

На правах рукописи

Ильин Станислав Игоревич

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ПАТОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ
ХАОТИЧЕСКИХ АВТОМАТОВ**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в медицине)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Курск - 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Курский государственный технический университет»
на кафедре «Программное обеспечение вычислительной техники»

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор В.М. Довгаль

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор В.Н. Лопин
кандидат технических наук,
ст.научн. сотр. Н.П. Пустовой

Ведущая организация: Курский государственный университет

Защита диссертации состоится «14» ноября 2007 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 212.105.03 при Курском государственном техническом университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.
Автореферат разослан «12» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ф.А. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В последнее время в области медицинской информатики интенсивно развивается новое научное направление, сопряженное с построением виртуальных персональных моделей органов и организма человека для систем поддержки принятия медицинских решений. За рубежом и в России теория построения виртуальных персональных моделей находится в стадии становления. В Европе это направление науки формируется в русле приоритетных научных программ, например, VII рамочный проект Евросоюза. Полученные результаты, как правило, носят исследовательский характер и еще не удовлетворяют потребностям медицинской практики, в чем заключается основная проблемная ситуация.

Основная решаемая задача данного диссертационного исследования заключается в объединении современных достижений в теории хаотических систем и теории абстрактных автоматов для создания нового инструментального средства в виде хаотического автомата для построения виртуальных персональных моделей и их практического применения для диагностики *на примере* сердечно-сосудистых патологий.

Для решения поставленной задачи имеется достаточное число исследований, как в теории хаотических систем, так и в теории абстрактных автоматов. В этих направлениях науки работали Э. Лоренц, М. Хенон, Дж. Томпсон, Г. Биркгоф, Н. С. Крылов, А.Н. Гапонов-Грехов, В.М. Глушков, А.В. Каляев, А.Н. Мелихов, Дж. Миллер, Э. Мур и другие известные ученые.

Теоретическая часть диссертационной работы, в основном, включает в себя разработку методов и алгоритмических средств построения и симуляции функционирования хаотического автомата для построения виртуальной персональной модели сердечно-сосудистой системы человека при медицинской диагностике. Практическая часть работы направлена на разработку программных средств и их верификации для диагностики сердечно-сосудистых патологий в классе стенокардии и инфаркта миокарда с обособлением класса «другие кардиопатологии».

Диссертационное исследование выполнялось в рамках госбюджетных НИР Курского государственного технического университета «Разработка и исследование средств обработки информации электронными и оптическими методами» по теме: «Теория и практика распознавания образов».

Цель работы заключается в повышении уровня качества медицинской диагностики путем разработки метода и алгоритмов построения и симуляции хаотического автомата и создания персональных моделей на его основе с использованием кардиоритмограмм, а также программных средств системы поддержки диагностических решений при сердечно-сосудистых патологиях.

Задачи диссертационного исследования:

1. Осуществить системный анализ особенностей, свойств и характера кардиоритмограмм, отражающих хаотическую динамику поведения сердечно-сосудистой системы.

2. Разработать метод и алгоритм определения траекторной плотности поведения кардиоритмограммы в многомерном фазовом пространстве, алгоритм визуализации кривизны фазовых пространств странных аттракторов.

3. Разработать метод и алгоритм построения хаотического автомата и его продукционной алгоритмической модели.

4. Создать метод и алгоритм симуляции функционирования хаотического автомата для построения виртуальной персональной модели диагностики на основе кардиоритмограмм.

5. Разработать программные средства системы поддержки принятия диагностических решений при сердечно-сосудистых патологиях и осуществить верификацию программных средств при диагностике инфаркта миокарда и стенокардии.

Объектом исследования является сердечно-сосудистая система человека.

Предметом исследования являются виртуальные персональные модели организма человека для принятия диагностических решений на основе анализа хаотических последовательностей R-R – интервалов кардиоритмограмм.

Методы исследования основываются на методах медицинской диагностики, на положениях теории проектирования информационных систем, теории алгоритмов, теоретического программирования, теории абстрактных автоматов, топологии и теории хаотических систем.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается: согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, проведенными процедурами верификации; корректным использованием законов и существующих теоретических положений, а также рецензированием печатных работ, их обсуждением на научно-технических конференциях и семинарах кафедры ПО ВТ.

Научная новизна работы состоит в решении важной научно-практической задачи по созданию новых инструментальных средств для построения виртуальных персональных моделей. Впервые получены следующие результаты:

1. Установлена хаотическая природа последовательности R-R интервалов кардиоритмограмм, что позволяет использовать для ее анализа достижения современной теории хаотических систем.

2. Разработаны метод и алгоритм определения траекторной плотности кардиоритмограмм и визуализации фазовых пространств, что составляет основу для исследования кривизны фазового пространства вложения странного аттрактора кардиоритмограмм, которая необходима для определения числа вершин и функции переходов хаотического автомата и топологического портрета виртуальной персональной модели.

3. Созданы метод и алгоритм построения хаотического автомата и его продукционная алгоритмическая модель, что открывает пути его

использования в качестве инструментального средства построения виртуальных персональных моделей сердечно-сосудистой системы человека.

4. Созданы метод и алгоритм симуляции функционирования хаотического автомата для построения виртуальной персональной модели диагностики в виде набора параметров динамики функции переходов автомата на основе единственного измеряемого параметра - кардиоритмограммы.

5. Разработана архитектура программных средств системы поддержки принятия диагностических решений при сердечно-сосудистых патологиях и осуществлена их верификация для диагностики инфаркта миокарда и стенокардии. Показатель качества дифференциальной диагностики инфаркта миокарда по контрольной группе составляет 0,89, а стенокардии – 0,91, класс «другие» - 0,15.

Практическая ценность работы заключается в создании логически и практически состоятельного программного продукта диагностики на основе анализа единственного интегрального параметра в виде хаотической последовательности R-R - интервалов кардиоритмограмм для использования в типовых лечебных учреждениях скорой помощи и при проведении нозологических исследований.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование 2006» (Томск, 2006); 13-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии» (Харьков, 2007, дважды); юбилейной X Международной научно-технической конференции «Медико-экологические информационные технологии – 2007» (Курск, 2007), научно-технических семинарах кафедры ПО ВТ Курского государственного технического университета (2005, 2006, 2007).

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования в виде программного продукта диагностики внедрены в кардиологическом отделении МУЗ ГБ Скорой Медицинской Помощи г. Курска.

Публикации. По результатам выполненных разработок и исследований опубликовано 6 печатных работ, в том числе 1 по перечню центральных рецензируемых журналов и изданий [1], рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ, получено 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

В работах, написанных в соавторстве, **лично автором диссертации** разработаны методы построения траекторной плотности хаотических процессов [6], методы и алгоритмы построения хаотического автомата [1,5], показан метод расчета размерности пространства вложения странного аттрактора [4], методика построения многомерных каркасов хаотических кардиоритмограмм [3]. Все результаты публикаций получены путем

использования разработанного автором данной диссертационной работы программного продукта.

На защиту выносятся:

1. Метод и алгоритм определения траекторной плотности кардиоритмограммы в многомерном фазовом пространстве.
2. Метод и алгоритм построения хаотического автомата и его продукционной алгоритмической модели.
3. Метод и алгоритм симуляции функционирования хаотического автомата для построения виртуальной персональной модели диагностики на основе кардиоритмограмм.
4. Архитектура программных средств поддержки принятия диагностических решений, являющаяся финальным конструктом диссертационного исследования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 122 страницах машинописного текста, содержит 10 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 125 наименований и приложений объемом 42 страницы. Общий объем 164 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая ценность, апробация и реализация результатов работы, публикации по теме диссертации, структура и объем диссертации.

В **первой** главе выполнен аналитический обзор методов анализа хаотических процессов в биомедицинских исследованиях. Проведен обзор литературных источников и патентных материалов.

Рассмотрены основные методики исследований сердечно-сосудистой системы как объекта приложения теории хаотических систем. Дано описание исследования вариабельности сердечного ритма (ВСР) как базовой характеристики для изучения процессов в сердце с точки зрения хаотической динамики. Описаны методики анализа составляющих электрокардиограммы (ЭКГ). Произведен сравнительный анализ методов нелинейной динамики для анализа ВСР и ЭКГ с традиционными методами анализа.

Концепция предлагаемого подхода заключается в объединении двух зарекомендовавших себя на практике классов теоретических инструментальных средств. К первому классу средств относятся достижения современной теории динамических систем с ее методами анализа хаотических процессов, а ко второму классу относятся методы обработки информации, известные из теории абстрактных автоматов. При таком объединительном подходе полезная диагностическая информация извлекается не из непосредственно измеряемого сигнала, а из динамики переходов автоматной модели хаотического процесса. Результативность объединительного подхода определяется такими оценками качества

диагностики, которые определяют преимущества по отношению к традиционным методам, используемым в современной медицинской науке и практике.

Во **второй** главе рассматриваются математические основы обработки хаотических числовых рядов. Приводится математический аппарат расчета размерности пространства вложения странных аттракторов. Описываются основные достоинства и недостатки различных видов размерностей. Приводится классификация абстрактных автоматов, рассматривается их пригодность для использования в качестве моделей систем различной природы при проведении исследований.

Основное назначение второй главы заключается в том, чтобы оценить возможности использования двух современных теоретических платформ: теории хаотических систем и теории абстрактных автоматов – для их использования в целях данного диссертационного исследования. Установлено, что имеются достаточные основания применять ставшие классическими положения теорий хаотических систем: локализация топологических портретов странных аттракторов, отсутствие самопересечений траекторий, существование бассейнов притяжения, дробная размерность топологических портретов, строгая уникальность траекторий при различии в начальных условиях и другие. Приведены результаты системного анализа особенностей и свойств кардиоритмограмм и обоснования хаотической природы ритмограммы. Таким образом, во второй главе решена первая задача диссертационного исследования

В **третьей** главе разрабатываются метод и алгоритм построения траекторной плотности кардиоритмограмм в многомерном фазовом пространстве. Разрабатываются метод и алгоритм построения хаотического автомата и его продукционной алгоритмической модели.

Построение траекторной плотности начинается с построения многомерных каркасов одномерных хаотических ритмограмм. Пусть задана ритмограмма, представляющая собой одномерный числовой хаотический ряд:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

Необходимо построить многомерный каркас данной ритмограммы, путем восстановления фазового пространства вложения странного аттрактора. Существует несколько методов восстановления фазового пространства странного аттрактора. В данной диссертационной работе используется известный метод, предложенный Паркером и Чжуа.

Для восстановления фазового пространства странного аттрактора необходимо определить размерность пространства вложения по следующему алгоритму:

Для всего числового ряда рассчитывается накопленное отклонение от среднего значения по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^N |M - x_i|, \quad (2)$$

где M – математическое ожидание элементов ряда X , x_i – i -й элемент ряда. Тогда фрактальная размерность будет определяться по формуле:

$$D_\Phi = \frac{\ln W}{\ln S}, \quad (3)$$

где S – среднеквадратическое отклонение элементов ряда X .

Искомая размерность пространства вложения рассчитывается по формуле:

$$m = 2D_\Phi + 1 \quad (4)$$

С использованием метода Паркера и Чжуа мы получаем дискретный набор точек m -мерного пространства. Возникающая при этом картина есть реконструированный портрет странного аттрактора, присутствующего в заданной хаотической ритмограмме. Полученную картину можно интерпретировать как проекцию изображения аттрактора из естественного фазового пространства системы в реконструированное пространство размерности m .

Таким образом, описанная выше методика позволяет из заданной одномерной хаотической ритмограммы, представляющей собой одномерный числовой ряд, получить многомерный объект с заданной размерностью пространства вложения m . В результате получаем многомерный каркас одномерного хаотического ряда, который в дальнейшем используется при построении траекторной плотности заданной хаотической ритмограммы.

Траекторная плотность представляет собой обнаруженную нами перманентную закономерность многомерных хаотических процессов, которая заключается в неравномерности следования или местоположения точек на топологическом портрете, определяющегося как последовательность значений векторов координат пространства его вложения. Неравномерность следования или местоположения значений векторов координат, составляющих многомерный хаотический процесс, будем интерпретировать как пространственное искривление, порождающее разрежение или сгущение точек и определяемое по изменению расстояний между ними. Таким образом, функция неравномерности заполнения пространства вложения для хаотического процесса вычисляется как множество отношений текущих расстояний от предшествующих до последующих значений к среднему значению хаотического числового ряда в интервале измерений.

Следует отметить особенности многомерного пространства существования (вложения) топологического портрета хаотических процессов. Пространство существования имеет сложную структуру. Метрика рассматриваемого пространства изменяется в области бассейна притяжения и, соответственно, в местоположении топологического портрета. Таким

образом, во всех бассейнах притяжения наблюдаемых хаотических процессов в их многомерной форме представления пространство искривляется, компенсируя дробную размерность топологического портрета.

Рассмотрим метод расчета траекторной плотности на основе многомерного каркаса одномерного хаотического ряда, полученного на основе описанного выше алгоритма.

Пусть имеется многомерный хаотический ряд B :

$$B = \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,m} \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m} \\ \vdots \\ x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,m} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где n – количество точек m -мерного пространства в восстановленном ряде B . Данный ряд получен после восстановления m -мерного фазового пространства существования странного аттрактора. Ряд B разбивается на блоки заданной длины K . Назовем эти блоки блоками усреднения. Длина блока – это количество точек m -мерного пространства.

Зададимся некоторым шагом τ и построим последовательность блоков усреднения Q , заданной длины:

$$Q_p = \begin{bmatrix} x_{\tau(p-1)+1,1}, x_{\tau(p-1)+1,2}, \dots, x_{\tau(p-1)+1,m} \\ x_{\tau(p-1)+2,1}, x_{\tau(p-1)+2,2}, \dots, x_{\tau(p-1)+2,m} \\ \vdots \\ x_{\tau(p-1)+K,1}, x_{\tau(p-1)+K,2}, \dots, x_{\tau(p-1)+K,m} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

При переборе по p получаем набор блоков усреднения, каждый из которых содержит дискретный набор точек m -мерного пространства.

Для каждого блока рассчитывается среднее расстояние между точками m -мерного пространства по формуле:

$$L_p = \frac{\sum_{j=1}^{K-1} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i^j - x_i^{j+1})^2} \right)}{K-1}, \quad (7)$$

где x_i^j – i -я координата j -ой точки блока. Полученная величина есть траекторная разреженность в p -ом блоке усреднения. Итоговое значение траекторной плотности вычисляется как величина, обратная траекторной разреженности:

$$D_p = \frac{1}{L_p}. \quad (8)$$

При переборе по p получаем дискретный набор значений, представляющих собой траекторную плотность исходной хаотической последовательности RR-интервалов.

Таким образом, в результате приведенных выше построений мы получаем дискретный ряд D , представляющий собой траекторную плотность исследуемого хаотического процесса. Отметим, что каждой точке в массиве D

однозначно соответствует точка многомерного ряда B . Траекторная плотность является основой для построения хаотического автомата, моделирующего структуру фазового пространства странного аттрактора, присутствующего в заданной хаотической ритмограмме.

Рассмотрим алгоритм построения хаотического автомата на основе полученных каркасов и траекторной плотности. Алгоритм состоит из трех этапов.

Этап 1. Выделение (агрегация) областей притяжения субаттракторов осуществляется по матрице B восстановленного многомерного объекта и массиву траекторной плотности D . Отметим, что каждой точке в массиве D однозначно соответствует точка ряда B . Процедура расчета областей притяжения состоит из трех шагов.

Шаг 1. Определяются локальные максимумы траекторной плотности. Находим, в каких точках m -мерного пространства достигаются данные максимумы. Полученные точки являются центрами областей притяжения субаттракторов.

Шаг 2. Рассчитывается радиус для каждой m -мерной области притяжения субаттрактора с центром в точке c_i . Для этого слева и справа от точки c_i определяются значения массива D , которые близки к значению $M(D)$, где $M(D)$ – математическое ожидание D , назовем эти точки dl_i и dr_i соответственно, точки cl_i и cr_i это точки массива B в которых достигается значение плотности dl_i и dr_i . Тогда значение радиуса для гиперсферы с центром в точке c_i будет вычисляться по формуле:

$$R = \max\{\text{Dist}(B_j, c_i) | j=pl...pr\}, \quad (9)$$

где $\text{Dist}(x, y)$ - декартово расстояние между точками x и y , pl – индекс точки cl_i в массиве B , pr – индекс точки cr_i в массиве B .

Шаг 3. Производится слияние пересекающихся областей притяжения субаттракторов. Результатом слияния являются N непересекающихся областей притяжения в m -мерном пространстве вложения. Каждая область может иметь от 1 до k центров притяжения. Полученные области нумеруем от 1 до N , присвоенные этим областям индексы используются в дальнейшей процедуре идентификации точек m -мерного пространства. Таким образом, имеем таблицу C , содержащую точки центров притяжения субаттракторов, имеющую вид:

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1}, c_{1,2}, \dots, c_{1,k_1} \\ c_{2,1}, c_{2,2}, \dots, c_{2,k_2} \\ \vdots \\ c_{N,1}, c_{N,2}, \dots, c_{N,k_N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

где N – количество областей притяжения, k_i - количество центров притяжения в i -ой области.

Этап 2. Следующим этапом в построении хаотического автомата является процедура идентификации точек m -мерного пространства. В ходе этой процедуры определяется принадлежность всех точек восстановленного

ряда B к той или иной области притяжения субаттракторов, определяемой по исходному сигналу. Таким образом, матрице B ставится в соответствие одномерный ряд индексов V , i -му элементу ряда V присваивается значение j , если расстояние от точки b_i до хотя бы одного из центров притяжения j -ой области меньше R . Если же точка b_i не принадлежит ни одной области притяжения, то i -му элементу ряда V присваивается значение равное нулю. Следовательно, имеем:

$$V_i = \begin{cases} j, & \text{если } \exists(b_i, p) | \text{Dist}(b_i, c_{j,p}) \leq R \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (11)$$

Графическим отображением ряда V является диаграмма, которая отображает процесс перехода элементов B по областям притяжения субаттракторов. Пример графического отображения ряда V представлен на (рис. 1) и является визуализацией виртуальной персональной модели.

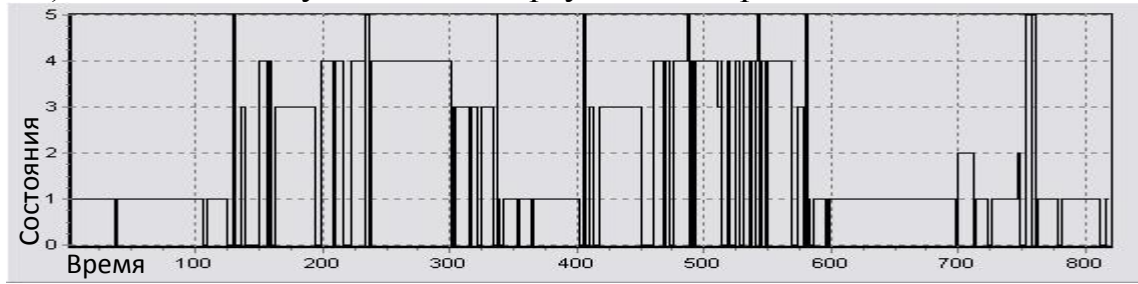


Рис. 1. Пример диаграммы переходов

Этап 3. В каждой области притяжения субаттрактора траектория хаотического процесса пребывает определенное время. На диаграмме длительность периода пребывания траектории в определенной области притяжения субаттрактора отражаются порогами диаграммы соответствующей ширины.

Шаг 1. Вводится в рассмотрение время пребывания траектории в заданной i -ой области притяжения. В общем случае траектория хаотического процесса посещает одну и ту же область притяжения субаттрактора несколько раз, каждый раз траектория пребывает этой области разное время. Условимся обозначать время пребывания траектории в j -й раз в i -ой области притяжения как t_i^j . Для определения t_i^j в массиве индексов V находим индекс точки, которая первой вошла в заданную i -ю область притяжения, обозначим этот индекс через l . Затем находим индекс такой точки траектории, которая принадлежит заданной области притяжения субаттрактора и является предшествующей по отношению к точке траектории, не принадлежащей этой области. Обозначим индекс предшествующей точки через r , тогда значение t_i^j будет равно количеству точек, находящихся между точками с индексом r и l , то есть $t_i^j = r - l$.

Шаг 2. Сопоставим каждой области притяжения субаттрактора среднее время пребывания траектории хаотического процесса в этой области, обозначим это время как τ_i . Очевидно, что для i -й области притяжения τ_i

будет вычисляться по формуле:

$$\tau_i = \frac{\sum_{j=1}^k t_i^j}{k}, \quad (12)$$

где k – число посещений траектории i -й области притяжения субаттрактора.

Для верификации и акселерации работы средств симуляции хаотический автомат целесообразно задавать в виде продукционных алгоритмов. В общем случае имеем:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\rightarrow \beta_1; \\ \alpha_2 &\rightarrow \beta_2; \\ &\vdots \\ \alpha_n &\rightarrow \beta_n, \end{aligned} \quad (13)$$

где α_i имеет вид $z_p x_q$, β_i имеет вид $y_n z_m$. В данном случае z_p представляет собой состояние, в котором автомат находится в момент времени i ; x_q – входной сигнал, поступающий на вход автомата в момент времени i ; z_m – состояние, в которое автомат переходит из состояния z_p под воздействием входного сигнала x_q ; y_n – сигнал, который автомат выдает на выходе.

Состояниями хаотического автомата являются многомерные области притяжения субаттракторов, определяемые по исходному хаотическому сигналу. Выходным сигналом является сопоставленная многомерным областям притяжения временная характеристика τ пребывания автомата в заданном состоянии. Таким образом, результатом работы хаотического автомата является трассировка состояний, имеющая следующий вид:

$$(\tau_0)_{z_0} (\tau_1)_{z_1} (\tau_2)_{z_2} \dots (\tau_n)_{z_n}, \quad (14)$$

где z_0 – состояние, в котором автомат оказывается в начальный момент времени, z_1 – состояние в которое автомат переходит из состояния z_0 , τ_0 – средняя временная характеристика пребывания автомата в состоянии z_0 , τ_1 – средняя временная характеристика пребывания автомата в состоянии z_1 и т.д. Следовательно, новая форма представления хаотического процесса порождает новый информационный поток, отражающий существенные моменты функционирования хаотической системы и являющийся ценным для реализации диагностических процедур, являясь при этом виртуальной (топологической) и персональной моделью в виде многомерного каркаса (портрета) одномерного хаотического ряда.

Таким образом, в третьей главе решена вторая и третья задачи диссертационного исследования.

В **четвертой** главе создан метод и алгоритм симуляции функционирования хаотического автомата, разработан программный продукт и приведены результаты его верификации. Приводятся результаты разработки архитектуры программных средств в составе системы принятия диагностических решений. Схема взаимодействия модулей разработанного программного продукта представлена на рисунке 2.

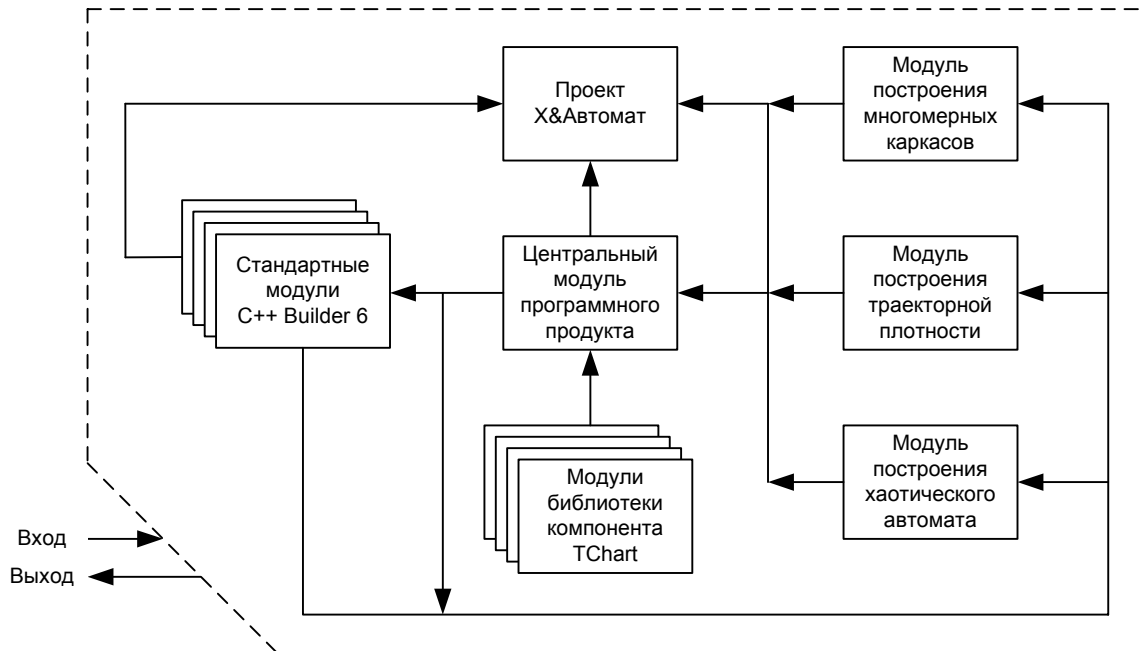


Рис. 2 Схема взаимодействия модулей

В ходе верификации рассматривались две группы испытуемых. К первой группе относились кардиоритмограммы здоровых испытуемых, ко второй – кардиоритмограммы пациентов с патологией. В результате исследований выявлено, что для первой группы испытуемых характерно большое число состояний хаотического автомата (Число состояний ≥ 10). Для второй группы характерно небольшое число состояний хаотического автомата. В ходе исследований регистрировалось (1-9 состояний). Таким образом, установлено что количество состояний хаотического автомата является информативно ценным признаком, позволяющим определять принадлежность испытуемого пациента к той или иной группе.

Вместе с тем, основной задачей при проведении исследований являлась задача дифференциальной диагностики конкретного вида патологии, при помощи анализа трассировок работы хаотического автомата. В ходе исследований установлено, что характерной особенностью для пациентов, принадлежащих к одинаковым группам, являются одинаковые последовательности переходов хаотического автомата. Исследование проводилось в два этапа.

На первом этапе производилась проверка гипотезы о том, что для пациентов с конкретным видом патологии характерны специфические виды переходов хаотического автомата. Процедура проведения исследования на первом этапе состояла из двух шагов.

На первом шаге проводились процедуры сравнения и анализа трассировок хаотического автомата с целью выделения участков трассировок, характерных для пациентов с конкретным видом патологии. Для этого исследуемые хаотические ритмограммы были разделены на классы. Каждому классу были отнесены ритмограммы пациентов с определенным диагнозом.

Диагноз этих пациентов уже был установлен с использованием традиционных методов диагностики. Назовем полученные классы классами A , B , и C . К классу A относятся пациенты, у которых была диагностирована стенокардия, к классу B относятся пациенты с инфарктом миокарда, к классу C отнесены пациенты с другими сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Каждой ритмограмме ставился в соответствие хаотический автомат. Анализировалась трассировка хаотического автомата для каждой ритмограммы. Трассировка представляет собой слово, состоящее из символов, являющихся состояниями автомата.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Рассмотрим, например, трассировку хаотического автомата для ритмограммы, принадлежащей классу X , в данном случае в качестве X выступает один из классов A , B . Назовем эту ритмограмму R . Затем, попарно проводилось сравнение ритмограммы R со всеми ритмограммами, принадлежащими классам A и B . Целью сравнения является определение слова наибольшей длины, которое входит и в ритмограмму R и в ритмограмму, с которой производится попарное сравнение, назовем это слово *подпоследовательностью наибольшей длины (трассировка)*. По результатам сопоставлений трассировок приходим к предварительному выводу о принадлежности ритмограммы R , к тому же классу, что и ритмограмма, при сравнении с которой была найдена подпоследовательность наибольшей длины, назовем этот класс Y .

Вторым шагом является процедура уточнения принадлежности ритмограммы R классу Y . Для этого производится сравнение временных характеристик τ^1 и τ^2 пребывания пары хаотических автоматов в состояниях, включенных в максимальную подпоследовательность. В процессе проведения исследований было установлено, что в процессе осуществления процедуры уточнения принимается решение о подтверждении принадлежности ритмограммы R классу Y в том случае, когда для всех временных характеристик одноименных состояний выполняется неравенство:

$$|\tau_i^1 - \tau_i^2| \leq \frac{\max(\tau_i^1, \tau_i^2)}{2}, \quad (15)$$

где τ_i^1 - временная характеристика пребывания первого автомата в i -ом состоянии, τ_i^2 - временная характеристика пребывания второго автомата в i -ом состоянии. В случае, когда неравенство (15) не выполняется, хотя бы для одного из состояний, принимается решение об отказе принятия решения по классификации ритмограммы R и направлении пациента с данной ритмограммой на дополнительное клиническое обследование.

В ходе эксперимента рассматривались ритмограммы 89 пациентов обследованных с использованием *дорогостоящих и разнообразных* лабораторных и аппаратных методик, для 47 из них уже был установлен диагноз – стенокардия, эти пациенты были отнесены к классу A , 42 пациента перенесли инфаркт миокарда, эти пациенты были отнесены к классу B .

По результатам эксперимента установлено, что для 43 из 47 испытуемых, принадлежащих классу *A*, было получено правильное диагностическое решение. Это составляет 91,5% удачных исходов. Для 4 из 47 (8,5% исходов) испытуемых было принято решение об отказе от диагностики и направлении этих пациентов на дополнительное обследование. При рассмотрении результатов по пациентам, принадлежащих классу *B* было установлено, что верное диагностическое решение было получено для 39 из 42 испытуемых, что составляет 92,6% исходов. Для 3 из 42 испытуемых (7,4% исходов) было принято решение об отказе от классификации.

На втором этапе проводились исследования пациентов контрольной группы, поступавших в приемное отделение больницы скорой медицинской помощи. Из 228 пациентов терапевтом приемного отделения по предположительному диагнозу с подозрением на сердечно-сосудистую патологию было отобрано 68 пациентов. Эти 68 пациентов составили контрольную группу испытуемых для диагностики на основе анализа кардиоритмограмм. В результате проведения исследования с участием контрольной группы испытуемых было установлено следующее. У 32 испытуемых была диагностирована стенокардия, у 26 испытуемых был выявлен инфаркт миокарда, для 10 испытуемых было вынесено решение об отказе от диагностики с направлением на дополнительное обследование. Для больных стенокардией было подтверждено 90,6% диагнозов, для пациентов с диагностированным инфарктом миокарда подтверждено 88,5% диагнозов. Сравнение проводилось с базой данных состоящей из информации о 2532 пациентах с установленным и подтвержденным диагнозом.

На (рис.3) представлен пример диаграммы работы хаотического автомата для пациента *M*, по которому принято решения об отказе от диагностирования:

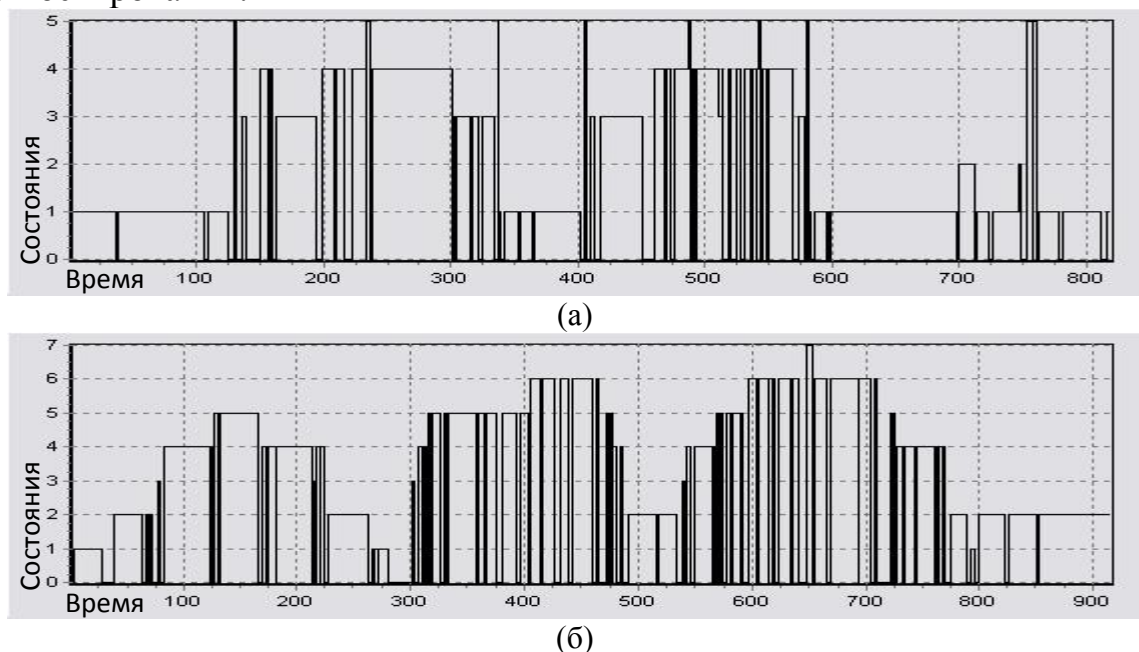


Рис. 3. Диаграммы результатов симуляции хаотического автомата для пациента: (а) отнесенного к классу *A*; (б) отнесенного к классу *C*

Подпоследовательность наибольшей длины, для трассировок, представленных на (рис. 3) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (21,8)3 (5,43)0 (19,05)4 (5,43)0 (4,22)5 (5,43)0 \\ & (19,05)4 (5,43)0 (21,8)3 (5,43)0 (19,05)4 \\ & (3,00)3 (5,19)0 (13,10)4 (5,19)0 (12,37)5 (5,19)0 \\ & (13,10)4 (5,19)0 (3,00)3 (5,19)0 (13,10)4 \end{aligned} \quad (16)$$

В данном случае по результатам процедуры уточнения принадлежности ритмограммы классу принимается решение о направлении пациента M на дополнительное исследование, поскольку условие, описанное формулой (15) не выполняется для состояний 3 и 5.

Таким образом, в четвертой главе решены четвертая и пятая задачи диссертационного исследования, что свидетельствует о том, что его *цель достигнута*.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационного исследования.

В **приложениях** приводятся листинги разработанного программного продукта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Решена важная научно-практическая задача по созданию новых методов, алгоритмических и программных средств диагностики сердечно-сосудистых заболеваний на основе хаотических автоматов. Получены следующие новые результаты:

1. Определен концептуальный базис диссертационного исследования на основе совместного использования аппаратов двух классов теоретических инструментальных средств исследований. К первому классу средств относятся достижения современной теории хаотических систем с ее методами анализа хаотических процессов, а ко второму классу - методы обработки информации, известные из теории абстрактных автоматов. По результатам предварительных исследований установлено, что кардиоритмограммы являются хаотическими процессами, имеющими свойства нестационарности и сплошного спектра.

2. Разработаны метод и алгоритм расчета траекторной плотности хаотических процессов, изначально представленных в виде одномерных числовых хаотических рядов. Траекторная плотность отражает неравномерность распределения точек в многомерном фазовом пространстве существования странного аттрактора и является индикатором степени искривления фазового пространства вложения странных аттракторов, необходимой для построения хаотического автомата и виртуальной персональной модели на его основе.

3. Созданы метод и алгоритм построения и симуляции хаотического автомата. Состояниями хаотического автомата являются многомерные области притяжения субаттракторов, определяемые по исходному

хаотическому сигналу. Выходным сигналом является сопоставленная многомерным областям притяжения временная характеристика τ пребывания автомата в заданном состоянии. В качестве функции переходов выступают области разряжения траекторий на топологическом портрете странного аттрактора. Таким образом, создано новое инструментальное средство для построения таких виртуальных персональных моделей органов и систем человека, которые задаются в виде специфических временных диаграмм поведения хаотического автомата.

4. Разработан программный продукт, реализующий методы и алгоритмы, предложенные в данном диссертационном исследовании, составляющий основу системы поддержки принятия решений для диагностики патологических состояний организма человека *на примере* патологий сердечно-сосудистой системы. Данный программный продукт не предъявляет высоких требований к аппаратуре, пригоден для применения в научных и типовых лечебных медицинских учреждениях и открывает пути для построения систем поддержки диагностических решений для широкого круга патологий на основе или кардиоритмограмм, или энцефалограмм, как интегральных характеристик состояний организма человека.

5. По результатам верификации программного продукта для пациентов контрольной группы установлено, что процент адекватной диагностики пациентов, больных стенокардией составил 90,6%, инфаркт миокарда адекватно диагностировался в 88,5% случаев. К классу «другие» (отказ от диагностики и направление на дополнительное обследование) отнесено 14,7% испытуемых. Сравнение проводилось с базой данных состоящей из информации о 2532 пациентах с установленным и подтвержденным диагнозом. Полученные оценки качества дифференциальной диагностики инфаркта миокарда и на основе хаотических автоматов существенно выше по отношению к оценкам массовой диагностики на основе кардиограмм и УЗИ, которая составляет (75%). Разработанные средства диагностики на основе виртуальных персональных моделей без существенных изменений пригодны для широкого круга патологий.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ

Публикация в издании, рекомендованном ВАК

1. Ильин, С.И. Хаотические системы: Автоматная модель [Текст] / С.И. Ильин, М.В. Невзорова, В.М. Довгаль, И.Т. Латыпов // Системы управления и информационные технологии, 2007, №3.2 (29). – с. 247-250.

Другие публикации и свидетельства

2. Ильин, С.И. Концепция построения топологических портретов случайно-подобных процессов [Текст] / С.И. Ильин // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2006): Материалы V Международной научно-практической конференции (10-11 ноября 2006 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. Ч.1. С.105-106.

3. Ильин, С.И. Проблема обработки хаотических процессов и пути ее решения / С.И. Ильин, В.М. Довгаль, В.В. Гордиенко, И.В. Ильин, Д.А. Пузына // Физические и компьютерные технологии. Труды 13-й Международной научно-технической конференции, 19-20 апреля 2007 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. С.503-508.

4. Ильин, С.И. Концепция построения хаотических автоматов [Текст] / С.И. Ильин, В.М. Довгаль, В.В. Малыхин // Физические и компьютерные технологии. Труды 13-й Международной научно-технической конференции, 19-20 апреля 2007 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. С.454-456.

5. Ильин, С.И. Хаотические автоматы: Принципы и средства построения [Текст] / С.И. Ильин, В.М. Довгаль // Известия Курского государственного технического университета. № 3 (20), 2007, с. 65-67.

6. Ильин, С.И. Метод и алгоритмическая модель построения хаотических автоматов [Текст] / С.И. Ильин, В.М. Довгаль // Медико-экологические информационные технологии – 2007: сборник материалов юбилейной X Международной научно-технической конференции / Курск. Гос. техн. ун-т. Курск, 2007, с. 199-204.

7. Программный продукт для моделирования топологических портретов случайно подобных процессов [Текст]: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610147 / Ильин С.И., Довгаль В.М., Белослюдов А.В., Невзорова М.В.; правообладатель ГОУ ВПО «Курск. гос. техн. ун-т» (RU). №2006613750; заявл. 07.11.06; зарег. 09.01.07.

8. Программный продукт для расчета и визуализации траекторной плотности случайно-подобных процессов [Текст]: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610146 / Ильин С.И., Довгаль В.М., Белослюдов А.В., Невзорова М.В.; правообладатель ГОУ ВПО «Курск. гос. техн. ун-т» (RU). №2006613749; заявл. 07.11.06; зарег. 09.01.07.

9. Программный продукт для диалоговых процедур классификации на основе метода проецирования [Текст]: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006612765 / Ильин С.И., Довгаль В.М., Белослюдов А.В., Невзорова М.В.; правообладатель ГОУ ВПО «Курск. гос. техн. ун-т» (RU). №2006612117; заявл. 22.06.06; зарег. 04.08.06.

Соискатель

С.И. Ильин

ИД № 06430 от 10.12.01 г.

Подписано в печать 09 октября 2007 г. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 37

Курский государственный технический университет.
Издательско-полиграфический центр Курского государственного технического университета
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.