базовых классификаторов наличия этого свойства не требуется. Этот метод работает в случае, когда базовые алгоритмы обучались для определения в принципе всех классов, однако получается так, что их качество прогнозирования на одних классах лучше,

чем на других. В этом случае последовательность $\{T^k\}_{k=1}^n$ ранжируется в порядке, соответствующем номерам классов, на которых они показали наибольшую точность распознавания. В этом случае $\forall i, j = 1, \dots, n: p_{ii}^i \geq p_{ij}^j$, причем, для $\forall i \neq j$ неравенство превращается в строгое (равенство достигается только в случае $i = j$).

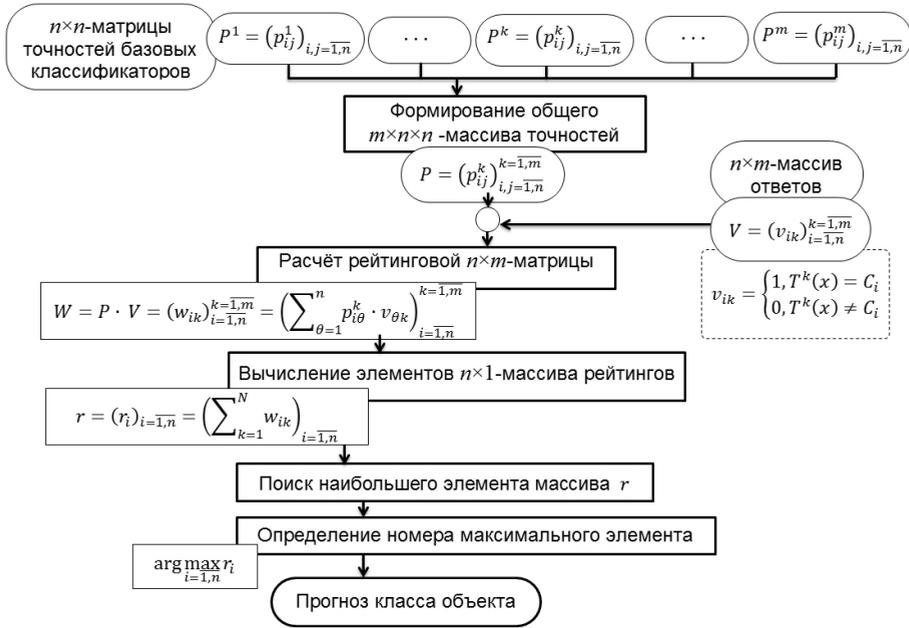


Рис. 4. Алгоритм реализации процедуры рейтингового голосования

Результат действия набора базовых классификаторов $\{T^k\}_{k=1}^n$ на новом классифицируемом объекте x представляется матрицей $V(x)$ (4), обладающей свойствами (1–3), которая, однако, в данном случае имеет размерность $n \times n$.

Так как каждый базовый классификатор T^k настроен таким образом, чтобы наилучший результат выдавать на классе C_k , то наиболее показательными характеристиками работы композиции в целом будут значения диагональных элементов матрицы V . Все принципиально различные варианты расположения единиц на диагонали можно описать одним из трех возможных значений следа матрицы $\text{tr}V(x) = \sum_{i=1}^n v_{ii}(x)$.

В а р и а н т 1:

$$\text{tr}V(x) = 0.$$

На диагонали матрицы V нет ни одной единицы, т.е. ни один из базовых классификаторов не идентифицировал образец как принадлежащий своему классу.

В этом случае целесообразным представляется отказаться от классификации данного объекта, как от нетипичного (попадающего в так

называемую «область неуверенности», где все алгоритмы некомпетентны). Если подобных объектов обнаружится достаточно много, то имеет смысл говорить о введении нового класса, не рассматриваемого ранее [15, 19].

Результирующий ответ композиции классификаторов: $T(x) = \emptyset$.

В а р и а н т 2:

$$\text{tr}V(x) = 1.$$

На диагонали матрицы V только одна единица.

Классическая ситуация для композиции с логикой старшинства, в которой она работает в чистом виде. В этом случае ответом композиции будет тот класс C_τ , на котором эта единица появилась.

Результирующий ответ композиции: $T(x) = C_\tau$, где $\tau = \arg\{v_{ii} \mid v_{ii}(x) = 1\}$.

В а р и а н т 3:

$$\text{tr}V(x) > 1.$$

Несколько единиц появляются на диагонали матрицы V , когда сразу несколько базовых классификаторов относят один объект x каждый к своему классу. В такой ситуации предлагается вычислить рейтинг каждого из спрогнозированных классов в соответствии с описанной выше процедурой рейтингового голосования и выдать результирующий ответ композиции:

$$T(x) = C_\tau, \text{ где } \tau = \arg \max_i \sum_{j=1}^j p_{ji}^j.$$

Вычисление рейтингов принадлежности объектов к классам осуществляется по методу рейтингового голосования, описанному выше.

Таким образом, чтобы спрогнозировать класс объекта с помощью композиции классификаторов, составленной методом рейтингового голосования по старшинству, необходимо действовать по следующему алгоритму (рис. 5):

1) оценить точности и ошибки базовых классификаторов на различных классах;

2) упорядочить набор матриц, характеризующих точности и ошибки базовых классификаторов, для соблюдения соотношения (8);

3) получить от каждого из базовых классификаторов ответ (прогнозируемый класс) для классифицируемого объекта и сформировать бинарную $n \times n$ -матрицу ответов;

4) вычислить след матрицы ответов;

5.1) если значение следа матрицы ответов не больше 1, то определить максимальный диагональный элемент этой матрицы и его индекс;

5.2) если значение следа матрицы ответов более 1, то сформировать общий $n \times n \times n$ -массив точностей и ошибок, который использовать при реализации процедуры рейтингового голосования (рис. 4);

6) в случае 5.1 выдать ответ (прогноз класса) для классифицируемого объекта в соответствии с соотношением (9); в случае 5.2 выдать ответ (прогноз класса) для классифицируемого объекта в соответствии с соотношением (10).

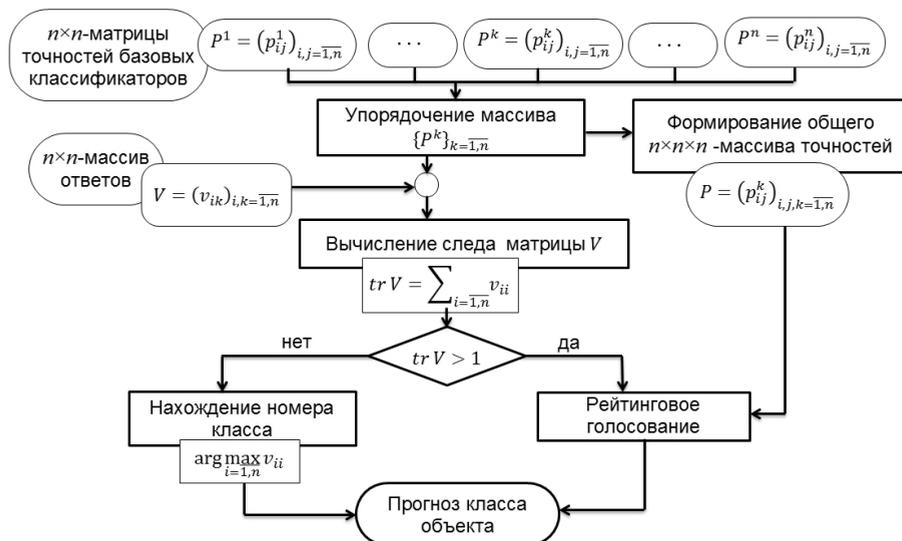


Рис. 5. Алгоритм реализации процедуры рейтингового голосования по старшинству

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный в данной работе метод построения классификаторов по обучающей информации был апробирован при решении задачи об определении формы заболевания желчевыводящих протоков. Построенная на его основе математическая модель классификатора позволяет осуществлять дифференциальную диагностику пациентов при механической желтухе, остром холангите и билиарном сепсисе. На тестовой выборке из 90 пациентов, среди которых 24 относились к 1-му классу (механическая желтуха), 46 — ко 2-му (острый холангит) и 20 — к 3-му (билиарный сепсис), общая точность распознавания составила 80 %. В первом классе правильно были классифицированы все 24 пациента (100 %), во втором — 33 (71,7 %) и в третьем — 15 (75 %).

С помощью описанного метода построения классификаторов была разработана математическая модель оценки тяжести состояния и прогноза клинического исхода при инсультах. Общая точность классификации с использованием разработанной модели, проверенная на выборке из 1 091 пациента, составила 91,9 %. Летальные исходы определялись с точностью 82,8 %, благоприятные — с точностью 94 %.

Разработанные методы также были проверены с использованием клинических показателей 232 пациентов с травмой поджелудочной железы и травматическим панкреатитом, проходивших лечение в четырех urgentных клиниках г. Харькова за последние несколько лет. На основе разработанных методов классификации с обучением и формирования композиций классификаторов были построены математические модели прогнозирования исхода травмы поджелудочной железы и оценки степени тяжести состояния пациентов [21]. Точность модели прогнозирования исхода, разработанной на основе одного классификатора, составила 86,9 %, специфичность (точность

прогнозирования благоприятных исходов) — 85,9 %, чувствительность (точность прогнозирования летальных исходов) — 87,8 %. Построенная математическая модель на основе композиции классификаторов при оценке степени тяжести состояния пациентов показала общую точность 87,1 %, распознавая состояния средней тяжести с точностью 88,2 %, тяжелые — с точностью 83,3 %, и критические — с точностью 89,7 %.

Сравнительный анализ точности, специфичности и чувствительности построенных моделей с математическими моделями, полученными на основе дискриминантного анализа, деревьев решений и логит-регрессии, показал преимущество разработанных методов оценки степени тяжести состояния пациентов и прогнозирования исхода заболевания в сравнении со стандартными методами построения математических моделей прогноза.

Выводы

Разработанный метод построения классификаторов, основанный на геометрической интерпретации структуры данных, дает возможность создавать алгоритмы вычисления оценок, позволяющие совместное использование как количественных, так и качественных предикторов с учетом нелинейности и немонотонности их поведения при переходе от класса к классу.

Предложенный метод составления композиций классификаторов «рейтинговое голосование», являющийся развитием процедуры смеси экспертов, позволяет повысить качество классификации в случаях использования нескольких классификаторов, что достигается за счет совместного учета не только точности прогнозирования отдельных классов базовыми классификаторами, входящими в композицию, а также и их ошибок на других классах.

Формализованный алгоритм составления композиций классификаторов «рейтинговое голосование по старшинству», основанный на синтезе эвристик, лежащих в основе смеси экспертов, взвешенного голосования и голосования по старшинству, применение которого целесообразно в случаях, когда базовые классификаторы возможно ранжировать в порядке их точности на различных классах, дает возможность усовершенствовать метод голосования по старшинству, а также уменьшить количество отказов от классификации по сравнению со стандартными композициями с логикой старшинства или большинства.

В результате использования разработанных методов оценки степени тяжести состояния пациентов, построены математические модели дифференциальной диагностики заболеваний желчевыводящих протоков, оценки тяжести состояния при травме поджелудочной железы и травматическом панкреатите, определения исхода при травматических повреждениях поджелудочной железы и при инсультах, которые обладают повышенной точностью, специфичностью и чувствительностью по сравнению с моделями, построенными на основе стандартных методов.

1. Потанина О.К. Сравнение эффективности существующих прогностических моделей для оценки тяжести состояния реанимационных больных хирургического профиля : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 03.01.09, 14.01.20 / Потанина Ольга Климентовна; ГБОУ ВПО РНИМУ им. Н.И. Пирогова, НИИ СП им. Н.В. Склифосовского. — Москва, 2012. — 23 с.
Potanina O.K. *Comparison of the Effectiveness of Existing Predictive Models to Assess The Severity of Intensive Care Surgical Patients*. Abstract Medical Sciences PhD Dis., Moscow, 2012.
2. Евтюков Г.М. Оценка тяжести состояния больных, находящихся в критическом состоянии / Г.М. Евтюков, Ю.С. Александрович, Д.О. Иванов. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.airspb.ru/persp_23.shtml (дата обращения: 26.09.2013).
Evtjukov G.M., Alexandrovich Yu.S., Ivanov D.O. Assessment of the Severity of Patients in Critical Condition. Available at: http://www.airspb.ru/persp_23.shtml (accessed 26 September 2013).
3. Купцов А.А. К вопросу об оценке тяжести общего состояния // Прикладные информационные аспекты медицины / А.А. Купцов 2001, Т. 4, № 1. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.vsm.a.ru/publ/priam/V_4_1/PART_3.HTML (дата обращения: 26.09.2013).
Kuptsov A.A. On the Estimation of the Severity of General Condition. *Applied Information Aspects of Medicine*, 2001, vol. 4, no. 1. Available at: http://www.vsm.a.ru/publ/priam/V_4_1/PART_3.HTML (accessed 26 September 2013).
4. Объективная оценка тяжести состояния больных и прогноз в хирургии / Ю.М. Гаин, Г.Я. Хулуп, Н.В. Завада, С.А. Алексеев, В.Г. Богдан. — Минск : БелМАПО, 2005. — 299 с.
Gain Yu.M., Hulup G.Ya., Zavada N.V., Alexeev S.A., Bogdan V.G. *Objective Assessment of Patients' Grade of Severity and Prognosis in Surgery*. Minsk, 2005. 299 p.
5. Вильдеман А.В. Математические модели прогнозирования индекса моторики на основе многомерного статистического анализа : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Вильдеман Александр Валерьевич ; Пермский гос. техн. ун-т. — Пермь, 2010. — 16 с.
Vildeman A.V. Mathematical Models of Motility Index Prognosis Based on Multivariate Statistical Analysis. Abstract of Candidate of Physical and Mathematical Sciences PhD Dis. Perm. 2010.
6. Champion H.R., Sacco W.J., Hannan D.S., Lepper R.L., Atzinger E.S., Copes W.S., Prall R.H. Assessment of Injury Severity: the Triage Index. *Critical Care Medicine*, 1980, vol. 8, pp. 201–208.
7. Kaukinen L, Pasanen M, Kaukinen S, Ojanen R. Predicting the prognosis with trauma indices in surgical patients treated in the intensive care unit. *Ann ChirGynaecol*, 1984, no. 73(5), pp. 253–260.
8. Халафян А.А. Анализ и синтез медицинских систем поддержки принятия решений на основе технологий статистического моделирования : автореф. дис. ... д. техн. наук: 05.13.01 / Халафян Александр Альбертович ; Кубанский гос. технологический университет. — Краснодар, 2010. — 47 с.
Khalafyan A.A. *Analysis and Synthesis of Medical Decision Support Systems Based on Statistical Modeling Techniques*. Dr. Tech. Sci. Dis. Krasnodar, 2010. 47 p.
9. Поворознюк А.И. Система поддержки принятия решения в медицине на основе синтеза структурированных моделей объектов диагностики / А.И. Поворознюк // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2009. №12–1. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/sistema-podderzhki-prinyatiya-resheniya-v-meditsine-na-osnove-sinteza-strukturirovannyh-modeley-obektov-diagnosticski> (дата обращения: 26.09.2013).
Povoroznyuk A.I. Decision Support System in Medicine Based on the Syntheses of the Outline Models of Diagnostics' Objects. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/sistema-podderzhki-prinyatiya-resheniya-v-meditsine-na-osnove-sinteza-strukturirovannyh-modeley-obektov-diagnosticski> (accessed 26 September 2013).

10. Дэйвисон М. Многомерное шкалирование: методы наглядного представления данных / Дэйвисон М. — М. : Финансы и статистика, 1988, 254 с.
Davison M.L. *Multidimensional Scaling*. Moscow: Finansy i statistika, 1988. 254 p.
11. Greenacre M. *Correspondence Analysis in Practice, Second Edition*. London: Chapman & Hall/CRC, 2007. 274 p.
12. Журавлев Ю.И., Рязанов В.В., Сенько О.В. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько — М. : Изд. ФАЗИС, 2005. —159 с.
Juravlev Yu.I., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V. *Recognition. Mathematical Methods. Software System. Practical Applications*. Moscow: FAZIS Pub., 2005. 159 p.
13. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. *Pattern Classification*, 2nd ed. NY John Wiley & Sons, NY, 2001. 680 p.
14. Kuncheva L.I. Combining pattern classifiers: methods and algorithms. *A Wiley- Interscience publication*. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken, 2004. 360 p.
15. Воронцов К.В. Лекции по алгоритмическим композициям / К.В. Воронцов. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/0/0d/Voron-ML-Compositions.pdf> (дата обращения: 26.10.2012).
Vorontsov K.V. *Lecture Notes on Algorithms Compositions*. Available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/0/0d/Voron-ML-Compositions.pdf> (accessed 7 October 2012).
16. Ho T.K. Multiple classifier combination: Lessons and the next steps. *Hybrid Methods in Pattern Recognition*. World Scientific Publishing, 2002, pp. 171–198.
17. Dietterich T.G. Ensemble Methods in Machine Learning. *Multiple Classifier Systems, volume 1857 of Lecture Notes in Computer Science*. Cagliari, Italy: Springer, 2000, pp. 1–15.
18. Jacobs R.A., Jordan I.J., Nowlan S.J., Hinton G.E. Adaptive Mixtures of Local Experts. *Neural Computation*, 1991, no 3, pp. 79–87.
19. Osborne M.L. The seniority logic: A logic for a committee machine. *IEEE Trans. on Comp.*, 1977, vol. C-26, no. 12, pp. 1302–1306.
20. Воронцов К.В. Лекции по логическим алгоритмам классификации / К.В. Воронцов. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.ccas.ru/voron/download/LogicAlgs.pdf> (дата обращения: 21.12.2007).
Vorontsov K.V. *Lecture Notes on Logical Classification Algorithms*. Available at: <http://www.ccas.ru/voron/download/LogicAlgs.pdf> (accessed 21 December 2007).
21. Нессонова М.Н., Кочина М.Л. Результаты использования информационной технологии оценки тяжести состояния пациентов и прогноза исхода при травме поджелудочной железы / М.Н. Нессонова, М.Л.Кочина // Клиническая информатика и телемедицина. — 2013. — № 9. — Вып. 10. — С. 102–107.
Nessonova M.N., Kochina M.L. Applying results of the information technology for grade of severity estimation and clinical outcome prediction in a case of pancreas trauma. *Clinical Informatics and Telemedicine*, 2013, no. 9, vol. 10, pp. 102–107.

Получено 27.09.2013

L.S. Fainzilberg, E.N. Minina

EVALUATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM USING MAGNITUDE VARIATION OF THE PHASE TRAJECTORIES OF SINGLE-CHANNEL ECG

Introduction: The new approach to the assessment of the functional state of the cardiovascular system during screening examinations based on the analysis of the phase portrait's features of a single-channel ECG is developed. Our previous studies have shown that using of new diagnostic features of the phase portrait single channel ECG is possible to increase the sensitivity and specificity of diagnosis even in cases where traditional analysis of 12-lead ECG is uninformative. We assume that the degree of dispersion of the phase portrait trajectories of single-channel ECG may incur an additional diagnostic value as a predictor of the adequacy of the "degree of randomness" of the functioning of the system with regard to its level of development, gender and individual characteristics of the organism.

The purpose of the article is experimental verification of this hypothesis on clinical material.

Methods: Studies were conducted using a hardware-software complex FASEGRAPH that implements information technology processing of the first standard lead of ECG on the phase plane. In contrast to well-known works, in which a single-channel ECG phase portrait is studied on a plane $z(t), z(t - \tau)$, where $\tau = \text{const}$ is a time delay, the complex constructs the phase portrait in the coordinates $z(t), \dot{z}(t)$ where $\dot{z}(t)$ is the rate of change of the signal of the electrical activity of the heart. Due to this we take into account not only the amplitude but the speed characteristics of the test process. We investigate the diagnostic value of indicator σ which characterizes the dispersion of ECG's trajectories obtained from 129 female and 192 man from 6 to 76 years old. Our goal was to study the dependence of the indicator of age and gender. A secondary objective was to compare values of indicator σ with the level of fitness.

Results: It was established that with increasing age the indicator σ tends to increase among women and to decrease among men. Indicator's changes relative to the average values was as high as 15% ($p < 0,05$). Children under 12 regardless of gender demonstrate a wide range of changes of the indicator which was an average 22.5% ($p < 0,05$) higher than the rate of an adult. By increasing the external load among male athletes the increase in the index σ exceeds the increase in heart rate. The opposite trend is observed among woman-athletes. By increasing the external load in persons who are not involved in sports, regardless of their sex an increasing of the heart rate exceeds the increase in the indicator σ . Among athletes the indicator σ changes in waves under increasing the load while in the non-sporting group the indicator σ increases monotonically. Quantitative changes of the indicator σ under urgent and long-term adaptation is directly related to the optimal switching high-frequency components of heart rate regulation.

Conclusions: The dispersion of single-channel ECG's trajectories in the phase space obtained by measuring of the indicator σ can be used as an additional criterion for evaluating the effectiveness of the management the cardiovascular system's functional state.

Key words: information technology, the phase portrait of ECG, criterion.

M.I. Vovk, Ye.B. Galyan, E.N. Podoprigora

INFORMATION TECHNOLOGY FOR MOVEMENT CONTROL OF THE HAND USED TO RESTORE THE MOTOR COMPONENT OF SPEECH

Introduction: Cerebral strokes not only lead to disorders of the motor functions, but also, in 50–60% of cases, of the speech. In our previous studies we developed structural and functional model of the speech motor component restoration based on connecting an external circuit of the purposeful control of forced muscle movements of the hand to the patient. The central part of this circuit is a programmed electrical muscle stimulator. Further studies are aimed at solving practical problems of technology synthesis of speech restoration.

The purpose of this research is to develop an information technology of purposeful control of hand movements to restore the motor component of speech as well as to conduct clinical trials of the technology.

Method: The technology under consideration is based on programmed electrical muscle stimulation method.

Results: Mechanisms of neural plasticity, link between speech development and the development of finger movements as well as proximity of centers of speech and hand representation in the cerebral cortex, all serve as the theoretical grounding for the synthesis of information technology of movement control of the hand to restore speech.

Training programs serving as data signals to control the movements of the hand, methods of transmission of these signals, types of fine motor hand movements, and topology of transmitting the signals to the muscles to control these movements, were all considered as components of this technology. The structural and functional model for speech recovery based on the information technology of purposeful control of fine motor hand movements was presented.

Training of fine hand movements based on the electrical stimulation driven by artificially synthesized programs leads to the formation of new motor centers for the hand and speech. The “Donor” program (the mirroring program), in which the nonparalyzed hand is fit with a sensor to record voluntary fine motor hand movements, and the opposite affected hand is fit with surface electrodes to active the paralyzed muscles, enables to mobilize additional mechanisms of neural plasticity. The criteria for selecting fine hand movements used in speech restoration encompassed development of fine motor skills of the hand in ontogeny and availability of motor points of muscles during electrical stimulation with surface electrodes.

The results of clinical trials of the technology in the complex of rehabilitation measures used to restore speech in post-stroke patients with motor aphasia and its analysis show improvement in language function in 63% of patients, compared to improvement rates of 40%, when the traditional course of rehabilitation is followed.

Conclusions: Use of information technology in purposeful control of fine hand movements in the rehabilitation of stroke patients contributes to the restoration not only of hand movements but also of speech.

Keywords: information technology, purposeful control, programmed stimulation, fine hand movements, structural and functional model, speech restoration, neural plasticity, clinical trials.

S.I. Dotsenko, P.A. Negadailov

ON OPTIMAL SEARCH ORDER IN THE GROUP SECRETARY PROBLEM

Introduction: We consider a problem of choosing the best item for the case when the elements are divided into groups and performed in a single step simultaneous viewing of elements of the group.

A case, when the objects are divided into groups and carried out simultaneous viewing of candidates in each group, is considered in [3]. After watching the group of candidates the decision procedure is similar to the classical problem, namely: if the group presents the best candidate among all previously viewed items (such an element is called a maximum) to make a decision to choose this candidate and finish viewing or reject it and continue, the returning to the previously rejected candidates is prohibited.

In this case the optimal rule for selecting the best candidate based on the so called “choice theorem” (or “Bruce’s theorem”) is considered in [4] because maximum elements arising may be interpreted as independent Bernoulli trials with different probabilities of success. In this connection a natural question arises: in what order one should view groups that maximize the probability of selecting the best candidate.

Purpose: We try to find the best order of viewing groups which maximize the probability of selecting the best candidate, provided that optimal stopping rule, based on the “Bruce’s theorem” is applied and we compare this probability for the best and the worst cases. As may be expected, the lower bound for the worst case is the probability to find the best element at the classical secretary problem, i.e. $1/e$.

Results: At first we prove two lemmas concerning the form of the optimal order of viewing groups, allowing to understand the structure of optimal solutions. The knowledge of structure helps to shrink the search to some class of permutations (considerably more narrow, then the initial set) of groups. Then we constructed genetic algorithm which finds the approximate optimal solution.

Conclusion: The sequence of groups that maximize the probability of successful choice at the generalized secretary problem must follow the certain rules, that are formulated as lemma 1 and 2. Nevertheless, permutation number that are follow the mentioned rules remains big enough and it impossible to consider all of them directly.

The genetic algorithm finds the approximate solution numerically with high precision. For the case of three groups the exact rule and correspondent probability of success are obtained.

Keywords: optimal choice, secretary problem, Bernoulli trials, group search, genetic algorithm.

A.V. Gummel

STUDY OF A CONTROL PROCESS SYNTHESISED USING APPROXIMATE MODEL WHICH IS IDENTIFIED UNDER BOUNDED ERROR CONDITIONS

Introduction: Majority of existing control methods consider that mathematical model of controlled object is given a priori. If the model is unknown, then identification methods are applied. This methods allows to retrieve a model of researched object using an input and output data which obtained from conducted on object experiments. In case when experiment information contain stochastic white noise bias model structure and parameters can be recovered in a way that accuracy of identification is sufficient to apply existing methods of robust synthesis and obtain acceptable control to get required properties of closed loop system. If only known information is only some boundary of an errors full recovery in many cases is impossible. This study deals with the problem of control synthesis using model obtained by system identification from information affected by bounded error. Such models with given identification conditions can only represent a reduced dimension approximation of original system. Previous research managed to develop identification methods allowing to get approximation models, precision of which is consistent with bias in original data. For linear stationary systems such methods consist of two essential stages. On first stage model structure is determined using singular values as result of SVD procedure applied to input and output information matrices. Second stage is to determine parameters of model given structure of model.

The purpose of this paper is to determine to what extent identified approximating models are suitable for solution of practical problems, how this models should be used in control synthesis problems and ultimately offer a reasonable method of solving control synthesis problem using identified model.

Results: Paper describes identification process and following control synthesis to assure target properties of system with feedback. The modified 4SID-method is used for identification. Feedback control is synthesized using poles positioning principle and asymptotic state identification of system. Data is obtained using numerical modeling allow to make some evaluation of synthesized control quality.

Conclusions: Based on the results obtained during the research it is possible to state that identified approximating models can be used to change the dynamic characteristics of original unknown system.

Properties of synthesized control can allow to get a system with feedback that has shorter settling time and keep required level of output signal. Whereas bias in system with feedback will stay within error boundaries of initial system or at least overshoot will be insignificant. However further decrease of settling time will lead to increase of bias level of system with feedback, thus such synthesis should be considered as a trade-off between acceptable bias level and required speed of transient response.

Keywords: system identification, control synthesis, 4SID, asymptotic state identification.

V.V. Pavlov, Y.M. Shepetukha

ISSUES OF NET-CENTRIC SYSTEMS ANALYSIS AND SYNTHESIS

Introduction: New scientific endeavors connected with the creation of net-centric concept as well as the development of net-centric systems are widely used in different fields of human activity. Advanced computer and communication technologies allow a real-time modeling of distributed functional and operational components for complex applied processes.

The purpose is the elaboration of methodological issues related to analysis as well as synthesis of net-centric systems with high dimensions and complex configurations.

Methods: General system theory, conflict resolution theory, invariant systems synthesis, theory of deterministic chaos, methods of chaos synchronization and control.

Results: In addition to the traditional taxonomy, specifying man-machine systems operating under the conditions of certainty, risk or uncertainty, it is proposed to distinguish systems working within the so-called “deterministic chaos” when small variations of initial conditions generate completely different phase trajectories. Methodology for the development of net-centric structures should be based upon a system integration of interacting functional and operational components. Modeling of applied processes allows to examine possible scenarios that describe originating of system’s chaotic behavior. The proposed approach could also be used for both quantitative and qualitative analyses of essential parameters’ influence on different options for a recovery of net-centric systems’ organized state.

Conclusions: An important issue of research in the field of net-centric systems is recognition and structuring of specific functional and operational elements coping with internal as well as external information flows. Examination of applied processes in distributed network structures gives a possibility to distinguish various models of chaotic behavior: discrete models, finite phase space ones described by ordinary differential equations (systems of Lorenz, Rossler, etc.), infinite phase space models governed by ordinary differential equations with delays (system of Ikeda, etc.). Another significant problem of net-centric systems’ construction is the examination of a way from chaotic to organized state of the system. Such a backward transition could be performed with the use of modification for essential variables of information exchange process.

Keywords: applied process, net-centric system, chaotic behavior, chaos control, non-linearity, unstable phase trajectory, synchronization, feedback.

A.A. Trizna, S.A. Yankova

AREAS OF PRACTICAL APPLICATION OF INDICES OF AIRCRAFTS MAINTENANCE AND THEIR GROUND BY METHOD OF THE GENERALIZED ENTROPIES

Introduction: There is a necessity of classification and specification of determinations of aircraft maintenance indexes and criteria.

In theory, the technical operation is now entering its second phase. Its generalized characteristic is to consider not operating as an independent phase, and as the central stage in the life cycle of the existence of industrial products, the need for advanced classification and clarify the definitions and criteria of technical manuals; generalized analytics system properties (efficiency, reliability, maintainability, durability, cost and etc.) and use these combinations of properties.

The purpose of the article is aircraft maintenance and engineering psychology indexes as complex policomponent probabilistic values of these indexes and determination of area of their practical applicability.

Results: Regularity researches of additive and multiplicative measures show that at the increase of number of components in an index the area of practical applicability of additive index passes to the area of small probabilities and multiplicative — to the area of high probabilities.

The developed table with nomograms for the engineering calculation of practical application of complex policomponent probabilistic values domains allows to define a practical application of these indexes domain at the estimation of aircraft maintenance.

Conclusions: Theory and practice of technical operation of the aircraft is currently at the stage of organizing and summarizing data. In order to organize, you need to generalize the use of such approaches as a process approach, process analysis and generalized theory of processes. Analysis of indicators of aircraft operations showed that the calculation of areas of their practical applicability should be carried out by the generalized entropy process. Developed classification performance of aircraft operation, which is based on the consideration of these indicators as multicomponent probability values (measures) to determine the area of practical application of these indicators when assessing the technical operation of aircraft.

Investigation of the laws of the additive and multiplicative measures showed that increasing the number of components in the index, the area of practical applicability of the additive indicator moves to the low-probability, and multiplicative function in the region of high probability.

Keywords: Aircrafts maintenance, engineering analysis, indices of maintenance, entropy, nomogram.

Kochina M.L., Nessonova M.N.

METHODS TO ESTIMATE PATIENT'S GRADE OF SEVERITY

Introduction: One of the actual tasks in developing medical decision support systems is forming of decision rules, which serve for patient's grade of severity estimation. Since medical data are mostly random variables, the most appropriate techniques for mathematical modeling in medical applications are stochastic, probabilistic and statistical methods of multivariate analysis.

The purpose of the paper is to develop the methods for patient's grade of severity estimation, which involve the method to construct classifiers, and methods to form their compositions.

The method for classifiers constructing is based on the metric approach to graphical representations (maps or plots) generated by statistical methods of geometrical representation of data structure (multidimensional scaling and correspondence analysis). The key point of the method developing is that we represent "classes" not as some subspaces or areas of compact layout in objects' space, but as an additional feature of object's description. Using such interpretation of "class" notion we construct the mathematical model of target feature "class" dependence on other explanatory variables.

To construct compositions of classifiers we develop and formalize the method, which we call "rate voting". The method uses weights of basic classifiers, evaluated as functions of basic algorithms' answers for an object, their accuracies in predicting separate classes, and mistakes in prediction other classes. Another method of classifiers compositions constructing were called "seniority rate voting". The method evolves ideas of "rate voting" by combining them with principles of committees with seniority logic. This combined method turns to be more relevant and effective in some practical applications.

Results and Discussion: The applying results of the methods suggested are reported in the paper. The mathematical models for patient's grade of severity estimation in a case of pancreas trauma and traumatic pancreatitis, for differential diagnostics of bile-excreting ducts diseases, for clinical outcome prediction in a case of cerebral strokes and pancreas traumatic injuries, were developed. It is shown that overall accuracy, sensitivity and specificity of these models are greater than of those, which were developed on the basis of the common mathematical-statistical modeling methods.

Conclusions: The methods to construct classifiers and their compositions, which are reported in the paper, allow improving of overall accuracy, specificity and sensibility of patient's grade of severity estimation.

Keywords: patient's grade of severity estimation, supervised classification method, compositions (committees, ensembles) of classifiers.

Вовк Майя Ивановна,

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующего отделом биоэлектрического управления и медицинской кибернетики Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: dep140@irtc.org.ua

Галян Евгения Борисовна,

младший научный сотрудник отдела биоэлектрического управления и медицинской кибернетики Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: galevbor@mail.ru

Гуммель Алексей Викторович,

аспирант отдела управления динамическими системами Института космических исследований НАН Украины и НКА Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: ovgumm@gmail.com

Доценко Сергей Иванович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры исследования операций факультета кибернетики КНУ имени Тараса Шевченко, пр. Глушкова, 4 Д, г. Киев, 03680, e-mail: sergei204@ukr.net

Кочина Марина Леонидовна,

доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры клинической информатики и информационных технологий и управления здравоохранением Харьковской медицинской академии последипломного образования МОЗ Украины, ул. Корчагинцев, 58, г. Харьков, 61000, e-mail: kochinam@inbox.ua

Минина Елена Николаевна,

кандидат биологических наук, доцент кафедры физической реабилитации и здоровья человека Таврического Национального университета имени В.И. Вернадского, пр. Академика Вернадского, 4г, АР Крым, г. Симферополь, 95007, e-mail: cere-el@yandex.ua

Негадайлов Павел Анатольевич,

кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры исследования операций факультета кибернетики КНУ имени Тараса Шевченко, пр. Глушкова, 4 Д, г. Киев, 03680.

Нессонова Марина Николаевна,

ассистент кафедры фармакоинформатики Национального фармацевтического университета, ул. Александра Невского, 18, г. Харьков, 61000, e-mail: saddy_me@mail.ru

Павлов Вадим Владимирович,

доктор технических наук, профессор, заведующий отделом эргатических систем Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: dep185@irtc.org.ua

Подопригора Елена Николаевна,

реабилитолог, врач-невропатолог, младший научный сотрудник отдела биоэлектрического управления и медицинской кибернетики Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: amberlen210@mail.ru

Тризна Александра Александровна,

старший преподаватель кафедры авионики Национального авиационного университета, просп. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03680, e-mail: alal23@mail.ru

Файнзилберг Леонид Соломонович,

доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела автоматизированных систем обработки данных Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: fainzilberg@voliacable.com

Шепетуха Юрий Михайлович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела эргатических систем Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40, г. Киев, 03680 ГСП, e-mail: ysherp@meta.ua

Янкова Светлана Александровна,

аналитик Научно-методологического центра процессного анализа, ул. Ревуцкого, 23, г. Киев, 02068