На правах рукописи

АЛДОНИН
Геннадий Михайлович

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

05.11.13 –Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск – 2007

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» Политехнический институт

Научный консультант заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор **Шайдуров Георгий Яковлевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Шелупанов Александр Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор **Кашкин Валентин Борисович**

доктор технических наук, **Кравченко Святослав Анатольевич**

Ведущая организация: **Красноярский научный центр СОРАН**

Защита состоится 27 сентября 2007 г. в 14 часов в аудитории Г4-17 на заседании диссертационного совета Д 212.098.03 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» Политехнический институт по адресу: г. Красноярск, ул. академика Киренского, 26.

Тел. (3912) 912194, факс (3912) 91-21-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке политехнического института ФГОУ ВПО СФУ.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, с подписью составителя, заверенный печатью организации просим выслать в адрес совета.

Автореферат разослан 10 августа 2007 г. и выставлен на сайте СФУ http://www.sfu.kras.ru/scince/

Учёный секретарь
диссертационного совета Вейсов Е. А.

Общая характеристика работы

Актуальность. Актуальность развития основ метрологии и техники структурного анализа живых и технических систем состоит в том, что существенное значение имеет информация о структурной организации систем и процессов, так как целое обладает иными свойствами, нежели его части, чему до сих пор уделяется недостаточное внимание.

Отечественная школа нелинейных колебаний и волн, основоположником которой по праву считается Л. И. Мандельштам, рассматривает общую теорию структур в неравновесных средах как естественное развитие и обобщение на распределенные системы идей и подходов классической теории нелинейных колебаний. Следуя Р. В. Хохлову, возникновение волн и структур, вызванное потерей устойчивости однородного равновесного состояния, называют автоволновыми процессами (по аналогии с автоколебаниями). На первый план здесь выступает волновой характер образования структур: независимость их характерных пространственных и временных размеров от начальных условий, а в некоторых случаях – от краевых условий и геометрических размеров системы.

Для характеристики некоторых нестационарных процессов, в частности турбулентности, А. Н. Колмогоров предложил показатель $C(t, t-\tau)$, названный в последствии А. М. Обуховым *структурной функцией*. Раздел теории случайных процессов на базе исследования структурных функций назвали *структурным анализом*.

Для адекватного описания процессов и явлений необходимо знание их существенных признаков и выявление в наблюдаемом процессе *структурно-устойчивых* элементов (*термин предложен фр. математиком Рене Томом*). Метрологическое качество приборов обеспечивается устойчивостью их характеристик работоспособности и стабильностью качества изделий, т. е. структурной устойчивостью или *робастностью* изделий в производстве и при функционировании (по Андронову – *грубостью* системы).

Определенная общность исследования структурной устойчивости живых и технических систем заключается в необходимости анализа в них хаотических явлений. Информационные массивы подвержены действию различных факторов, помех и возмущений, а средства извлечения и обработки информации в серийном производстве имеют разброс характеристик работоспособности из-за нестабильности технологии.

Анализ хаотических явлений предмет исследования созданной в 70-х годах И. Р. Пригожиным теории самоорганизации и синергетики Г. Хакена, которые радикальным образом изменили представления ученых о физическом мире и явились мощным толчком к развитию многих научных направлений практически во всех сферах человеческих знаний. Теория самоорганизации, как неравновесная термодинамика, являясь фундаментальной теорией анализа открытых систем, в определенном смысле является теорией структурообразования. Универсальность теории определяется ее применимостью для анализа микро- и макроструктур в живых и технических системах.

Объектом исследования в диссертации являются процессы и системы с детерминированным хаосом в медицине, радиотехнике и микроэлектронике.

Предмет исследования – теоретический и прикладной аппарат структурного анализа живых и синтеза технических средств.

Целью исследований является:

1. Разработка теоретико-прикладных основ структурного анализа живых и технических систем.

2. Разработка критериев и моделей более достоверного описания живых систем, алгоритмического и программно-технического обеспечения технологий мониторинга состояния здоровья населения.

3. Разработка методов оценки устойчивости приборов в массовом производстве и робастности при функционировании.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Определяются метрологические основы анализа структурообразования, критерии структурной устойчивости самоорганизующихся систем.

2. Исследуются динамические модели гомеостаза на основе синергетической концепции и разрабатываются методы и средства структурного анализа функционального состояния организма (ФСО).

3. Разрабатываются алгоритмы и аппаратно-программные средства для мониторинга ФСО и методики исследований ФСО на основе положений теории самоорганизации.

4. Исследуются и разрабатываются методы анализа и синтеза серийно-устойчивых в производстве микроэлектронных конструкций приборов.

Методы исследования. Поставленные задачи решались на базе концептуальной системы структурного анализа и синтеза самоорганизующихся процессов и систем методами теоретических и экспериментальных исследований.

Структурный анализ в диссертации исходит из следующих положений теории самоорганизации: *динамическое* описание системы основано на колебательном взаимодействии связанных элементов системы при конденсации открытых систем в структуры; *статическое* описание определяет структурную устойчивость (конденсированность систем) параметрами фазового пространства и характеристическими потенциалами системы.

Широкий круг физиологических процессов и технических систем, представленных аналитическими, статистическими и синергетическими моделями, подвергался экспериментальным исследованиям, в том числе на авторских аппаратных средствах и на основе компьютерных технологий моделирования.

Большой объём и разнохарактерность экспериментов потребовали применения известных и разработки новых методов, методик и аппаратных средств и компьютерных программ анализа, которые изложены в работе.

Научная новизна

1. Впервые определены метрологические основы оценки функционального состояния организма (ФСО), критерии структурной устойчивости гомеостаза как самоорганизующейся системы ССНО и разработаны новые компьютерные технологии и аппаратно-программные комплексы (АПК) мониторинга с использованием структурного анализа ФСО.

2. Впервые разработаны методики оценки структурной организации биосистем на основе фрактальных размерностей скелетонов вейвлет-диаграмм и солитонных моделей биосигналов.

3. Впервые сформулирована концептуальная система динамического и статического анализа структурной устойчивости систем на основе теории самоорганизации и представлена динамическая модель самоорганизации хаотических систем как ансамбля слабосвязанных нелинейных осцилляторов (ССНО) в виде n-мерного тора.

4. Впервые сформулирована статическая модель серийной совокупности микроэлектронных устройств как «больших» хаотических систем (БХС) и разрабо-

тана метрологическая основа оценки оптимальности их синтеза с помощью характеристических потенциалов и специальной функции штрафа.

Научная новизна подтверждается патентом РФ и четырьмя авторскими свидетельствами на изобретение.

Значение для теории. Полученные результаты дают общую теоретико-прикладную основу анализа структурно-устойчивых процессов и систем на основе положений теории самоорганизации и синтеза серийно-устойчивых микроэлектронных конструкций.

Практическая значимость. Разработанные методы структурного анализа самоорганизующихся процессов и систем, позволяют получить метрологическую основу объективного и достоверного описания и оценки сложных биологических и технических систем, определить пути оптимального синтеза структурно-устойчивых систем извлечения и обработки информации. Технические средства, разработанные на основе предложенных теоретических положений, позволяют существенно повысить эффективность анализа и оценки их состояния.

Результаты исследований, проведенных в работе, использованы в ряде НИОКР, в том числе: НИР №10ТД «Разработка микроэлектронной системы измерения, статистической обработки и графической регистрации интервалов сердечных сокращений», заказчик Красноярский государственный медицинский институт совместно с Московским авиационным технологическим институтом, 1980 г., г. Москва, НИР «Комплект-6» «Исследование и разработка методов обеспечения безотказности и долговечности РЭА длительного функционирования» (тема 307), заказчик предприятие Г-4805, 1980 г., г. Железногорск, НИР «Комплект-7» «Исследование и разработка системы обработки данных контроля и измерения», (тема № 308), 1983 г., заказчик НПО ПМ, г. Железногорск, НИР «Разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для выявления латентных форм патологии состояния здоровья», грант Красноярского краевого фонда науки (ККФН), 1993 г., НИР «АПК на базе МКМ-03», заказчик КГМА, каф. функциональной диагностики, 1996 г.; НИР «Аппаратно-программный комплекс донозологической диагностики», грант ККФН, 1997 г., НИОКР «Аппаратно-программный комплекс для диагностики состояния здоровья», заказчик Пермская ГМА,1999 г., НИР «Робастность в природе и технике», грант ККФН №9F162, Красноярск, 2000 г., «АПК для контроля состояния здоровья», заказчик Медико-физический центр КГУ, Красноярск, 2001 г, НИОКР «АПК для контроля состояния здоровья при сеансах психотерапии на базе омега-тестера ОТ-01, заказчик Медико-физический центр КГУ, Красноярск, 2002 г., НИР «Разработка методов и аппаратно-программных средств диагностики и коррекции функционального состояния организма», заказчик МИРЭА, 2004 г., г. Москва, НИОКР «Разработка и изготовление прибора для динамической регистрации омега-потенциала головного мозга», заказчик «Школа космонавтики» г. Железногорск, 2006 г., грант ККФН 4PL38 «Теория самоорганизации и структурная устойчивость систем и процессов», 2007 г. и др.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе радиотехнического факультета СФУ в лекциях, лабораторных работах и практических занятиях по дисциплинам «Конструирование и микроминиатюризация РЭА», «Конструирование измерительных приборов», «Основы художественного конструирования и эргономики РЭС».

Достоверность полученных результатов, рекомендаций и выводов, содержащихся в диссертации, подтверждается корректным использованием физических концепций, известных теорий, проверенных аппаратных и компьютерных средств

обработки экспериментальных данных, сопоставлением выполненных исследований с имеющимися результатами в данной области, представительностью полученного статистического материала, совпадением теоретических и экспериментальных данных, результатами многолетней эксплуатации АПК, разработанных при участии автора.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 16 Всесоюзных и Всероссийских и 15 международных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: Всесоюзном совещании «Пути повышения стабильности, качества и надежности цифровых измерительных приборов», М., май 1977 г.; Всесоюзном научно-техническом семинаре «Методы и аппаратура для применения сдвига фаз и частоты сигналов», Красноярск, 1979 г.; Всесоюзной научно-технической конференции по технологии и конструированию микроэлектронных устройств, НТО Приборпром им. С.И.Вавилова, М., 1980 г.; I-ой международной конференции «Проблемы ноосферы и устойчивого развития», Санкт-Петербург, СПб Университет, 1996 г.; Международной конференции «Биоэкстрасенсорика и научные основы культуры здоровья», Москва, 1996 г.; Международной конференции и выставке «Спутниковые системы связи и навигации», Красноярск, КГТУ, 1997 г.; VIII Всероссийском симпозиуме с международным участием «Гомеостаз и окружающая среда», Красноярск, КНЦ СО РАН, 1997 г.; 3-й Всероссийской конференции «Проблемы информатизации региона», Красноярск, ВЦ СО РАН, 1997 г.; 1-го Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем – 98», Красноярск, 1998 г.; Международного семинара Design und Marketing in West-und Osteuropa Ost-West Wissenshaftszentrum Gesamthoshschule, . Кассель, ФРГ, 1999 г.; Всероссийских конференциях «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.; 2-м и 3-м международном симпозиуме «Электроника в медицине: Мониторинг, диагностика, терапия», СПб, ЛГУАП, 2000, 2002 гг.; 1-й, 2-й и 3-й Международной научно-практической конференции и выставки Сибирского Авиакосмического салона “САКС-2001-2” Красноярск, 2001, 2002, 2004, 2006 гг.; 1X международном симпозиуме «Гомеостаз и экстремальные состояния организма», Красноярск, май, 2003 г.; 1X международной конференции «MathTools-2003», С.Петербург, 2003 г.; Международной конференции «110 лет Радио», С.Петербург, 2005 г.; Международных конференциях «Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий», Сочи, 2001,2002,2003, 2004, 2005, 2006 гг.; Межрегиональной научно-практической конференции «Инновационное развитие регионов Сибири», Красноярск, 2006 г.

Публикации. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 118 печатных работах, из них 3 монографии, 3 учебных пособия, 1 свидетельство регистрации программы для ЭВМ, 1 патент РФ и 4 авторских свидетельства на изобретения, 12 – в сборниках научных трудов, 94 – в материалах конференций и семинаров.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 267 страниц основного текста, включая 123 рисунка, список литературы из 150 наименований.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методы структурного анализа на основе индексов эффективности (ИЭ) коррекции ФСО, лабильности (ИЛ) ФСО, методика повышения достоверности контроля ФСО при мониторинге и солитонные модели для анализа биосигналов.

2. Динамическая модель структурной самоорганизации хаотических систем как ансамбля слабосвязанных нелинейных осцилляторов (ССНО) в виде *n*-мерного тора и критерий структурной устойчивости систем – фрактальную самоорганизацию с самоподобием вида *1/f*.

3. Модель регуляторных циклов гомеостаза как самоорганизующейся системы ССНО, оценка функционального состояния организма (ФСО) на основе определения коэффициента самоподобия (скейлинга) параметров ФСО и фрактальных размерностей скелетонов их вейвлет-диаграмм.

4. Концепция построения аппаратно-программных средств анализа биосигналов и биосистем для компьютерных технологий полифункционального мониторинга ФСО.

5. Статическая модель большой хаотической системы (БХС) серийной совокупности микроэлектронных устройств (МЭУ), методы оптимизации БХС по критерию нормального закона распределения выходных параметров и оценка структурной устойчивости МЭУ в массовом производстве с помощью характеристических потенциалов и специальной функции штрафа.

Содержание работы

Введение посвящено актуальности выбранной темы, предыстории исследований и вкладу, сделанному зарубежными, советскими и российскими исследователями по различным прикладным аспектам теории самоорганизации, формулировке объекта, предмета и цели исследований, научной новизны и защищаемых положений.

Структурный анализ в диссертации строится исходя из следующих постулатов теории самоорганизации: *Динамическое* описание системы основано на колебательном взаимодействии связанных элементов системы при конденсации открытых систем в структуры. *Статическое* описание определяет структурную устойчивость (конденсированность систем) параметрами фазового пространства и характеристическими потенциалами системы.

В **первой главе** рассматривается концепция динамического структурного анализа процессов с детерминированным хаосом, основанная на базовых теоремах и понятиях теории самоорганизации, приведенных на рис. 1. Появившиеся в разное время они решали частные задачи. Совместное рассмотрение базовых моделей, позволяет перейти от феноменологического представления механизма формирования самоподобных фрактальных природных структур и определить критерий их структурной устойчивости.

Свойства структур могут быть изучены методами динамики, а некоторые свойства динамических систем можно определить структурными методами. Общим для открытых систем, обладающих хаотическим поведением, является иерархия цикличностей в их эволюции, в виде системы слабосвязанных нелинейных осцилляторов (ССНО), формирующих структуры, связи между которыми можно представить моделью «кубической решетки» Ферми-Пасты-Улама (ФПУ). Т. н. модель «возврата» ФПУ показывает, что любые возмущения системы вопреки гипотезе Дебая о равнораспределении энергии по степеням свободы переходят в набор *автомодельных (самоподобных)* «разрешенных» состояний, мод определяющих порядок системы. В открытых нелинейных системах возникает упорядоченность или *самоорганизация* за счет диссипации, т. е. перехода свободной энергии в энергию связей структуры.

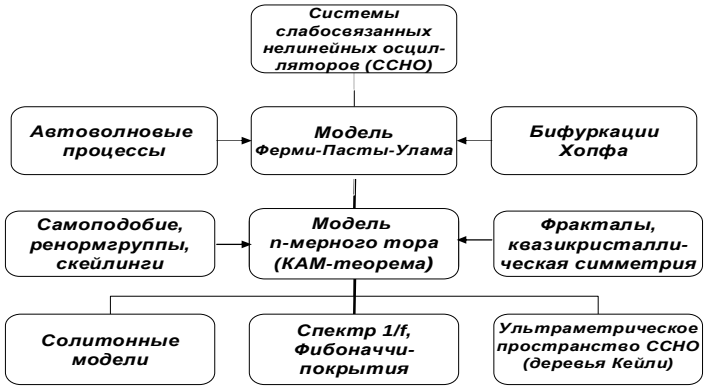


Рис. 1. Динамический структурный анализ процессов с детерминированным хаосом

Хаотическое поведение в области сепаратрис – свойство нелинейных осцилляторов. При возмущении переход к хаосу сопровождается последовательностью пространственных бифуркаций, и среди них, в соответствии с теорией универсальности Фейгенбаума, возможно развитие фрактальных структур, обладающих *масштабно-*

инвариантным самоподобием. При фрактальном подходе хаос перестает быть синонимом беспорядка и обретает тонкую структуру самоподобного множества *фракталов* или *странного аттрактора*.

Процессы и системы с самоподобной фрактальной структурой, исследуются с позиций *ренормгруппового* анализа [32]. Аттрактор Фейгенбаума в бифуркациях удвоения периода положил начало новому направлению в динамике, называемому *ренормализацией*. Сама процедура ренормализации или *универсального масштабирования* (universal scaling), возникла в физике (перенормируемые, калибровочные теории) и обработке сигналов (теория вейвлетов), позволяет выяснить когда и при каких условиях рассматриваемая теория обладает свойством *универсальности* анализа микро- и макроструктур.

Вторая глава посвящена разработке и анализу моделей самоорганизации ССНО. Впервые решение вопроса об устойчивости систем было дано теорией Колмогорова–Арнольда–Мозера (КАМ–теорема). КАМ-теорема объясняет механизмы и условия формирования фрактальных структур на основе *n*-мерного тора по принципу масштабно–инвариантного самоподобия. Квазипериодическое движение с несоизмеримыми частотами на торе при добавлении нелинейного возмущения в результате бифуркаций Хопфа становится «складчатым» (рис. 2).

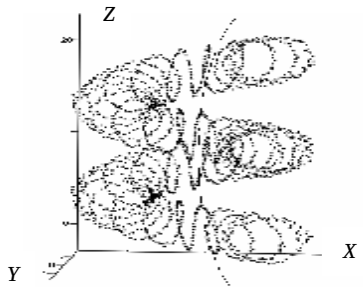


Рис. 2. Квазипериодическое движение с несоизмеримыми частотами на торе

Если отношение частот равно рациональному числу, возникает резонанс, если иррациональному числу – траектория не замыкается. С течением времени она будет сколь угодно близко подходить к любой точке фазового пространства. Наилучшим в этом смысле будет иррациональное отношение частот мод, называемое числом вращения *w*, в виде так называемого «*золотого сечения*», генерирующего ряд Фибоначчи и отражает перераспределение внешней энергии по степеням свободы системы в соотношении цепной дроби

$$w^* = \frac{1}{1+\frac{1}{\ldots}} \text{ или } w^* = \left(\sqrt{5}-1\right)\Big/2 = 0.6180339\ldots. \qquad (1)$$

Ряд Фибоначчи является фундаментальным масштабным законом самоподобия (скейлингом) структурно-устойчивых систем в природе, где правило гармонии является условием самоорганизации, объясняет связь спектров типа *1/f* с гармонической самоорганизацией.

Согласно модели самоорганизации на основе *n*-мерного тора и теореме Колмогорова-Арнольда-Мозера определим модель ССНО как траекторию и спектр осцилляторов, отношения частот которых соответствуют ряду Фибоначчи. На рис. 3

приведен расчет для системы осцилляторов с помощью пакета MathCad:

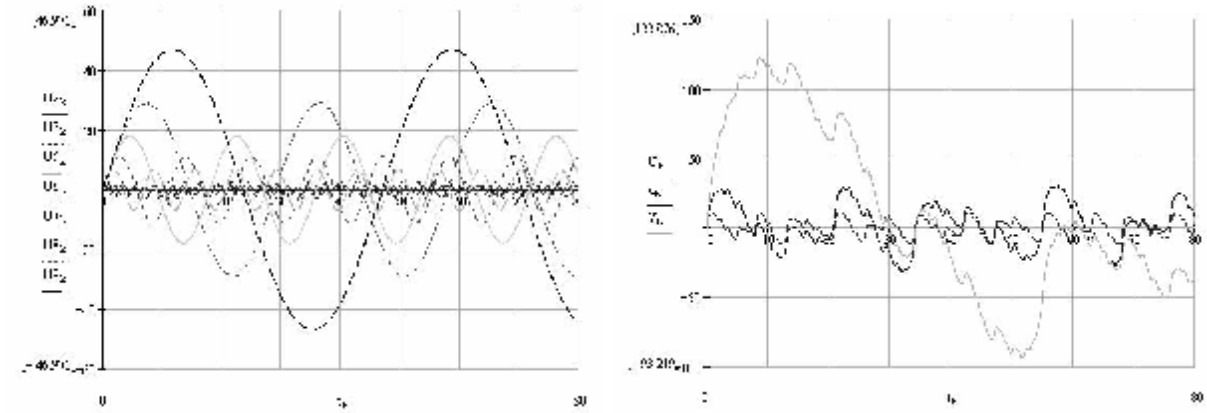
$$F = F_0(t) + \sum_{i=0}^{n} F_i(t), \quad i=1,\dots,n, \tag{2}$$

где $F_0(t) = Ae^{j(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)}$ – начальная функция без возмущений,

$F_i(t)$ – функция, в которой амплитуда, фаза и частота изменяются в иррациональном соотношении «золотого сечения» по отношению к начальной функции (рис. 3, *а*):

$$F_i(t) = 0,618 A_{i+1} e^{j(1,618\omega_{i+1} \cdot t + 0,618\varphi_{i+1})} \tag{3}$$

Сумма таких цикличностей образует солитоны, переносящие энергию колебаний в низкочастотную область (рис. 3, *б)*, формируя по мере возрастания размерности тора спектр вида *1/f* (рис. 4*)*. Суммирование осцилляторов показывает формирование одиночных волн (солитонов), которые переносят энергию колебаний в низкочастотный спектр.



а *б*

Рис. 3. Формирование солитонов (*б*) в системе связанных осцилляторов (*а*)

Спектр такой системы будет:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{n} A_i e^{-\frac{(f_i - f)^2}{2k^2}}. \tag{4}$$

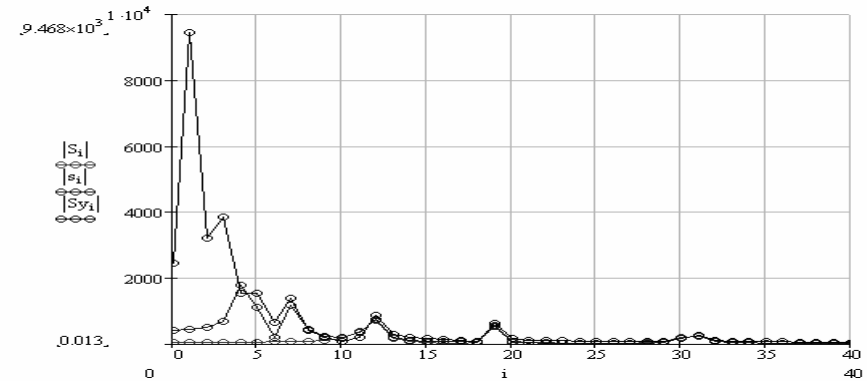
Здесь $A_0 = 1, \quad f_0 = 1, \quad i = 1,\dots,n; \; A_i = 0,618 A_{i-1}; \; f_i = 0,618 f_{i-1}$.

Формирование спектральной характеристики вида *1/f* происходит за счет перераспределения энергии в спектре связанных осцилляторов в сторону низкочастотных мод по мере увеличения количества осцилляторов, как было показано М. Крускалом и Н. Забуским, доказавшим, что равнораспределению энергии в модели возврата ФПУ препятствует солитон, переносящий энергию из одной группы мод в другую. Такой подход позволяет перейти от существующего в настоящее время

феноменологического описания формирование спектральной характеристики вида *1/f* к физико-математическим моделям при анализе процессов и систем с самоорганизацией.

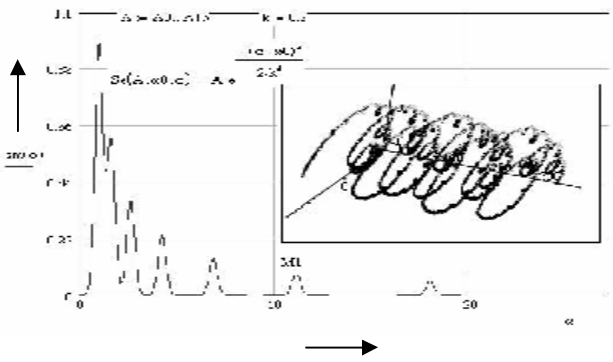
Для статистической модели шума *1/f* представим параметры его мод нормально распределенными, т. е. $A_i = A_i + \Delta A_i$ и $f_i = f + \Delta f_i$, где ΔA_i и Δf_i – случайные возмущения амплитуд и частот спектральных составляющих, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ_{A_i} и σ_{f_i}. В зависимости от коэффициента связи *k* также происходит формирование спектральной характеристики вида *1/f* за счет перераспределения энергии в спектре связанных осцилляторов в сторону низкочастотных мод (рис. 5).

При увеличении дисперсии распределений мод шума *1/f* до критических значений происходит структурная перестройка системы осцилляторов. Под действием возмущений реальные ССНО приобретают мультифрактальную структуру (рис. 6).



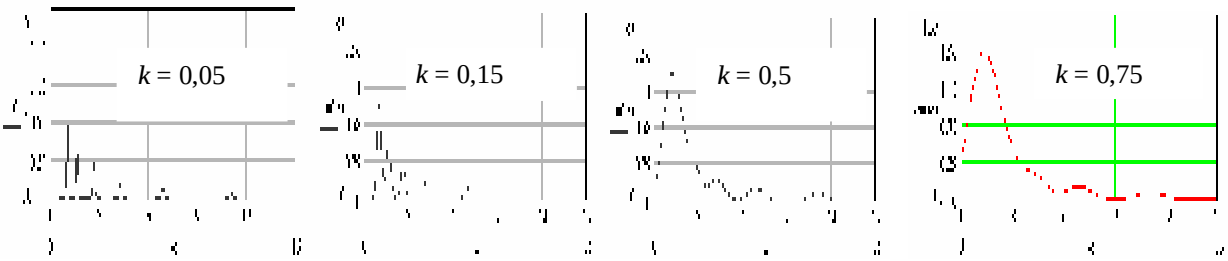
S_i g 10^3	f_i, Гц	S_i g f_i
9,47	1,618	15,32
3,21	2,618	8,40
3,84	3,236	12,42
1,53	6,853	10,48
0,87	11,09	9,64
0,64	17,94	11,48
0,21	29,03	6,096

Рис. 4. Перераспределение энергии в сторону НЧ-мод в спектре ССНО



S_i	f_i	S_i g f_i
0,947	1,618	1,53
0,59	2,618	1,54
0,40	3,236	1,29
0,23	5.235	1,20
0,15	6,853	1,03
0,09	11,09	1,0
0,06	17,94	1,08
		M=1,24
		S =0,16

а

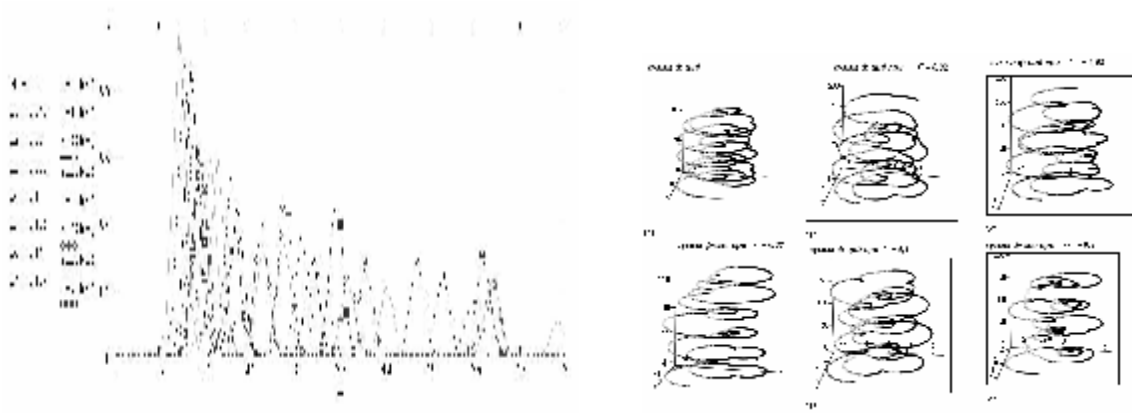


б

Рис. 5. Спектр ССНО (*а)* и механизм формирования спектральной характеристики вида *1/f (б)*, в зависимости от коэффициента связи *k*

Полученный на рис. 4 спектр из-за отсутствия возмущений не в полной мере соответствует виду *1/f*, критерием которого является постоянство S_ig f_i. Формирование спектральной характеристики вида *1/f* происходит за счет перераспределения энергии в спектре связанных осцилляторов в сторону низкочастотных мод также в зависимости от коэффициента связи *k*

При значении s = 0,02 обеспечивается высокое согласие с условием S_ig f_i = *const* для спектральной характеристики ССНО вида *1/f* (рис. 5, *а*) .



а *б*

Рис. 6. Формирование мультифрактальной спектральной характеристики спектра (*а)* и траекторий *(б)* ССНО при разных значениях возмущений *s*

В представленной модели необходимо учесть характерные для открытых систем инфранизкочастотные влияния. Для этого в модели необходимо «мультиплицирование» ряда Фибоначчи, что описывает гармоническое развитие сложной системы, при котором происходят перестройка и упорядочение. ЗС не нарушится при умножении всех членов пропорционального ряда на произвольные числа 1< *A* < 1.618 (рис. 7). Возникающее в результате этого множество точек полностью покрывает весь сплошной спектр *1/f*.

$$S(f) = \frac{\alpha}{\beta + f^n} \tag{5}$$

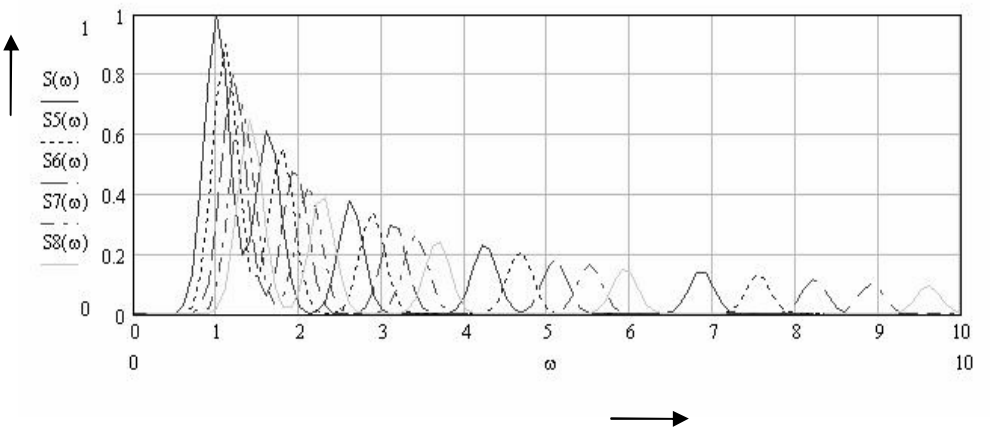


Рис. 7. Формирование спектральной характеристики вида *1/f*

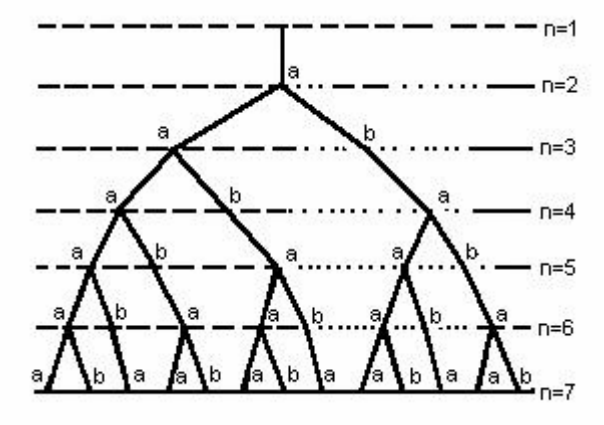


Рис. 8. Ультраметрическое пространство, отображаемое деревом Кейли

Модель «кубической решетки» Ферми-Пасты-Улама и КАМ-теорема определяют динамическую фрактальную квазикристаллическую структуру взаимодействия в ССНО.

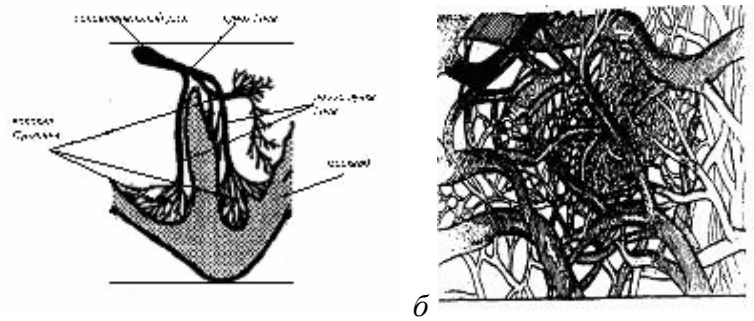
Процедура построения фрактального множества может быть представлена геометрическим образом в виде *иерархического дерева Кейли*, что позволяет каждому элементу фрактального множества сопоставить точку ультраметрического пространства (рис. 8).

Третья глава рассматривает теорию самоорганизации как фундаментальную основу анализа природных процессов и систем жизнедеятельности, где критерием нормы является структурная устойчивость на всех уровнях иерархии биосистем. Такой подход позволяет перейти от феноменологического описания явлений к четким физико-математическим моделям при анализе процессов и систем с самоорганизацией в биоструктурах, где критерием нормы является структурная устойчивость на всех уровнях иерархии биосистем.

Особенно отчетливо фрактальные свойства выражены в топологии проводящей нервной системы сердца (рис. 9, *а*) и «систем коммуникации» организма – кровеносных сосудов и капилляров (рис. 9, *б*), которые могут расцениваться как модель сопряжения биологических хаотических процессов, в хаотической синхронизации бронхов, лимфососудов, желчных протоков, а также в нервной системе. Целям увеличения функциональной надежности сердца в условиях перегрузок служит также фракталоподобная структура его соединительных сухожилий, некоторых мышечных волокон и, в наибольшей степени, фрактальная система его электрических коммуникаций.

Герман Гельмгольц, занимаясь исследованиями в области физиологии и гидродинамики, установил автоволновый характер прохождения нервного импульса по нейронным сетям и пульсовой волны по сосудистому руслу, что явилось одним из применений солитонов к описанию формы и скорости распространения нервного импульса и пульсовой волны.

Солитоны, как естественный структурный элемент, является удобным инструментом структурного анализа. Предложены солитонные модели процессов, которые позволяют получать адекватное описание и идентификацию состояния таких систем, как проводящей, мышечной и кровеносной систем сердца.

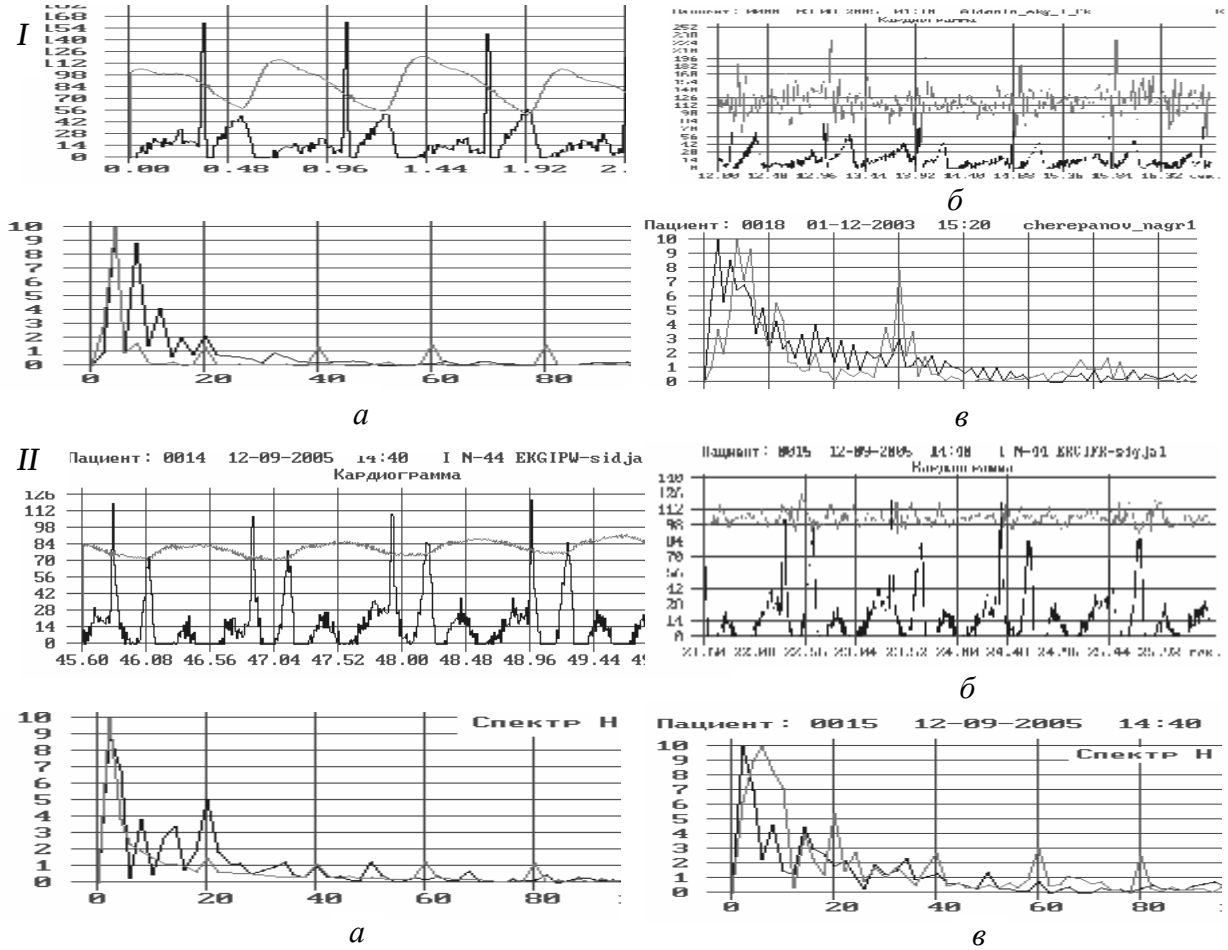


а *б*

Рис. 9. Проводящая нервная *(а)* и кровеносная *(б)* системы сердца

Для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы можно использовать информацию, содержащуюся в форме, а соответственно и в спектрах электрокардиосигналов (ЭКС), пульсовой волны (ПВ) и фонокардиосигнала (ФКС). На рис. 10 приведены экспериментальные сигналы ЭКС, ПВ *(а)*, ЭКС и ФКС *(б)* и их спектры (*в*).

ЭКС, снимаемый с электродов, отражает состояние электропроводящей системы сердца, форма ПВ – состояние кровеносной системы, а ФКС – мышечной системы сердца.



а *б* *в*

Рис. 10. Совместная запись ЭКС и ПВ *(а)*, ЭКС и ФКС *(б)* и их спектры *(в)*
I – здорового пациента и *II* – пациента с инфарктом миокарда

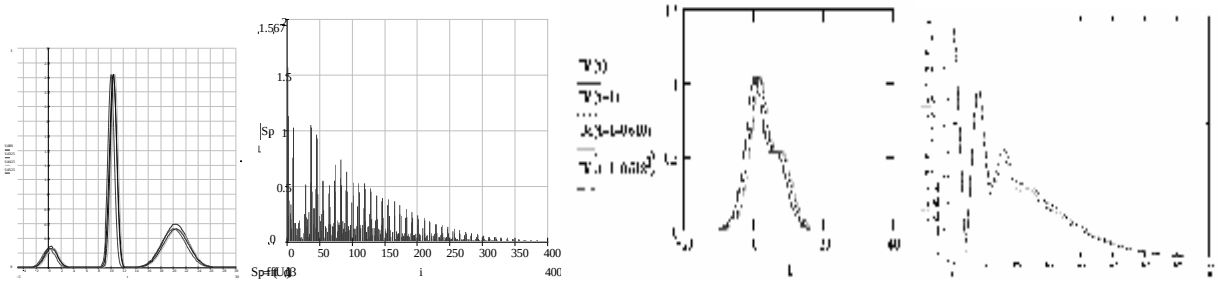
Совместное исследование формы, а, соответственно, и спектров электрокардиосигналов, пульсовой волны и фонокардиосигнала дает более полную и объективную характеристику состояния сердечно-сосудистой системы (ССС).

Спектральные характеристики сигналов определяются турбулентностью, возникающей при распространении волн возбуждения по нервному и сосудистому руслу. Это определяется морфологическим строением нервной системы сердца и сосудистой системы сердца в виде ветвящегося дерева, на этом основаны солитонные модели распространения нервного импульса по проводящей нервной системе сердца и ПВ в сосудистой сети. Одиночная волна возбуждения имеет вид

$$u(x,t) = u_0 \mathrm{ch}^{-2}[(x - ct)/\Delta], \quad u_0 = \mathrm{const}, \mathrm{ch} \equiv (e^z + e^{-z})/2, \tag{6}$$

где $c = u_0/3; \quad \Delta = (12/u_0)^{1/2}$.

Реальный ЭКС состоит из трех волн ***P, QRS*** и ***T*** разной амплитуды. Турбулентность потока будет возникать на неоднородности сечения нервного волокна при ветвлении. Спектр сигнала пульсовой волны также будет определяться турбулентностями, возникающими при распространении в потоке крови по сосудистому руслу кровеносной системы. Поскольку ветвление отрезков нервной сети и кровеносной системы соответствует ряду Фибоначчи, то по каждому сегменту сети проходит половинная часть волны с задержкой относительно предыдущего участка на время, пропорциональное знаменателю ряда Фибоначчи.



а *б*

Рис. 11. Солитонные модели и спектры ЭКС (*а*) и ПВ(*б*), рассчитанные в MathCad

Возможные патологии в сосудистой системе заключается в атеросклеротических сужений сосудов при тромбозе какой либо ветви, что вызывает изменение спектральной картины пульсовой волны. Смоделировать эти явления можно либо при изменении интервала между импульсами, либо исключением соответствующего импульса из суммы. Таким образом, меняя параметры модели можно моделировать патологии нервных проводящих путей и сосудистой системы кровотока. Модели ЭКС и ПВ в виде цепочки задержанных относительно друг друга солитонов в проводящей и сосудистой сети и их спектры представлены на рис. 11, *а–б*.

Отклонению определенных функций организма, как правило, предшествуют скрытые изменения, находящиеся в пределах их ритмической структуры. В малой степени десинхроноз в биосистемах присутствует постоянно в виде детерминированного хаоса. Для каждого биологического осциллятора фаза в некоторых пределах «блуждает». Такой стохастический колебательный режим является функцио-

нальной нормой, что обеспечивает оптимальные условия адаптации организма к внешней среде. Ритмическая структура пульса, связанная с различными функциями и процессами организма, несет в себе ценную информацию о состоянии организма в целом и отдельных его систем.

В синергетическом подходе человеческий организм правомерно представить как открытую диссипативную систему с внутренним трением, а гомеостаз как систему слабосвязанных нелинейных эндогенных осцилляторов, взаимодействующих с экзогенными циклами окружающей среды. Многоуровневая иерархическая регуляторная система с циклами разной периодичности эволюционно согласована с экзогенными факторами и обеспечивает равновесие организма с экосферой в рамках естественных циклов.

Нелинейная динамика ССНО в области сепаратрис может быть представлена моделью *n*-мерного тора. Кардиоритм (КР) в норме процесс в виде фрактальной динамической структуры с самоподобием квазикристаллического типа. Для диагностики состояния системы важно установить ее определяющие параметры. С позиций синергетики признаками самоорганизации являются:

1) фрактальная структура квазикристаллического типа;
2) масштабно-инвариантное самоподобие (скейлинг);
3) спектр вида $1/f^{\beta}$.

Критерием устойчивости такой динамической системы является отсутствие конфликтов эндогенных циклов. Естественно предположить, что для здорового организма должно существовать определенное гармоническое равновесие между ритмами разной периодичности при гомеостазе, т. е. наличие определенного скейлинга и его вырождение при патологиях.

Приведенная на рис. 3–5 модель ССНО хорошо согласуется с экспериментальными данными для кардиоритма. При возникновении и развитии патологий сердечно-сосудистой системы аттрактор вариаций частоты сердечных сокращений в той или иной мере утрачивает фрактальную топологию.

Оценка ренормализационной инвариантности в спектрах кардиоинтервалограмм показывает наличие скейлинга соответствующего ряду Фибоначчи. Более наглядно проявляется гармонизация спектра при при многочасовых записях КИГ (рис. 12). Выявление частот, в котором укладываются равные величины энергии, показывает достаточное согласие с параметрическими рядами, типа Фибоначчи-последовательности, что, в общем-то, подтверждает наличие фрактальной структуры спектра, т. е. определенную самоорганизацию в кардиоритме. Это также свидетельствует об изоморфизме самоорганизующихся пространственных и динамических структур, т. е. о пространственно-временной симметрии.

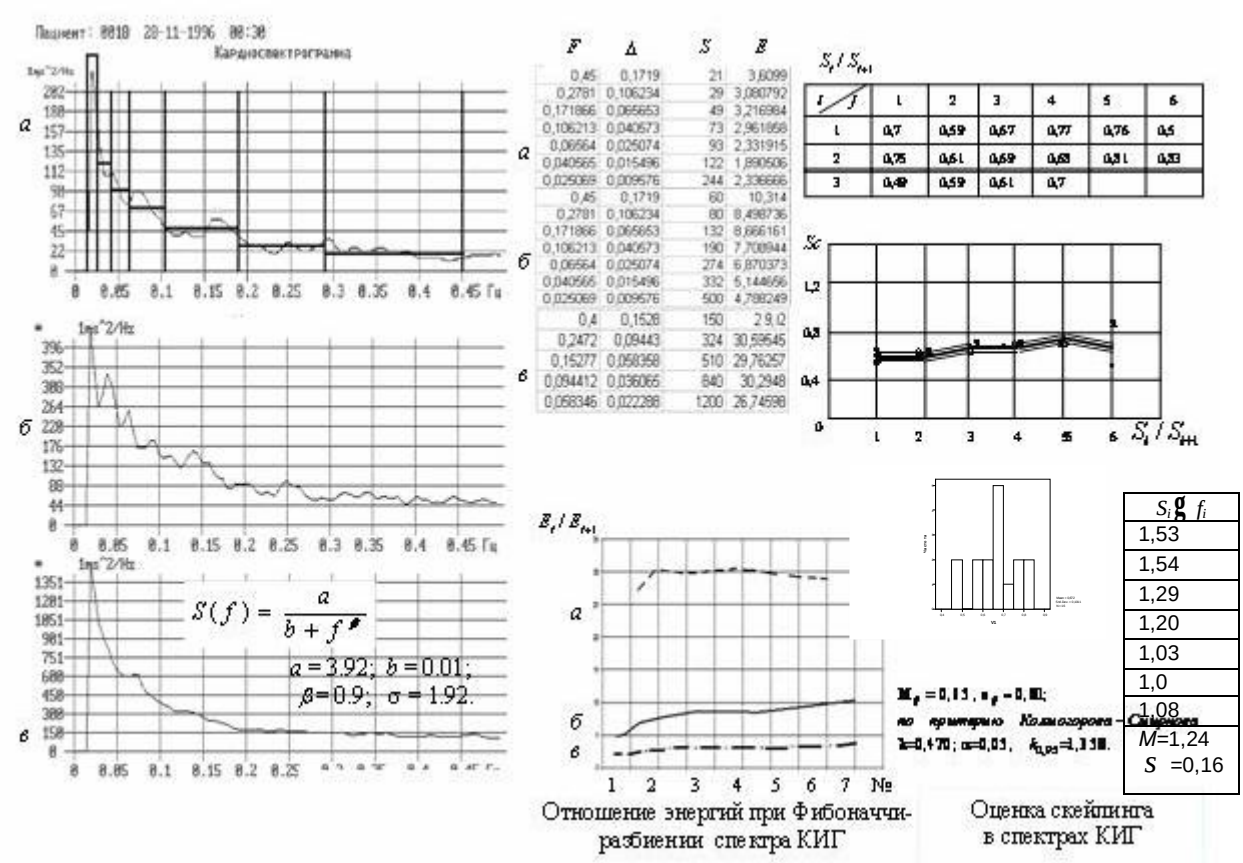


Рис. 12. Оценка ренормализационной инвариантности в спектрах КИГ:
а – 10-часовая запись; *б* – 4-часовая запись; *в* – 3-часовая запись

Особую важность приобретает вопрос об информационном взаимодействии биосистем с экосферой. Существует явное и неявное биоэнергетическое взаимодействие организма с экосферой и социумом.

К *явным* следует отнести информационное взаимодействие биосистем с экосферой. Самоподобие среды обитания является одним из обязательных условий экологической нормы, а эволюционное формирование самоподобных биологических паттернов обусловлено, наряду с прочими факторами, фрактальностью внешней среды и экологической ролью слабых стохастических сверхнизкочастотных вариаций внешних параметров. Например, в вариациях напряженности невозмущенного геомагнитного поля всегда присутствует флуктуационная компонента, спектр которой имеет вид $1/f^{b}$.

Также как одно из наиболее древних интуитивно найденных средств восстановления внешней фрактальности может рассматриваться искусство. В частности, обнаружено, что вариациии силы и высоты звучания классической и народной музыки демонстрируют отчетливо выраженное самоподобие. Существенным компонентом музыкального воздействия является гармония, т. е. гармоническая структурная организация музыки как динамического квазикристалла, что характерно также для всех произведений искусства и архитектуры, что говорит о изоморфности их структурной организации.

Наилучшей формой воздействий в этом смысле очевидно должно быть подобие их структуры структуре музыкальных фраз.

Для проверки этой гипотезы был разработан аппаратно – программный комплекс фрактальной рефлексотерапии ФЭМС (рис 23). Биологически согласованный музыкальный сигнал, имеющий самоподобную структуру, с звуковоспроизводящего устройства через регулируемый усилитель поступает на электростимулирующие электроды различного назначения (поверхностные и внутренние), а так же на формирователь огибающей сигнала и формирователь импульсной последовательности. Сформированная импульсная последовательность поступает затем на управляемый цифровой фильтр, разбивающий поступающий сигнал на 12 частотных областей, используемых в последующем для управления устройством квантовой терапии на основе светодиодной матрицы. При этом частота этого сигнала уменьшается до требуемого значения делителем частоты. Напряжение огибающей используется также в качестве источника питания для светодиодной матрицы и модулирует интенсивность ее свечения.

Эти механизмы вполне вероятно действуют и в психотерапии и коррекции психосоматических расстройств. На рис. 14 представлены записи интегральной активности мозга при сеансах психотерапии по методу В. Н. Кожевникова, сделанные с помощью аппаратно-программного комплекса на базе рекордера МКМ-07 и омега-тестера ОТ-01. Существует прямая связь между омега-потенциалом и кардиосигналом. Эффект психотерапии отчетливо проявляется в выравнивании лево- и правополушарного омега-потенциала.

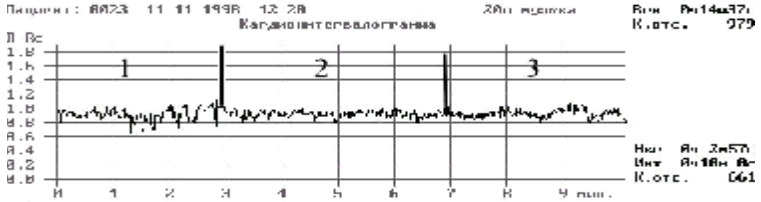


Рис. 13. Влияние музыки на кардиоритм: 1–3 – временные интервалы соответственно без музыки и при прослушивании музыкальных фрагментов различного характера

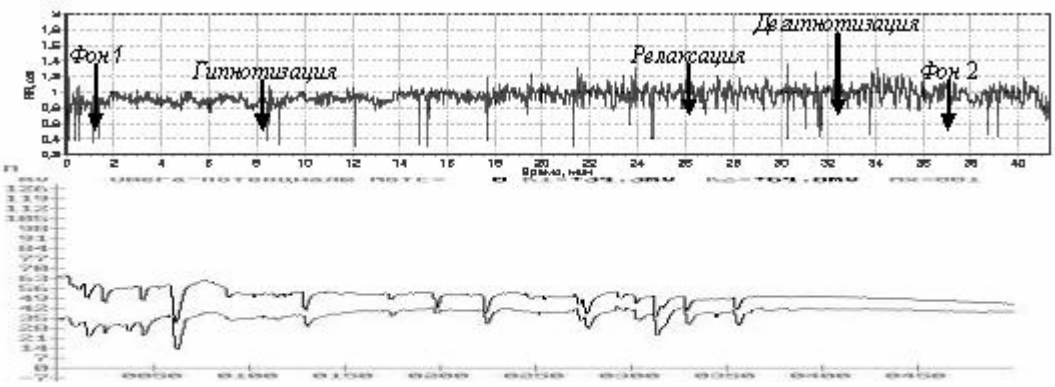


Рис. 14. Кардиоинтервалограмма и омега-потенциалы больного пациента

Неявное биоэнергетическое взаимодействие возможно при такой пространственно-временной организации структуры воздействия, модами которой являются естественные биоритмы. Такая сверхсложная биологическая система, как человек, является эволюционно сформировавшимся под действием эндогенных циклов высокоупорядоченным ансамблем сфазированных осцилляторов. Сверхчувствительность такого ансамбля к внешним флуктуациям с пространственно-временным

распределением многократно умножается в соответствии с порядком ансамбля. Это может объяснить информационное взаимодействие на низком энергетическом уровне.

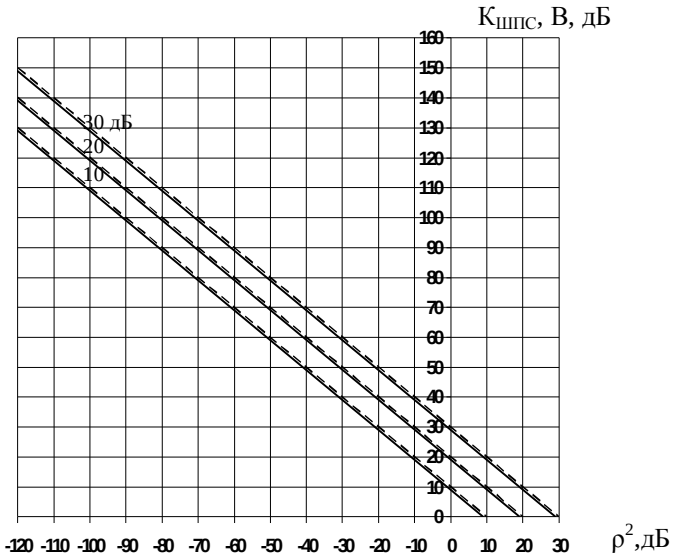


Рис. 15. Зависимость усиления *К* обработки и базы *В* от отношения сигнал-помеха

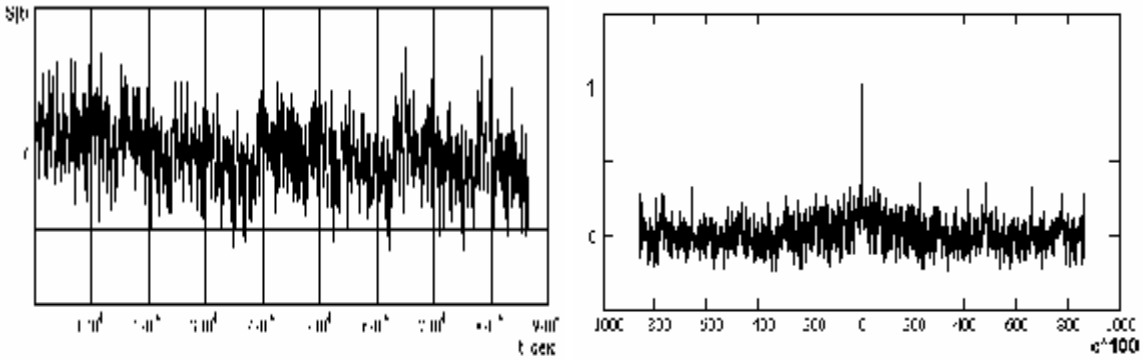


Рис. 16. Модель биоэнергетического сигнала с Фибоначчи-масштабно-инвариантной структурой частот и автокорреляционная характеристика биоэнергетического сигнала

Представляет определенный интерес как гипотеза аналогия биоэнергетического взаимодействия с системами связи с шумоподобными сигналами (ШПС), сигналы, у которых база $B = FT >> 1$, где F – ширина спектра, $\rho^2 = P_c/P_п$ – соотношение сигнал-помеха на входе приемника, а T – длительность сигнала. Для обеспечения высокой помехозащищенности нужны ШПС со сверхбольшими базами. Мощность помехи на входе приемника может на насколько порядков превышать мощность полезного сигнала. В отличие от сигналов ШПС с частотной модуляцией частотная матрица в биосистемах имеет специфический набор частот $\{F_i\}$ в виде ряда вложенных одна в другую по закону $1/f^{\beta}$ может быть представлена моделью n-мерного тора:

$$F_i = kF_{i-1}, \qquad (7)$$

где $k = (\sqrt{5} + 1)/2$.

Для таких сигналов с масштабно-инвариантной, по Фибоначчи, структурой автокорреляционная характеристика процесса, снятая для различных времен при допущении равномерной спектральной плотности мощности будет иметь вид, представленный на рис. 16.

При таком подходе появляется реальная основа моделирования феномена биоэнергетической связи в живых системах.

В **четвертой главе** рассматриваются методы описания и структурные оценки функционального состояния организма (ФСО) при мониторинге сердечно-сосудистой деятельности (ССД). Для создания аппаратно-программных средств диагностики состояния здоровья необходимы физические модели, математическое обеспечение и адекватная метрика описания процессов и явлений в биологических системах. Существующие диагностические комплексы используют либо классическую диагностику ЭКС, либо статистический анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР-диагностика).

ВСР-диагностика имеет большое значение для донозологической диагностики и анализа динамики преморбидных состояний. Однако смысл и значимость многих показателей ВСР более сложны, чем принято считать, а следовательно, существует потенциальная возможность неверных заключений и необоснованных экстраполяций.

Так как кардиоритм (КР) является нестационарным процессом, имеющим как периодические, так и непериодические составляющие, для выявления этой информации необходимы алгоритмы анализа динамики структуры кардиоритма, которые включают динамический ряд плотности распределения отражающий перестройку гомеостаза под влиянием эндогенных и экзогенных факторов в виде ваготонической и симпатотонической реакции. Нестационарность КР сильно влияет на достоверность статистических оценок ФСО, например, на оценку популярного в медицинских исследованиях индекса напряжения (ИН) регуляторных систем Р. М. Баевского, ограничивая достоверность его определения минутными интервалами наблюдения.

Для корректной оценки динамики ИН предлагается методика определения эффективного квазистационарного интервала разбиения вариационного ряда кардиоинтервалограммы (КИГ), в пределах которого мы можем найти наиболее достоверную оценку. Основным способом получения оценок параметров генеральной совокупности по данным выборки является использование процедуры МНК и нахождения «скользящих» средних.

При построении графика ИН методом «скользящего» среднего, обладающего фильтрующими свойствами, можно выявить волны напряженности функциональных систем. При этом изменение интервала усреднения не меняет картины процесса (рис. 17), т. е. его график является индивидуальной характеристикой пациента.

На рис. 18 представлены кривые дисперсии вычисления ИН при разбиении КИГ по 2-, 3-, 4-, 5-, 7-, 6-, 8- и 9-минутным интервалам в течение 30 минут.

Данные экспериментальных исследований показывают, что здесь существует оптимальный по МНК интервал разбиения КИГ, например, для первого пациента 3-минутный интервал, а для второго – 6-минутный. В определенной мере этот интервал отражает индивидуальную лабильность (функциональную подвижность) пациента, как характерный интервал функциональной перестройки организма.

Предложенная методика позволяет не только снять ограничения с интервала наблюдения, но снизить влияние артефактов на оценку ИН.

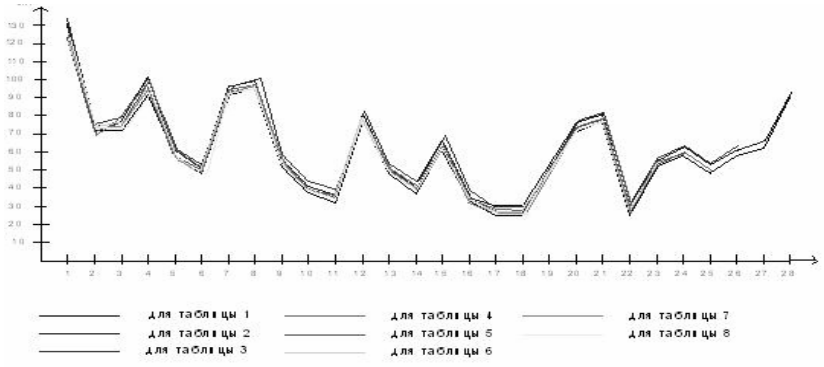


Рис. 17. График ИН при разных интервалах усреднения

Систему индексов Р. М. Баевского предлагается дополнить следующими структурными оценками. При внешних воздействиях различной природы возможна структурная перестройка кардиоритма. Лабильность или функциональная подвижность однозначно отражает индивидуальную реакцию на какое-либо воздействие и имеет важное практическое значение.

Экспериментальные исследования показывают, что характер восстановления после внешнего воздействия близок к экспоненциальной зависимости. По мере релаксации появляются и возрастают волны в кардиоритме, показывающие степень восстановления регуляторных функций.

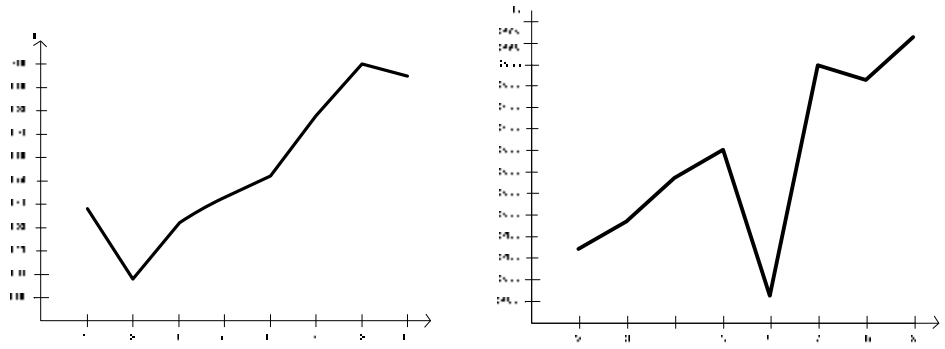


Рис. 18. Кривые дисперсии вычисления ИН

На рис. 19 приведены примеры КИГ с нагрузкой и вид аппроксимирующих экспонент, параметры которых характеризуют лабильность, и экспоненциальные аппроксимации по МНК огибающих кардиоритма после нагрузки.

Соответственно необходимо определить параметры минимальной и максимальной экспоненты, аппроксимирующие кардиоритм во время релаксации после

внешнего воздействия. Модель, отражающая процесс восстановления, задается в виде $R = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ – параметр, характеризующий степень крутизны экспоненты аппроксимирующей кривой.

Индекс лабильности (ИЛ), как отношение показателей огибающих экспонент, характеризует функциональную подвижность физиологического состояния человека:

$$ИЛ = \lambda_{макс}/\lambda_{мин} \quad (8)$$

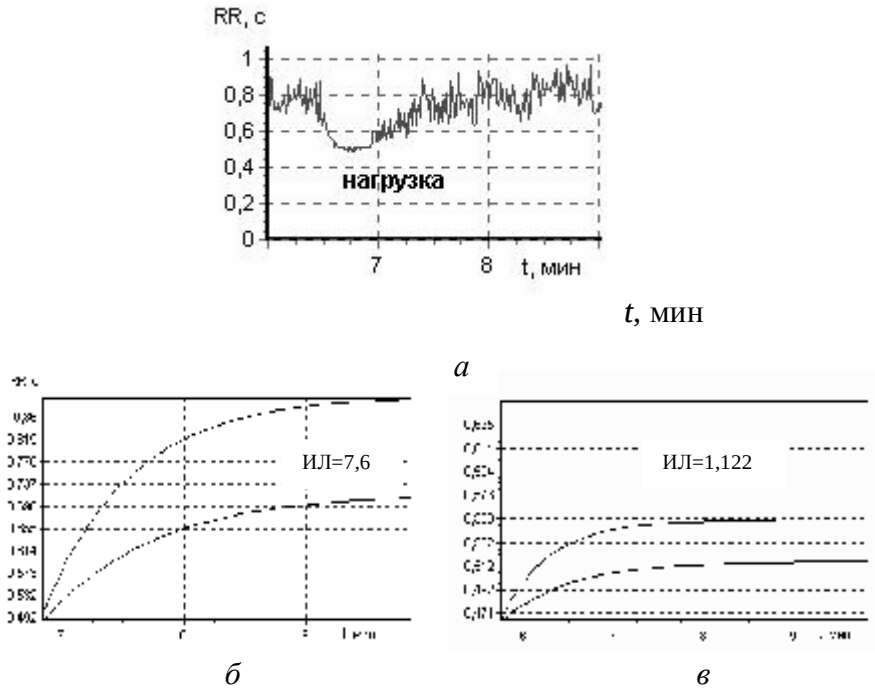
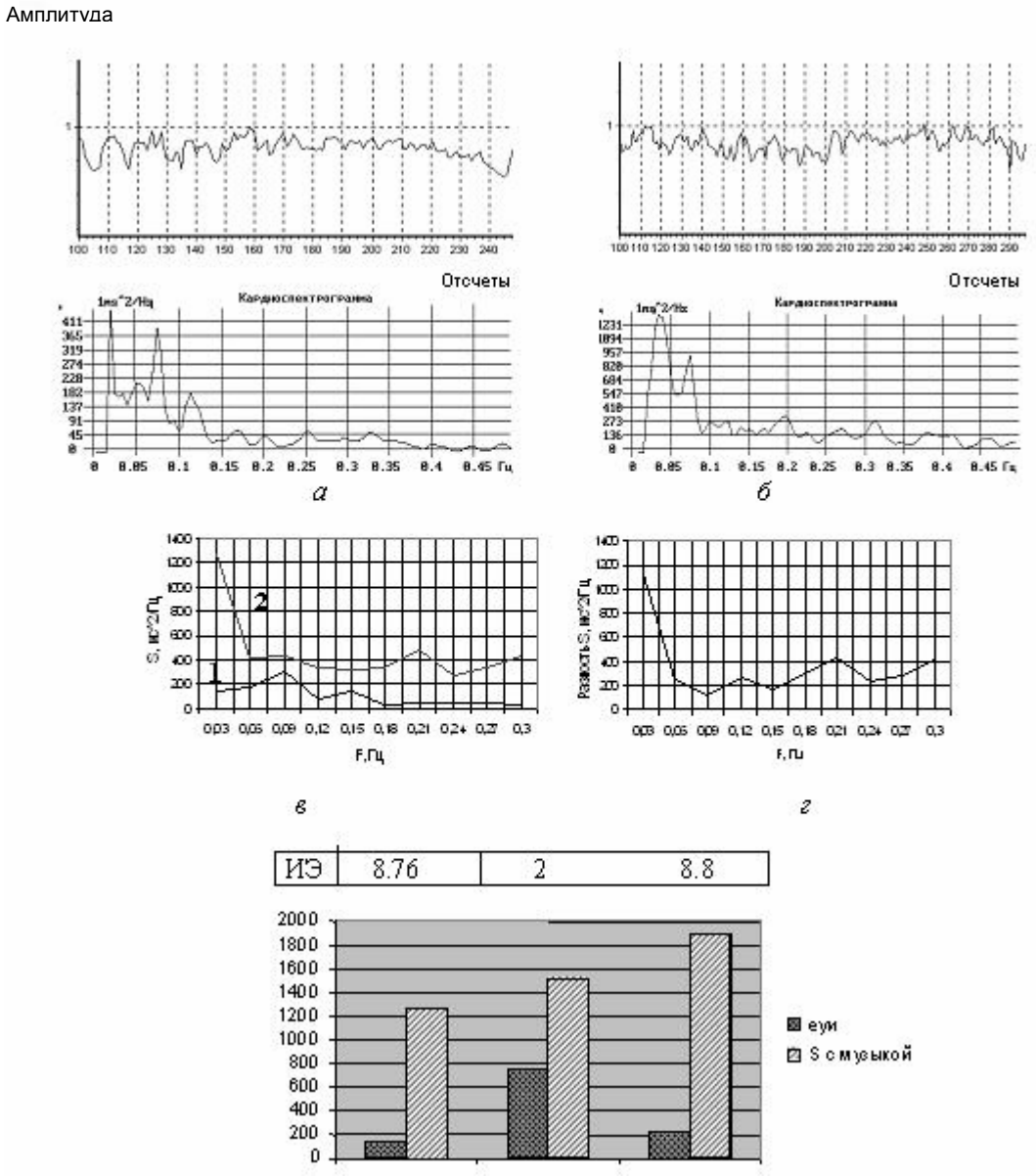


Рис. 19. Пример кардиоинтервалограммы с нагрузкой *(а)* и экспериментальные аппроксимации кардиоритма после нагрузки двух семилетних детей: здорового ребенка (*б)* и ребенка, перенесшего родовую травму *(в)*

Оперативный контроль и качественную дозировку воздействий должны обеспечивать достоверные оценки эффективности коррекции функционального состояния организма. Процедура оценки реакции организма на какие-либо воздействия заключается в следующем: на определенных временных интервалах снятия КИГ – до воздействия, во время воздействия и после воздействия снимается спектр КИГ.

При этом интегральная разность спектральных плотностей мощности (СПМ) КИГ (9) отражает силу воздействия на организм (рис. 20).



Отношение спектральных плотностей мощности соответствующих интервалов КИГ может служить *индексом эффективности* (ИЭ) воздействия на перестройку функциональных систем:

$$ИЭ = S_1(f)/ S_2(f). \qquad (9)$$

Предлагаемый ИЭ может определяться дифференцированно в заданных полосах спектра, соответствующих определенным регуляторным циклам, в частности, как для стандартных диапазонов (инфранизкочастотного – ULF, низкочастотного – LF и высокочастотного – HF, так и для отдельных физиологических циклов (табл. 1).

КР и его спектр на каждом временном интервале, моды низкочастотного спектра КР, частоты и спектральные плотности мощности (СПМ), им соответствующие, отражают активность и динамику комплекса регуляторных систем в конкретном организме.

Формируя идентификационные матрицы значений мод спектра по частоте и уровням спектральной плотности мощности, можно получать точные оценки, характеризующие степень активности или деградации регуляторных систем в покое или при различных воздействиях (физических нагрузках, лекарственной терапии, психоэмоциональных воздействиях).

Таблица 1

Экспериментальные данные по психоэмоциональной коррекции

Номер моды	До коррекции		Во время коррекции	
	Моды спектра	Матрица СПМ	Моды спектра	Матрица СПМ
1	0.05	145	0.05	1270
2	0.08	172	0.09	421
3	0.12	306	0.13	434
4	0.14	83	0.15	345
5	0.16	147	0.17	318
6	0.17	33	0.18	334
7	0.19	57	0.20	490
8	0.21	42	0.21	282
9	0.23	53	0.25	341
10	0.25	30	0.27	442
Сумма	**1068**		**4677**	
ИЭ	**4.37**			
D	1.124		1.252	

Волновая структура кардиоритма отражает взаимодействие регуляторных систем, динамика которых выявляется в его спектральных характеристиках. При диагностике функционального состояния важно определить критерии нормы и патологии работы и адаптивные возможности гомеостаза, которые должны отражать структуру взаимодействия циклических регуляторных систем, что выявляется с помощью вейвлет-анализа.

Гомеостаз человеческого организма основан на циклическом взаимодействии иерархической многоуровневой регуляторной системы жизнеобеспечения, на клеточном или метаболическом уровне (эндогенные биоритмы). В ренормгрупповом подходе *скелетоны* вейвлет-преобразования, как картина линий локальных экстремумов поверхностей выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги – масштабную инвариантность или самоподобие.

На рис. 21 приводятся сравнительные характеристики здорового пациента и больного инфарктом миокарда.

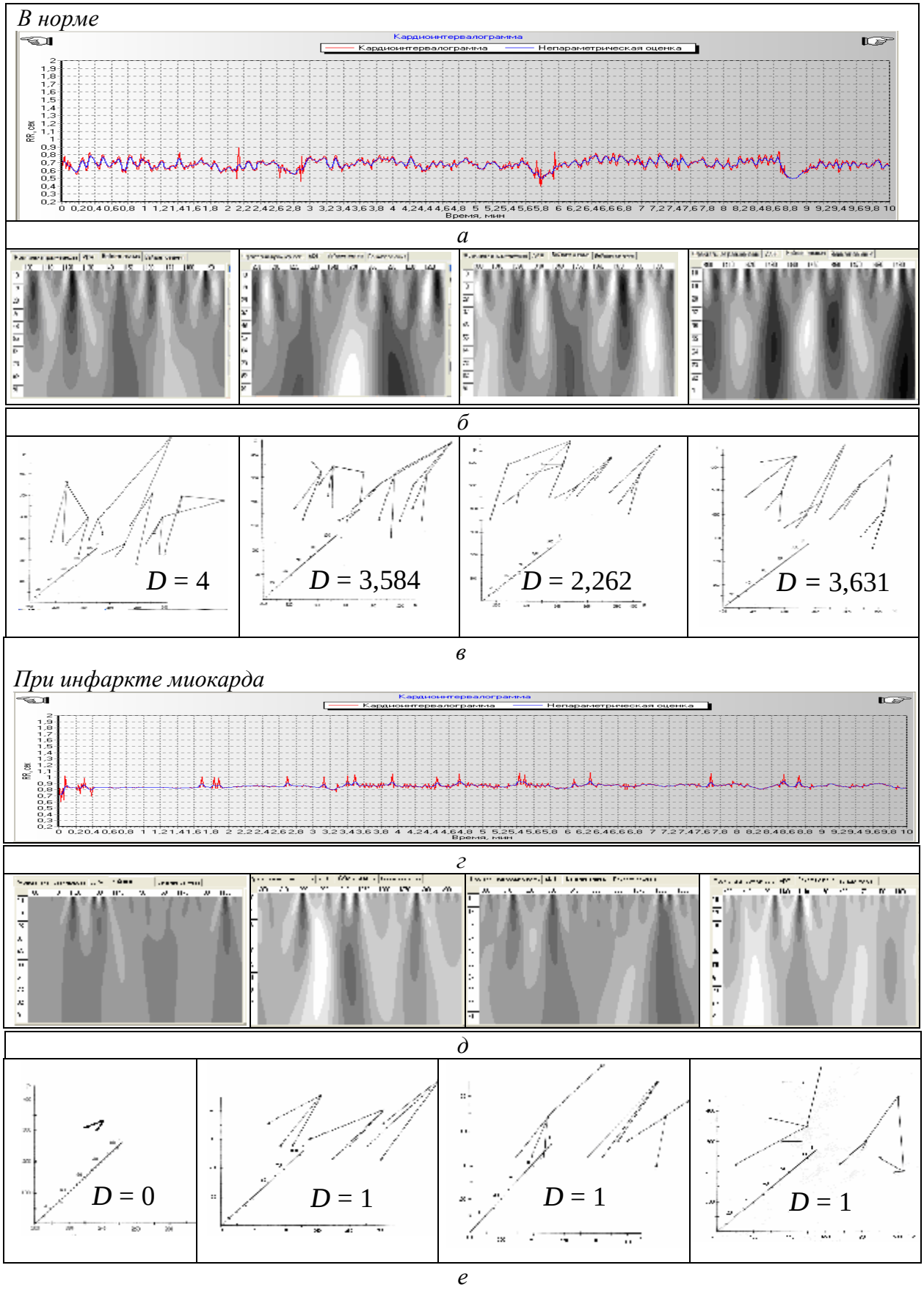
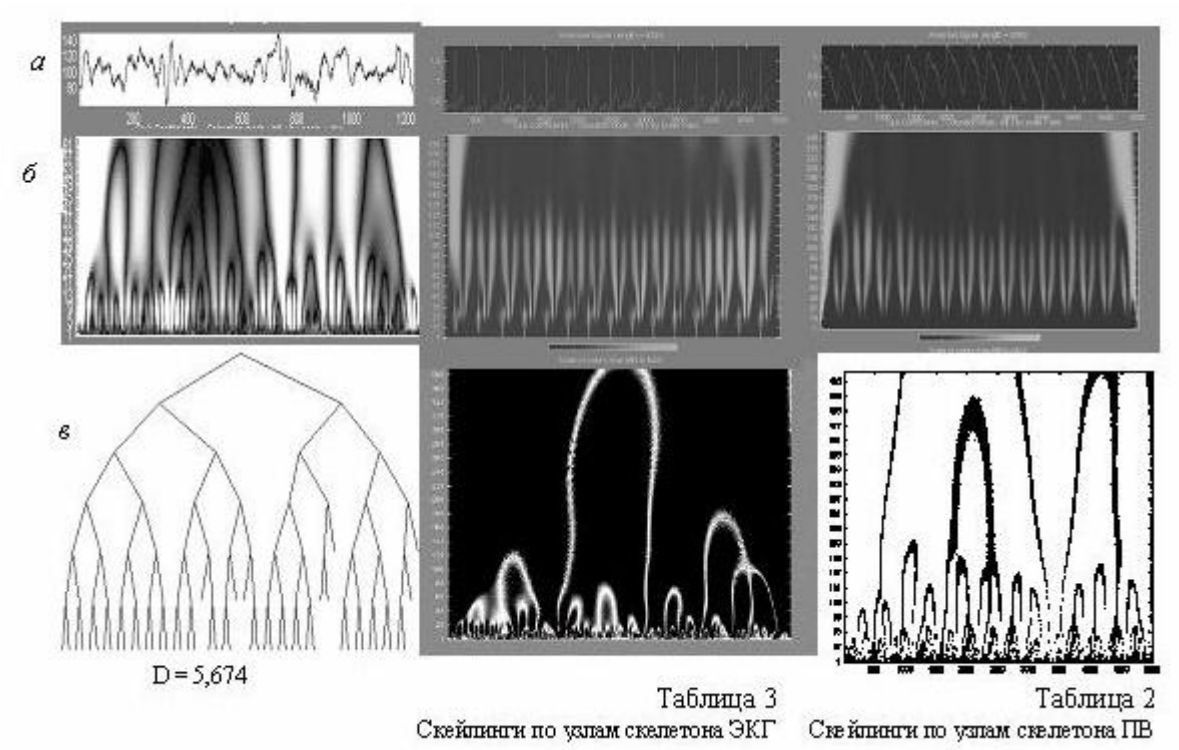


Рис. 21. Кардиоинтервалограмма (*а*), вейвлет-анализ (*б*), скелетоны (*в*) в норме и то же при инфаркте миокарда (*г – е*)

Оценкой структурной организации гомеостаза в ультраметрическом пространстве является фрактальная размерность деревьев Кейли:

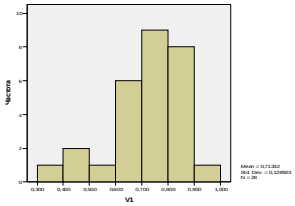
одномерного $D = \frac{\ln \rho}{\ln j}$ и d-мерного $D = \frac{\ln \rho}{\ln j} + (d-1)\frac{\ln \sigma}{\ln j}$, где j – ветвистость, ρ – доля ветвящихся узлов, σ – доля двумерных узлов.

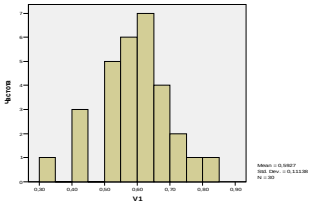


i/j	0.8	0.661	0.631	0.64
1	0.656	0.727	0.791	0.803
2	0.714	0.937	0.789	0.8
3	0.333	0.84	0.8	0.75
4	0.8	0.761	0.75	0.83
5	0.65	0.625	0.555	0.76
6	0.615	0.8	0.84	0.631
7	0.75	0.5	0.666	0.5
$\overline{Sc}$	0.646	0.670	0.686	0.714
σ	0.08	0.057	0.035	0.01

i/j	1	2	3	4	5
1	0.55	0.56	0.45	0.69	0.57
2	0.66	0.61	0.77	0.53	0.31
3	0.57	0.59	0.61	0.42	0.54
4	0.62	0.65	0.51	0.82	0.75
5	0.65	0.62	0.68	0.55	0.61
6	0.75	0.53	0.41	0.67	0.53
$\overline{Sc}$	0.62	0.59	0.57	0.61	0.55
σ	0.027	0.016	0.046	0.05	0.053

Одновыборочные статистики





	N	M	*S*
V1	28	,71332	,12892

	N	M	*S*
V1	30	,5927	,11138

Высокоорганизованные структуры обладают квазикристаллической симметрией и фрактальной самоорганизацией по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. Форма ЭКС, ФКС и ПВ содержит пространственно-временную информацию о работе проводящей, сосудистой и мышечной сердечной системы (рис. 22). Структурную целостность и устойчивость можно адекватно оценить, определяя скейлинговые характеристики скелетонов вейвлет-диаграмм и меру их гармоничности. Скейлинговые характеристики могут быть получены при определенных вейвлет-сечениях по частотной оси (таблицы 2, 3).

Предложена концепция возможности реализации анализа функционального состояния организма (ФСО) по структурным характеристикам на основе синергетической концепции и проектирования аппаратно-программных средств синергетического анализа ФСО, на базе микроэлектронных кардиомониторов холтеровского типа и омега-тестера.

Разработана серия рекордеров для длительного наблюдения (от 5 минут до 24 часов) в режиме on-line и в режиме of-line кардиоинтервалов, электрокардиосигналов, пульсовой волны, фонокардиосигналов, с параллельной записью лево- и правополушарного омега-потенциала с помощью омега-тестера ОТ-01 и сохраняющей информацию в флэш-памяти с последующей обработкой и анализом информации на ПЭВМ (рис. 23) и приборы безмедикаментозной коррекции ФСО на основе фрактальной фото- и электромиостимуляции.

Созданы две версии программного обеспечения – в MS DOS и в среде ОС MS Windows.

Рис. 23. Аппаратно-программный комплекс на базе МКМ и ОТ-1

В пятой главе приводится анализ хаотических явлений, возникающих как при функционировании, так и при массовом производстве радиоэлектронных устройств. Примером возникновения хаотического поведения является погрешность фазовых измерений (ПФИ) при определении координат местоположения с помощью космических навигационных систем и в технических системах. Теория самоорганизации позволяет взглянуть на явления в формировании погрешности измерений как на детерминированный хаос со сложной структурной организацией системы слабосвязанных нелинейных осцилляторов в возмущенной среде с переменными параметрами.

Наличие и характер корреляционных связей в шумах фазовых измерений навигационных систем позволяет отнести их к открытым диссипативным системам с внутренним трением. Экспериментальные исследования показывают, что смесь «сигнал-шум» (ССШ) в ПФИ имеет фрактальную структуру с самоподобием и устойчивым скейлингом в спектральных характеристиках (рис. 7). Моды в спектре формируются в виде групп, главные пики имеют скейлинг, соответствующий 1/*f*. Наблюдается определенная внутренняя организация спектров в виде фрактальной группировки спектральных пиков. Для оценки ренормализационной инвариантности спектра зададим интервалы разбиения частотного диапазона $(Fj - Fj_{+1})$ в соответствии с Фибоначчи-последовательностью. Прослеживается определенный параметрический ряд интервалов группировки спектра с одинаковой энергией *E:*

$$E = \sum_{i=f_{F_j}}^{f_{F_{j+1}}} S_i \,, \tag{10}$$

Выявление диапазонов частот в экспериментальных данных, в которые укладываются равные величины энергии и проверка по критерию Уилкоксона показывает достаточно хорошее согласие с параметрическими рядами, типа Фибоначчи-последовательности (рис. 24, табл. 5).

Согласно полученным результатам, ренормализационная инвариантность спектра ПФИ проявляется практически для всех космических аппаратов, что, в общем-то, подтверждает наличие фрактальной структуры спектра, т. е. определенную самоорганизацию в ПФИ.

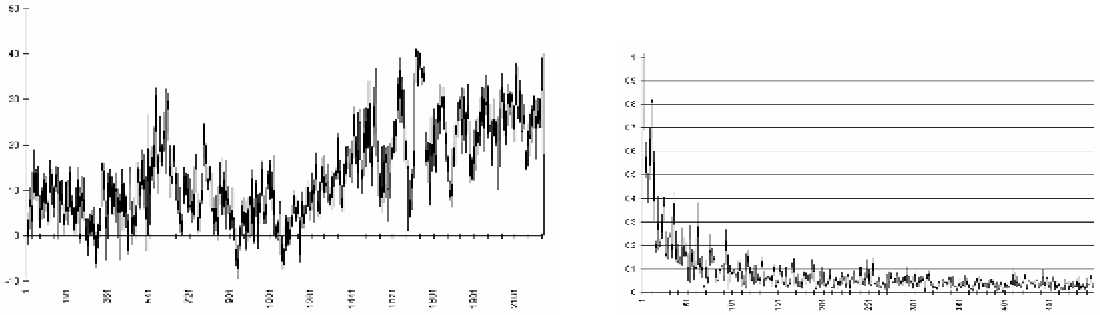
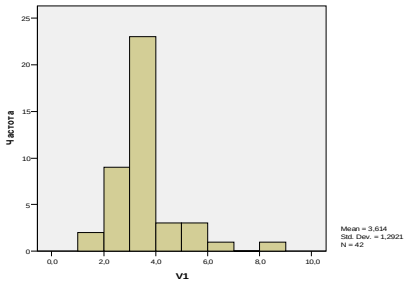


Рис. 24. ПФИ навигационного космического аппарата и ее спектр

Таблица 4

Энергетическая плотность по интервалам $(Fj - Fj_{+1})$ и ее распределение

f	7	12	20	33	54	88
E1	3.7	3.4	2.9	2.2	3.3	2.9
E2	6.1	1.9	2.6	3.3	3.3	3.9
E3	5.6	1.7	2.3	3.2	3.7	4.2
E4	5.6	3.3	2.6	3.8	3.7	4.4
E5	3.6	3.4	2.1	3.3	3.4	3.9
E6	5.9	2.7	3.8	3.3	3.1	3.0
E7	8.9	2.5	3.8	3.3	4.3	3.9



При проектировании РЭА на различных уровнях необходимо в полной мере использовать принципы самоорганизации электронных устройств как реальных физических систем. Рассмотрена концепция проектирования радиоэлектронных средств (РЭС) на основе положений теории самоорганизации, в том числе и их эстетического качества. В частности, предложена синергетическая концепция дизайна РЭС, как естественно-научная основа проектирования гармоничной конструкции в смысле глобальной симметрии законов самоорганизации.

Другой стороной качества проектирования является воспроизводимость характеристик работоспособности серийной совокупности изделий как структурно-устойчивых систем.

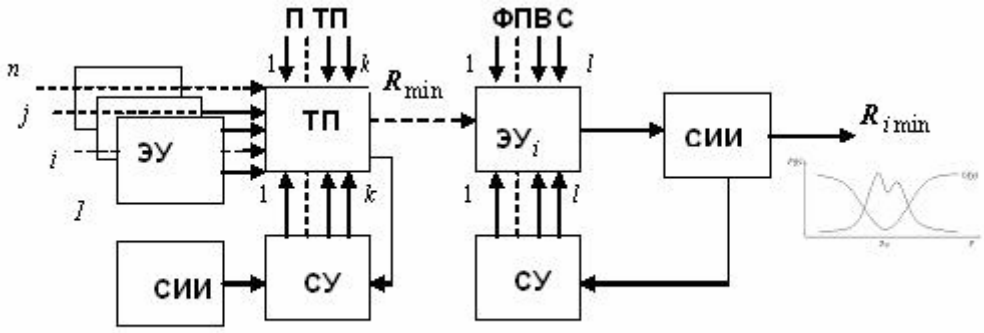
Рассмотрим этот подход для двух задач:

1. Обеспечение робастности (устойчивости функционирования) и управление ресурсом электронных устройств.
2. Анализ структурной устойчивости и конструкторско-технологическая оптимизация для обеспечения робастности электронных устройств в массовом производстве.

Общим для решения обеих задач с позиций теории самоорганизации является обеспечение максимально конденсированного состояния серийной совокупности электронных устройств (ЭУ), минимизируя влияние системами управления (СУ) параметров (П) технологического процесса (ТП) на разброс характеристик работоспособности (ХР) ЭУ на выходе ТП, или обеспечение их робастности в возмущенном фазовом пространстве внешней среды (ФПВС) при функционировании (рис. 25).

Используя информацию о параметрах технологического процесса и особенностях интегральной технологии или информацию о состоянии фазового пространства внешней среды в системе извлечения информации (СИИ), система управления обеспечивает перевод свободной энергии флуктуаций ПТП и ФПВС в энергию внутренних связей *ЭУ* по критерию минимума среднего риска ***R***.

Рассмотрен *статический анализ* структурной устойчивости систем на примере одной из задач инженерной практики – анализа устойчивости микроэлектронных структур (МЭС) в массовом производстве.



ЭУ – электронные устройства; СУ – системы управления; П ТП – параметры технологического процесса; ФПВС – фазовое пространство внешней среды; СИИ – системы извлечения информации

Рис. 25. Обобщенная схема обеспечения робастности ЭУ

Рис. 26. Статический анализ хаотических систем

Особенность такого подхода в том, что серийная совокупность МЭС определяется как «большая» хаотическая система с высокой чувствительностью к конструкторско-технологическим факторам их производства, т. е. ансамбль систем с хаотическим поведением. Необходимы модели, на основе которых возможна алгоритмизация методики анализа и синтеза для компьютерного проектирования робастности МЭС в системе «производство-функционирование» (рис. 26).

Статический анализ строится на основе следующих положений неравновесной термодинамики, основы теории самоорганизации. Морфогенез природных структур – результат конденсации открытых систем с внутренним трением, где под трением понимается переход свободной энергии F в энергию связей элементов структуры. Таким образом, структурная устойчивость систем определяется мерой их конденсации.

Рассмотрены непараметрические методы кластеризации серийной совокупности МЭУ статистическую однородность как по конструкторско-технологическим параметрам, так и для классификации технического состояния объектов контроля. Условием работоспособности является параметрическая инвариантность системы, необходимо обеспечить близость к нулевой чувствительности показателей работоспособности ко всем параметрам, кроме информационных, т. е.

$$F(X, Y, P) = \text{invar}(P), \text{ и } \left| \frac{\partial \Phi}{\partial y_k} \times \frac{\partial y_k}{\partial p_i} \right| \to 0, \qquad (11)$$

где p_i и y_j – компоненты векторов P и Y.

При этом отклонения законов распределения выходных параметров от нормальных свидетельствуют об их неустойчивой воспроизводимости и, как следствие, уменьшении надежности из-за уменьшения доверительной вероятности в области допустимых значений (рис. 27).

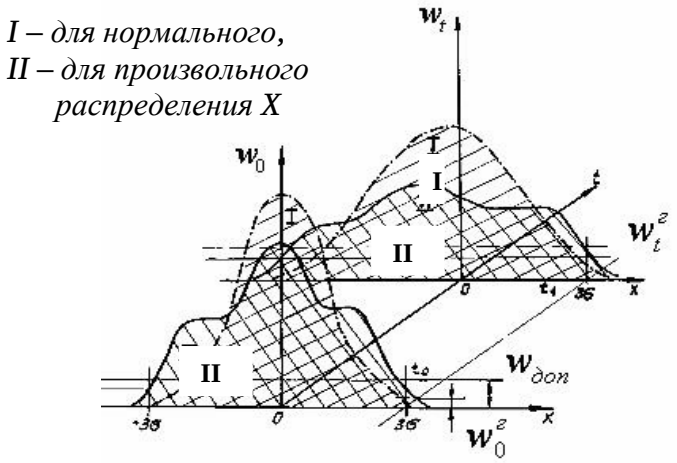
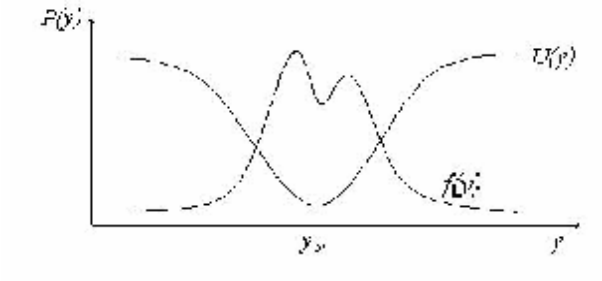


Рис. 27. Влияние деградации параметров ИС на ресурс МЭС:
$w_{доп}$ – допустимая вероятность параметра на границе допуска;
$w_0^г$, $w_t^г$ – вероятность на границе допуска на выходе технологического процесса и по истечении времени t

Контроль состояния технических объектов (ТО) состоит в основном в регистрации фактов выхода характеристик работоспособности (ХР) ТО за пределы уставок, ограничивавших пределы работоспособности ТО. С усложнением ТО и повышением их серийности все больше стали проявляться уязвимые места этого метода.

Во-первых, система уставок как понятие «нормы работоспособности» отражает усредненные показатели, установленные лишь для некоторой совокупности ТО, в то время как контролю подвергается конкретный ТО, индивидуальная область работоспособности которого заведомо отличается от каждого из совокупности. Это повышает риск ошибок 1-го и 2-го рода при контроле.

Во-вторых, при этом остаются неясными причины выхода КП за уставки: либо это нормальная реакция на воздействие внешних параметров на элементы структуры и их связи в ТО, либо это внутренняя неустойчивость структуры ТО вследствие деградации её элементов. Это, собственно, и подлежит измерению для оценки и прогноза ресурса. Оценить робастность структур в факторном пространстве вектора параметров P можно с помощью специальной функции штрафа $U(y)$ на распределении выходных параметров y.



$$U(y) = 0,398 - \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \left[\exp - 0,5 \left(\frac{y_i - y_{i0}}{\sigma_y} \right) \right]^2$$

Рис. 28. Вид одномерной функции штрафа $U(y)$

Вид одномерной функции штрафа $U(y)$ выведен из соображения «штрафования» флуктуаций y по мере отклонения от нормального закона распределения в области допуска, характерного для стабильного процесса (рис. 28).

При этом средний риск

$$R = \int_Y \int_P U(y, p) f(y, p) \mathrm{d}y \mathrm{d}p. \tag{12}$$

Определение среднего риска без учета изменения параметров фазового пространства (ПФП) не отражает реакции работоспособной структуры на изменение внешней силы a, так как потеря работоспособности определяется независимыми от ПФП изменениями плотности вероятности $f(x)$ (деградацией внутренних параметров структуры).

Для учета этих изменений следует соответственно осуществлять сдвиг функции штрафа $U(y)$:

$$R(y) = \int_Y \left\{ 0,398 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \; -0,5 \left[\frac{\overline{(y} - \mathrm{d}y / \mathrm{d}a) - y}{\sigma} \right]^2 \right\} f(y) \mathrm{d}y. \tag{13}$$

Всякая дополнительная информация об изменении ПФП позволяет уменьшить неопределенность системы, снизить средний риск за счет её свободной (по соответствующим степеням свободы) энергии. Можно в определенной мере «управлять» фазовым состоянием системы (ресурсом), изменяя управляемые ПФП в заданных границах.

Массовое производство микроэлектронных структур (МЭС) обладает всеми признаками детерминированного хаоса – цикличность технологии изготовления, высокая чувствительность и нелинейная зависимость к ее параметрам. Можно выделить конструкторские и технологические факторы, определяющих хаотичность поведения серийной совокупности МЭС как «большой» хаотической системы (БХС). Это разброс геометрии элементов топологии и нестабильность параметров технологических процессов (функциональный брак), определяющих условное распределение $f(y/p)$, где $У = \{y_{ij}\}$ – вектор выходных параметров; $P = \{p_{ij}\}$ – вектор параметров МЭС; вектор факторов технологии (диффузии, эпитаксии, и др.) $\Xi = \{\xi_{kl}\}$, $\therefore f(p) = f\{ p_{ij} / \xi_{kl} \}$; $A = \{a_{ij}\}$ – вектор микронеоднородности подложки (дефекты кремния, проколы, дислокации – технологический брак), формирующий условное распределение $f(y/a)$, где $f(a)$ – распределение дефектов по подложке. Общий риск будет:

$$R_{\Sigma} = \int_X \int_Y \int_P \int_{\Xi} \int_A \int_N U(x, y, \xi, p, a, n) f(x, y, \xi, p, a, n) \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}p \mathrm{d}\xi \mathrm{d}a \mathrm{d}n. \quad (14)$$

Учитывая статистическую независимость векторов *P*, Ξ, *X*, *У*, *A*, *N* и наличие аддитивных компонентов у каждого отдельного вектора, информацию связи входных и выходных величин микроэлектронных преобразователей информации в генеральной совокупности их серийного производства, можно выразить в виде иерархического «дерева» энтропий (рис. 29).

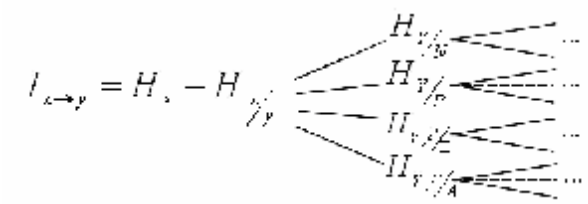


Рис. 29. Иерархическое «дерево» энтропий БХС МЭС

В интегральной технологии приобретают все большее значение такие синергетические принципы проектирования, как селективность, самосовмещение и самосогласование, которые минимизируют «дерево» энтропий.

Критерием оптимизации структуры может быть минимум условной энтропии всех *r* этапов технологического процесса.

Для оценки робастности, как структурной устойчивости МЭУ в факторном пространстве конструкторско-технологических параметров, можно применить метод характеристических потенциалов, использованный в теории информации Р. Л. Стратоновичем. Минимум риска *R* статистической совокупности МЭУ определяет структурно-устойчивый вариант микроэлектронной конструкции. Частные производные от *R* по факторному пространству определяют характеристические потенциалы (ХП) БХС.

$$\mathrm{d}R = \frac{\P R}{\P T} \mathrm{d}T + \sum_k \frac{\P R}{\P a_k} \mathrm{d}a_k, \quad (15)$$

где $F = R(x)$ и $T = \frac{\mathrm{d}R(x)}{\mathrm{d}H(x)}$ – аналоги свободной энергии и температуры, a_k – параметры фазового пространства.

Основные факторы, приводящие к хаотичности поведения в СПФ следующие: брак МЭУ по функционированию – выход показателей работоспособности за допустимые пределы, и технологический – отказы из-за наличия дефектов окисных пленок при фотолитографии и дефектов пластин кремния. Эти показатели взаимосвязаны и определяют выход годных ИС, их ресурс при эксплуатации. Существенный вклад в деградационные процессы в ИС вносят дефектность и микронеоднородность окисных пленок и подложек.

Для синтеза робастных структур необходимо обеспечение эргодичности БХС за счет однородности (гомогенности) ансамбля интегральных компонентов следующими способами.

1. Учитывая однородность интегральных компонентов на одной подложке ИС, исключение влияния большого разброса между подложками обеспечивают разностные структуры вида $\{z\} = \{y - y¢\}$, где y и $y¢$ выходные параметры интегральных структур на одной подложке. Тогда разброс их разности

$$\{\Delta z\} = \{y - y'\}_{t=0} = \left|S_p^y\right| \times \left|p_i - p_i'\right| = \left|S_p^y\right| \times \left|p_i\left(1 - r_{p_i p_i'}\right)\right|, \tag{16}$$

где $\left|S_p^y\right| = \left|\dfrac{\partial y_j}{\partial p_i} \times \dfrac{p_i^0}{y_j^0}\right|$ – функция чувствительности,

$\left.\begin{array}{l} y_j^0,\ j = 1, 2, \ldots, m \\ p_i^0, i = 1, 2, \ldots, n \end{array}\right\}$ – номинальные значения p_i и y_j, $r_{p_i p_i'} = \dfrac{p_i - \overline{p}_i}{\sigma_{p_i}} \cdot \dfrac{p_i' - \overline{p}_i'}{\sigma_{p_i}}$.

Степень компенсации воздействий σ_{p_i} в основном определяется близостью $\rho_{p_i p_i'}$ к единице и распределение $\rho_{p_i p_i'}$ подчиняется нормальному закону.

Вследствие этого с заменой входных переменных y на статистически независимые выходные переменные z матричное произведение $S{\cdot}P$ диагонализируется, а условная энтропия определяется следующим образом:

$$H_{z/p_1 \ldots p_n} = \log Tr\sqrt{2\pi e \sigma^2_{\rho_{p_i p_i'}}} + \log Tr S^z_{\rho_{p_i p_i'}}. \tag{17}$$

Это уже статистически однородные ансамбли с близкими к нормальным законам распределения и эргодическими свойствами.

2. При таких условиях на основании центральной предельной теоремы Ляпунова ведением l-кратной избыточности интегральных компонентов можно уменьшить σ_{z_i} в $\sqrt{l}$ раз, свести анализ к линейным статистическим моделям. Для таких структур

$$H_{z/p_1 \mathbf{K} p_n} = \log Tr\sqrt{\frac{2\pi e \sigma^2_{p_i}\left(1 - \rho_{pp_i'}\right)}{l}} + \log Tr S_i^j. \tag{18}$$

3. Одним из средств синтеза параметрически-инвариантных микроэлектронных структур является вероятностно-взвешенное уменьшение коэффициента вариации за счет увеличения геометрических размеров элементов топологии структуры. Но при этом наряду с уменьшением функционального будет расти технологический брак за счет увеличения вероятности попадания дефекта. Неопределенность поражения или условная энтропия работоспособности от распределения «проколов» по подложке ИС:

$$H_{Z/A} = -\int_A \left[1 - w_{\text{год}}(a_{\text{ИС}})\right] \log\left[1 - w_{\text{год}}(a_{\text{ИС}})\right] \mathrm{d}a, \tag{19}$$

где $w_{\text{год}}\left(a_{\text{ИС}}\right)$ – вероятность бездефектности ИС; $a_{\text{ИС}}$ – площадь, занимаемая ИС. Уменьшить $H_{Z/A}$ можно, введя избыточные резервные элементы структуры, количество которых определяется необходимой вероятностью работоспособности. Величина средних штрафов R (риска) при этом зависит от площади элементов структуры.

Алгоритм оптимизации микроэлектронной конструкции на основе этих положений представлен на рис. 30.

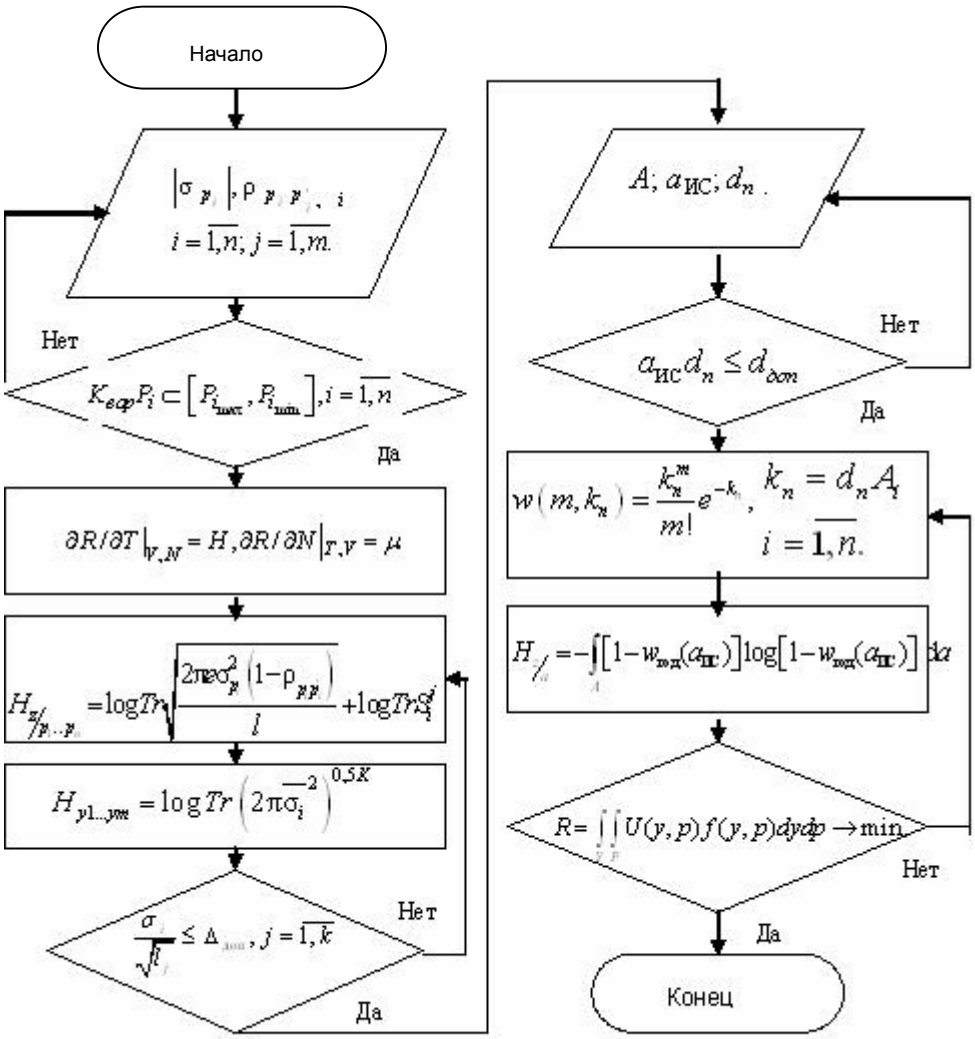


Рис. 30. Методика оптимизации микроэлектронной конструкции

При большой интеграции создание системы соединений между элементами в БИС, особенно в программируемых логических ИС (ПЛИС) важная схемотехническая задача. Соединения в БИС многоуровневая система: 1-й уровень – соединения пассивных и активных компонентов, 2-й уровень – соединения в функциональные схемы, 3-й – соединения в подсистемы. Поскольку сложность системы зависит от числа контактных площадок, необходимо минимальное число внешних выводов, что достигается оптимальным разбиением БИС на интегральные модули.

С помощью избирательных межсоединений и введения избыточности ячеек, взвешенной по вероятности «прокола», можно свести к минимуму брак ИС из-за дефектов подложки.

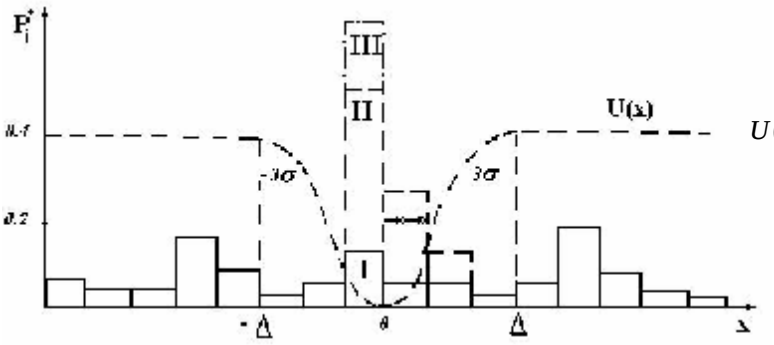
По методике фиксированных межсоединений с помощью энтропийной оценки и функции штрафа $U(p_1 \ldots p_n, a)$ можно определить максимальную площадь кристалла при допустимом выходе годных ИС.

Такой метод позволяет разбить структуру функционального устройства на оптимальные в смысле серийной устойчивости по функциональному и технологическому браку блоки, из которых затем реализуется конструкция МЭС. Эффективный

вариант микроэлектронной конструкции можно определить с помощью соответствующих характеристических потенциалов.

В **главе шестой** проведен ряд экспериментальных статистических исследований и непараметрического кластерного анализа некоторых наиболее распространенных элементных баз с целью определения пространства признаков хаотического поведения МЭУ, характера и специфики разброса их характеристик работоспособности.

Выявлены возможности существенного снижения влияния разброса (4 – 10 раз) и его эргодизации и оценки их серийной устойчивости как среднего риска $R(x)$ с помощью специальной функции штрафа $U(x)$ и характеристических потенциалов БХС МЭУ в, конструкторско-технологическом факторном пространстве (рис. 31).



$$U(x)=\begin{cases}\varphi(0)-\varphi(x), & x\in[-3\sigma;3\sigma];\\ \varphi(x)=\dfrac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\cdot e^{-0,5(\frac{\bar{x}-x}{\sigma})^2}; & \\ \varphi(x)=0,398, & x\in(-\infty;-3\sigma];[3\sigma,\infty).\end{cases}$$

$$H=-\sum_x w^*(x)\log w^*(x);$$

$$H_{1x}=3,618;\quad H_{2x}=2,669;H_{3x}=1.118\ \text{(бит)}.$$

«Свободная энергия» для распределений I, II и III:

$$R_1(x)=\sum_x U(x)w^*(x)=0,32;$$

$$R_2(x)=0,0304;\quad F_3(x)=0,015.$$

Дивергенция Кульбака – Лейблера

$$\hat{I}_{1-2}=\sum_1^{14}(w_i-g_i)\log\frac{w_i}{g_i}=2,708\ \text{(бит)};\quad \hat{I}_{2-3}=0,275\ \text{(бит)}.$$

Ценность информации:

$$T_{1-2}=\frac{\mathrm{d}R_1}{\mathrm{d}H_1}\approx 0,3;\ \text{(1/бит)},T_{2-3}=0,01\ \text{(1/бит)}.$$

Рис. 31. Минимизация разброса ЧДП ТТЛ и их оценка на основе ХП

Предлагаемая методика анализа и синтеза оптимальной структуры МЭС является основой для алгоритмизации компьютерного проектирования робастных МЭС в фазовом пространстве конструкторско-технологических параметров производства и функционирования.

Заключение

В диссертационной работе разработан подход к структурному анализу биопроцессов и технических систем как конденсированных состояний физических систем на основе синергетической концепции природного структурообразования. В рамках этой парадигмы показана необходимость общего синергетического подхода к решению самых разнообразных прикладных задач проектирования систем извлечения и обработки информации.

Сформулирована обобщенная концепция динамического структурного анализа, объединяющая такие понятия, как модель «возврата» ФПУ, КАМ-теорема, модель ССНО в виде *n*-мерного тора, спектр вида *1/f* и фрактальное самоподобие как критерий структурной устойчивости динамических систем. Разработанные методы структурного анализа являются метрологической основой физически адекватного описания и оценки сложных живых и технических систем как самоорганизующихся процессов и систем.

Сформулированы концепция построения новых компьютерных технологий, алгоритмические и аппаратно-программные средства полифункционального мониторинга функционального состояния организма (ФСО) с использованием структурного анализа для оценки нормы и патологии биопроцессов и биосигналов.

На основе предложенных теоретических положений разработаны аппаратно-программные средства контроля состояния здоровья, обеспечивающие компьютерные технологии полифункционального мониторинга ФСО и позволяющие существенно повысить эффективность его анализа и оценки.

Предложены методы повышения достоверности контроля ФСО при мониторинге, методика структурных оценок ФСО на основе идентификационных матриц мод и спектральной плотности мощности кардиоритма, индексов эффективности (ИЭ) коррекции ФСО и индексов лабильности (ИЛ) ФСО, солитонные модели биосигналов для выявления нарушения проводящей и сосудистой систем.

Представлены солитонные модели и методика анализа проводящей, сосудистой и мышечной систем сердца. Разработаны методы и средства структурного анализа ФСО на основе синергетической концепции гомеостаза, скейлинговых характеристик и фрактальной размерности скелетонов вейвлет-диаграмм биосигналов, позволяющих достоверно оценить ФСО. Предложена система индексов ФСО и методы повышения достоверности их оценки.

Представлено описание серийной совокупности электронных устройств как «больших» хаотических систем (БХС), разработана методика анализа робастности БХС и методы оптимального синтеза МЭУ с помощью специальной функции штрафа и характеристических потенциалов БХС. Показана возможность снижения влияния разброса выходных параметров на характеристики работоспособности от 4 до 10 раз обеспечения нормального закона его распределения, как критерия структурной устойчивости БХС электронных устройств в массовом производстве.

Проблемы, рассмотренные и решенные в диссертации, необходимы как метрологическая основа анализа структурной устойчивости живых и технических систем для дальнейшего развития теоретических основ и прикладных методов структурного анализа сложных процессов и систем в природе и технике, так как главные их свойства заключены в их структурной организации.

По теме диссертации опубликованы работы:

1. А. с. 706063,СССР, М. Кл.^{2} А 61 В 5/08 Устройство для цифрового измере - ния периода дыхания / Г. М. Алдонин, А. В. Николаев // Б.И., 1979. – № 48.-4 с.:-ил.

2. Алдонин, Г. М. Устойчивость воспроизводимости характеристик работоспособности времяимпульсных и частотных преобразователей / Г. М. Алдонин // Методы и аппаратура для применения сдвига фаз и частоты сигналов: тез. докл. Всесоюзного научно-технического семинара. – Красноярск, 1979. -с.158.

3. Николаев, А. В. Повышение параметрической надежности микроэлектронных устройств / А. В.Николаев, Г. М. Алдонин // Труды научно-технической конференции по технологии и конструированию микроэлектронных устройств / НТО Приборпром им. С. И. Вавилова. – М., 1980.-с.327-333.

4. А. с. 718724. М. Кл.^{2} G 01 7/00. Цифровой измеритель температуры. / Г. М. Алдонин, М. К. Чмых, Н. А.Чайкин // Б.И., 1980. – № 8. -4 с.:-ил.

5. А. с. 943745. М. Кл.^{3} G 06 F 15/36. Цифровой статистический анализатор случайных интервалов времени / Г. М. Алдонин, С. П. Панько, А. В. Николаев, В. Н. Черняев // Б. И., 1982. – № 26. -4 с.:-ил.

6. А. с. SU 1111037 A G 01 7/00. Цифровой измеритель температуры / Г. М.Алдонин, Ю. Ф. Ворожейкин, А. А. Ковель, М. К. Чмых // Б.И., 1984. – № 32.-4 с.:-ил.

7. Алдонин, Г. М. Математическая статистика и энтропийные модели в проектировании микроэлектронных конструкций: учеб. пособие / Г. М. Алдонин, А. В. Николаев. – Красноярск, КрПИ. – 1987.-с.95.

8. Алдонин, Г. М. Радиоконструктору о дизайне: учеб. пособие / Г. М. Алдонин, И. Р. Аринкин. – Красноярск, КрПИ. – 1991.-с.116.

9. Алдонин Г. М. Компьютерные технологии в обучении на примере курса «Основы художественного конструирования и эргономики» /Г. М. Алдонин // Проблемы информатизации высшей школы. – М.: ГосНИИ СИ, 1996.–Бюл. № 1.-с.5-13.

10. Алдонин Г. М. Синергетика и синтез оптимальных структур. Цифровые радиотехнические системы: межвуз. сборник / Красноярск, КГТУ, 1996.

11. Алдонин Г. М. Средства контроля биоэкстрасенсорных состояний на основе синергетической концепции / Г. М. Алдонин // Биоэкстрасенсорика и научные основы культуры здоровья на рубеже веков: труды междунар. конф. – М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1996.-с.85.

12. Алдонин Г. М. Микроэлектронный кардиомонитор МКМ-01 / Г. М. Алдонин // приложение к журналу «Радиоэлектроника»; сер. Биомедицинская электроника, 1997. – № 1. -с. 2

13. Алдонин Г. М. Синергетическая концепция гомеостаза / Г. М. Алдонин // Проблемы ноосферы и устойчивого развития: матер. I междунар. конф. – СПб., 1996. .-с.84.

14. Алдонин, Г. М. Фрактальная структура погрешности фазовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем / Г. М. Алдонин, А. М. Алешечкин // Спутниковые системы связи и навигации: труды междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск, КГТУ. – 1997. – Т. 3. .-с.281.

15. Алдонин, Г. М. Универсальные свойства детерминированного хаоса при нелинейных преобразованиях сигналов / Г. М. Алдонин, А. М. Алешечкин // Спутниковые системы связи и навигации: труды междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск, КГТУ. – 1997. – Т. 3. .-с.288.

16. Алдонин Г. М. Микроэлектронный кардиомонитор МКМ-01 / Г. М. Алдонин // Информационный листок № 36–98 ЦНТИ. – Смоленск, 1998.

17. Алдонин, Г. М. Самоорганизация в гомеостазе и донозологическая диагностика / Г. М. Алдонин, Д. И. Ноженков // Моделирование неравновесных систем – 98: тез. докл. I Всероссийского семинара. – Красноярск, 1998. .-с.2.

18. Алдонин Г. М. Синергетика в техническом проектировании / Г. М. Алдонин. – Красноярск: КГТУ, 1998.-с.247.

19. Алдонин Г. М. Теория самоорганизации в проектировании РЭС / Г. М. Алдонин. – Красноярск: КГТУ, 1999. –с.250.

20. Aldonin G. M. Sinergetic als Grundlage Kunstlericshen Entwerfens. Design und Marketing in West-und Osteuropa Kassel, Ost-West Wissenshaftszentrum Gesamthoshschule, 1999.-с.59-69.

21. Алдонин Г. М. Синергетика и биоритмы / Г. М. Алдонин // приложение к журналу «Радиоэлектроника»; сер. Биомедицинская радиоэлектроника, 1999. – № 1.

22. Алдонин Г. М. Контроль и коррекция стрессовых состояний на основе анализа фрактальной структуры кардиоритма / Г. М. Алдонин // Коррекция гомеостаза организма: сб. трудов. – Новосибирск: Наука, 2000. -с.145–161.

23. Алдонин Г. М. Структурный анализ кардиоритма на основе синергетической концепции / Г. М. Алдонин // Электроника в медицине. Мониторинг, диагностика, терапия: матер. междунар. симпозиума. – СПб.: ЛГУАП, 2000. –с.196

24. Алдонин Г. М. Коррекция гомеостаза организма при экстремальных состояниях: монография / Г. М. Алдонин и др.; ред. В. П. Нефедов // Новосибирск: Наука, 2000. -с.51-56.

25. Алдонин, Г. М. Аппаратно-программный комплекс диагностики функционального состояния летного состава / Г. М. Алдонин, В. Б. Новиков, О. А. Тронин // матер. междунар. науч.-практ. конф. «САКС-2001». – Красноярск, 2001. .-с.51-54.

26. Анализ функционального состояния организма по кардиоритму / Г. М. Алдонин, В. Б. Новиков, О. А. Тронин // Свидетельство регистрации программы для ЭВМ №. 2002610974. – М.: Роспатент, 2002. .-с.5.

27. Алдонин, Г. М. Вейвлет-анализ гомеостаза / Г. М. Алдонин, Д. И. Ноженков // Новые технологии медицины: Коррекция гомеостаза: сб. научных трудов. – Новосибирск, Наука, 2002. .-с.5-6.

28. Алдонин Г. М. Робастность в природе и технике / Г. М. Алдонин. – М., Радио и связь. – 2003. .-с.367.

29. Алдонин, Г. М. Структурная оценка устойчивости гомеостаза / Г. М. Алдонин, О. А. Тронин // Гомеостаз и экстремальные состояния организма: тез. докл. XI Международного симп. – Красноярск, 2003. -с. 15-16.

30. Пат. RU 2200461 Российская Федерация С2 7 А 61 В 5/02. Способ диагностики по кардиоритму и устройство для его осуществления / Г. М. Алдонин, А. Ю. Мурашкина // Б. И., 2003. – № 8.7 с.:- ил.

31. Алдонин Г. М. Синергетический анализ робастности систем / Г. М. Алдонин // MathTools-2003: тез. докладов 1X международной конференции. – СПб., 2003.

32. Алдонин, Г. М. Structural model of phase radionavigation systems errors / Г. М. Алдонин, А. М. Алешечкин // MathTools-2003: тез. докл. 1X международной конференции. – СПб., 2003.-с.23.

33. Алдонин Г. М. Индекс эффективности коррекции функционального со стояния организма / Г. М. Алдонин // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных технологий: труды междунар. конф. – Сочи, 2003.

34. Алдонин, Г. М. Аппаратно-программные средства анализа и диагностики функционального состояния организма. / Г. М. Алдонин, С. В. Исаев, О. А. Тронин //

Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных технологий: тез. докл. международ. конф. – Сочи, 2003.

35. Алдонин, Г. М. Анализ функционального состояния организма по среднеквадратической сходимости индекса напряженности / Г. М. Алдонин, С. В. Исаев, О. А. Тронин, Е. В. Толстикова // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.-с.194.

36. Алдонин, Г. М. Аппаратно-програмный комплекс омега-метрии / Г. М. Алдонин, Я. В. Варлакова, В. Н. Кожевников, В. Б. Новиков // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.-с.196.

37. Алдонин, Г. М. МНК-линеаризация оценки динамики кардиоритма / Г. М. Алдонин, С. В. Исаев, О. А. Тронин // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: докл. VI междунар. науч.-техн. конф. – Книга 1/ – Владимир: ВОО ВОИ ПУ «Рост», 2004. -с.286.

38. Алдонин, Г. М. Хаос и самоорганизация в производстве электронных структур / Г. М. Алдонин // Материалы международной конференции САКС-2004, СибГАУ, Красноярск, 2004. –50 с.

39. Алдонин, Г. М. Концептуальная система синергетического анализа и синтеза структурно устойчивых процессов и систем / Г. М. Алдонин // Системные проблемы надежности, качества, информационных, электронных технологий: матер. междунар. конф. – Сочи, 2005. Часть 3.-с.35.

40. Aldonin, G. M. Fractal's approach to the possibility of distant information exchage in the living system / G. M.Aldonin, A. M.Aleshechkin // International conference "Radio – That Connects Time. 110 anniversary of Radio Invention". Proceeding of St. Petersburg IEEE Chapters. SPb 2005. Vol. II.-P.55-57.

41. Чмых, М. К. Цифровой фазометр / М. К. Чмых Г. М. Алдонин, А. С. Глинченко, С. В.Чепурных // Приборы и техника эксперимента. – М., 1974. – № 5.-с.204.

42. Кожевников, В. Н. Кардиоритмография в оценке функционального состояния нервной системы при пограничных нервно-психических расстройствах: учеб. пособие / В. Н. Кожевников, Г. М. Алдонин, Т. А. Кожевникова. – Красноярск: КрасГУ, 2006.-с. 127.

43. Алдонин, Г. М. Самоорганизация в системе слабосвязанных нелинейных осцилляторов / Г. М. Алдонин // Системные проблемы надежности, качества, информационных, электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2006): матер. междунар. конф. и Российской научной школы.– М., Радио и связь, 2006. – Часть 1. -с.61.

44. Алдонин Г. М. Автоволновые модели сигналов сердечно сосудистой системы / Г. М. Алдонин // Инноватика- 2006: материалы междунар. конф. и Российской научной школы. – Часть 3. – М., Радио и связь, 2006.-с.43.

45. Алдонин, Г. М. Структурный анализ на основе модели самоорганизации биоструктур / Г. М. Алдонин // Радиоэлектроника. – М., 2006. – № 11.-с.6

46. Алдонин, Г. М. Солитонные модели процессов в биоструктурах / Г. М. Алдонин // Радиоэлектроника, М., 2006. – № 11.с.4.

Соискатель Алдонин Г. М.

Подписано в печать 03.08.2007. Заказ №
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2. Тираж100 экз.
Типография Политехнического института
Сибирского федерального университета