

КОМПАРТМЕНТНО-КЛАСТЕРНАЯ ТЕОРИЯ БИОСИСТЕМ

*Пашнин А.С., Ключ И.В., Берестин Д.К., Умаров Э.Д.
ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»*

Решение задачи системного синтеза тесно связано и с основными задачами теории хаоса-самоорганизации. Последнее связано с условиями синергетического функционирования биологических динамических систем – БДС, определением степени синергичности в работе данной БДС. Становится ясным, что без определения количественных мер (величины синергизма) измерять, оценивать синергичность БДС становится невозможным.

Ключевые слова: *параметры порядка, метод минимальной реализации, фазатон мозга, функциональные системы организма.*

Введение

Еще И.П. Павлов отмечал, что психические процессы “теснейшим образом связаны с физиологическими явлениями, определяя целостную работу органа”. Учение И.П. Павлова о высшей нервной деятельности позволило объяснить механизмы поведения животных, а затем и человека (в ряде случаев) на основе физиологических подходов и методов. Фактически, этот российский физиолог был один из первых, кто активно внедрял кибернетические подходы, методы системного анализа в физиологию и психологию, в частности, при изучении условных рефлексов (УР). По праву И.П. Павлов на Западе считается основоположником бихевиористического подхода (система “черный ящик”) в биологии и медицине.

Объясняя механизмы приспособительного поведения, он отмечал, что в них нет ничего “кроме точной связи элементов сложной системы между собой и всего их комплекса с окружающей обстановкой” [1]. Развивая методы изучения УР, формируя основы современной теории “черного ящика” и бихевиористического подхода, И.П.

Павлов формировал и основные принципы познания физиологических и психических систем с позиции кибернетики, т.е. в рамках системного анализа.

П.К. Анохин пошел дальше в этом направлении, отделив главенство стимула от решения биосистемы в ответ на этот стимул [1]. Он впервые показал, что состав и характер интеграции исполнительных механизмов в поведении биосистемы (равно как и подсистем целостного организма), определяется не стимулом, т.е. ВУВ (предшествующим и запускающим поведенческий акт), а конкретным результатом, который получается в результате поведенческого акта. Анализ частных вегетативных и соматических функций, входящих в целостную интеграцию поведенческого акта, показал П.К. Анохину, что они организованы не по принципу рефлексов, а как функциональные системы, компоненты которой вовлекаются в ее работу с целью получения запрограммированного результата. При этом поведенческий акт реализуется как огромная иерархия функциональных систем организма, т.е.

как иерархический комплекс различных биологических подсистем.

Работами П.К. Анохина и его учеников было показано, что целостная деятельность организма осуществляется при избирательной интеграции многих частных физиологических механизмов в единую ФСО. При этом принципы формирования таких ФСО, отбор механизмов и элементов ФСО координируется конечным результатом деятельности системы. Существенно, что в целостной системе реализуются процессы, которые имеют более высокий уровень организации, а их деятельность не сводится к частным механизмам. Последнее является ключевым принципом деятельности любой системы, являющийся объектом изучения в системном анализе на современном этапе развития кибернетики.

Широта и общность понятия ФСО настолько велики, что с одной стороны мы говорим о существовании многих ФСО на различных уровнях организации биосистем (организма, в частности). С другой стороны, понятие ФСО выходит далеко за рамки изучения отдельного организма. Например, сейчас мы говорим о целенаправленном поведении многих биосистем, основной результат которых – биологическое выживание. В этом аспекте любой полезный приспособительный результат направлен в конечном итоге на выживание и имеет эволюционные аспекты. В этой связи можно сказать, что теория ФСО связана и с теорией эволюции, т.е. имеет фундаментальный характер для биологии и для человека в целом. Такой аспект проблемы

захватывает гносеологические нормы кибернетики, что делает эту науку универсальной (независимой от объекта исследования).

1. Теория ФСО – предтеча синергетики и теории хаоса-самоорганизации.

Системный подход обозначил общие элементы в психической и физиологической деятельности организма. В частности, для понимания механизмов психической деятельности нельзя изучать и рассматривать процессы изолированно, как цепь простых событий. Необходимо помнить, что любой процесс может быть рассмотрен и проанализирован как система элементов. Однако, в свою очередь сам изучаемый процесс может быть рассмотрен как элемент системы более высокого порядка, как некоторая подсистема. Это значит, что любое рассмотрение явления или процесса должно производиться в рамках связи между другими системами, средой, между элементами самой изучаемой системы. При этом надо всегда помнить, что изучение свойств или функций отдельных элементов не в состоянии раскрыть свойства всей системы. Причем, возникает особая задача изучения характера взаимодействия между элементами системы, наличием синергических связей.

Для изучения синергических ФСО очень важно понимать, что процессы в биосистемах протекают во взаимосвязи со средой и сами эти биосистемы должны обладать прогностическими свойствами, т.е. работать на опережение. Иначе биосистема не сможет выжить в постоянно изменяющихся условиях внешней

среды. Существенно, что синергическое взаимодействие между элементами ФСО направлено на поддержание гомеостаза, на достижение общего приспособительного результата. При этом сами системы управления обеспечивают некоторые оптимальные для гомеостаза режимы функционирования ФСО и гомеостаза в целом [4, 6, 8, 9] с помощью синергических взаимоотношений между элементами и подсистемами целостной биосистемы.

Известно, что еще А.А. Ухтомский ввел понятие степеней свободы системы, которые сейчас трактуются как способы функционирования биосистемы, которые обеспечивают приспособительный результат. Это значит, что элементы биосистемы функционируют в аспекте достижения цели всей системы. Поэтому для элементов биосистемы остаются только те степени свободы, которые ведут к выживанию всей системы. Одновременно и сам результат системы как бы “отбирает” те элементы, которые обеспечивают необходимые степени свободы.

В этом аспекте например, психическое рассматривается как интеграция элементарных психофизиологических процессов, объединяемых для достижения цели (результата). Тогда мозг функционирует как некоторая сложная биосистема, на работу которой влияет и различные другие системы (в частности, ФСО, например, КРС, НМС). В рамках такого подхода деятельность всего организма (в том числе и психическая деятельность), рассматривается как отношение между

подсистемами, элементами сложных систем [5].

В рамках такой регуляции в теории ФСО тогда можно рассматривать регуляции на различных уровнях функционирования разных биосистем (от регуляторных процессов в отдельной клетке до взаимодействия систем органов и организации поведения организма во внешней среде). При этом системный характер психики, неразложимость на отдельные элементы (кусочки) является действенным механизмом в изучении психических явлений. Обилие разрозненных фактов в современной физиологии и медицине требует для их изучения и систематизации именно системного подхода, системных методов. Системный анализ моделирование биологических процессов – это та основа, которая может сделать медицину и психофизиологию точными количественными науками, отойти от чистого эмпиризма и спекулятивных теорий. Последние сейчас появились в огромном количестве и в биологии, и в медицине. Особая роль при этом отводится состоянию ФСО, которые влияют на состояние жизненных функций индивидуума прямо и опосредовано, в частности, за счет синергического взаимодействия между элементами биосистем.

2. Теория хаоса-самоорганизации в описании биосистем.

Новый формализованный подход обеспечивает общий язык между медициной (биологией) и смежными дисциплинами, формирование и использование блока объективных методик на базе ЭВМ. Именно этим задачам и служит наша настоящая

работа. Ярким проявлением успешности применения теории ФСО П.К. Анохина в физиологии является изучение роли адренергической системы в состоянии КРС, НМС и состоянии памяти, эмоционального уровня индивидуума [1]. У животных эмоциональный уровень вообще можно оценивать по характеру внешнего поведения. Здесь уместно отметить классификацию П.В. Симонова о положительных эмоциях (животные стремятся их усилить и продлить) и отрицательных эмоциях (их животное стремится ослабить или прервать). Причем эти процессы происходят с участием именно гамкергических или адренергических систем, НВС и ряда других элементов нейротрансмиттерного системного комплекса [9]. При этом демонстрируется роль положительных и отрицательных обратных связей в биосистемах, которые активно обеспечивают синергетические взаимодействия между блоками (подсистемами) организма.

Исходя из теории ФСО П.К. Анохина, организация в иерархию ФСО определяется полезностью или вредностью для организма фактора, обеспечивающего конкретную форму поведения. Существенно, что эмоции и память могут напрямую не зависеть от сенсорной модальности афферентации.

Формализация (математическое описание) таких сложных систем как нейросети мозга, фазатон мозга или управление ФСО требует разработки и новых математических методов идентификации и прогнозирования динамики поведения различных БДС. Базовой задачей синергетики в биологической и клинической

кибернетике, которые основываются на синергетике, является задача идентификации размерности k фазового пространства состояний и идентификация конкретных координат x_i ($i=1,2,\dots, k$) этого фазового пространства вместе с законами (руслами), которые описывают поведение таких “упорядоченных” ВСОЧ для каждой конкретной нозологической единицы.

Известно, что вся европейская медицина постоянно уточняет и изучает диагностическую ценность каждого признака x_i , а, при разработке новых биомедицинских методов исследования заболеваний, дополняется набор x_i новыми диагностическими признаками. Последние расширяют спектр параметров порядка и несколько увеличивают размерность фазового пространства.

Сейчас такая положительная информационная динамика наблюдается в двух областях: в области молекулярной биологии и медицине, когда мы получаем новые знания о молекулярных структурах большого человека или изменениях в его ДНК, и с другой стороны на системном уровне, когда мы вводим новые понятия фазатона мозга, системного синтеза и компартментно – кластерных моделей БДС, находящихся в саногенезе или (что более важно для современной медицины) в патогенезе. Такое расширение знаний уточняет нашу информацию об особенностях движения ВСОЧ, появляются новые данные о параметрах синергизма, интервалах устойчивости, параметрах квазиаттракторов поведения ВСОЧ при

патологических режимах работы биосистем.

Такая положительная динамика развития синергетики и клинической кибернетики на базе синергетики имеет одну существенную проблему. Она связана с задачами формальной идентификации параметров порядка и русел для БДС в норме и при патологии. На сегодняшний день алгоритм универсальной идентификации параметров порядка и русел отсутствует и их идентификация, как и области джокеров, является большим искусством. В этой связи возникает фундаментальный вопрос: а вообще такие алгоритмы могут существовать?

В ЛББСС при СурГУ предложены определенные универсальные методы для определенных режимов поведения БДС, отыскания параметров порядка, русел, областей джокеров и самих джокеров. Эти методы и алгоритмы могут быть использованы для БДС, находящихся в условно стационарных режимах, в любых произвольных хаотических режимах, но вблизи квазиаттракторов поведения ВСОЧ, и при переходах от саногенеза к патогенезу и обратно для ВСОЧ как отдельного организма, так и группы людей по сходным.

Разработанные группой ученых СурГУ [5-7, 9] методы идентификации ПП, Р, областей джокеров применяются сейчас не только для описания саногенеза, патогенеза и переходных процессов, но и используются для описания динамики движения ВСОЧ при старении и приближении к мортальному квазиаттрактору S . Иными словами, в рамках разрабатываемого подхода, мы

подошли к созданию глобального динамического атласа поведения ВСОЧ в фазовом пространстве состояний. А это уже должно составить основу будущей, новой синергетической клинической кибернетики. Кибернетики, которая сделает новой и современную медицину, т.к. тогда мы будем знать всю динамику поведения ВСОЧ от момента рождения человека и до прогноза момента его смерти. Безусловно, что одним из ключевых моментов во всех этих методах лежит теория идентификации синергизма в БДС и программные продукты реализующие эту теорию. Существенно, что пока такая теория нами разработана для БДС, находящихся в состоянии условного биологического покоя ($dx/dt \approx 0$). Рассмотрим это более подробно.

Очень часто организм человека, его ВСОЧ, все БДС могут пребывать в состоянии относительного покоя. Этот покой принципиально относителен, т.к. мы уже отмечали, что все режимы работают в пределах некоторых отрезков времени τ и в ограниченных объемах пространства dV . Сам ВСОЧ даже у абсолютно здорового индивидуума, в абсолютно стабильных социальных, экономических, психических состояниях индивидуума постоянно испытывает движение. Его фазатон мозга, в частности, меняет положение квазиаттракторов T , N , F даже в течении дня. Мы многократно наблюдали, что у физически и психически нормального человека утром (при пробуждении) будем иметь смещение ФМ в фазическую область (квазиаттрактор ВСОЧ сдвигается к правому краю области N или даже заходит в область F согласно рис. 1). К

вечеру активность ФМ опять может повыситься (можно даже попасть в область F) и при отходе ко сну ВСОЧ опять уходит в область T (или PN), что представлено на рис.1.

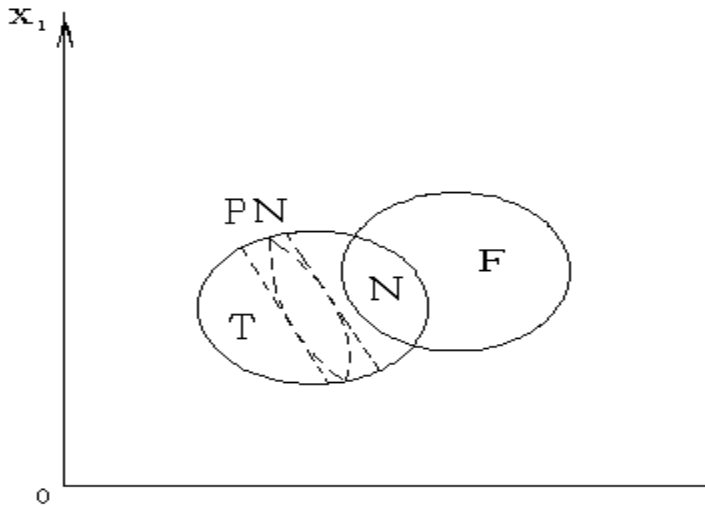


Рис. 1. Фазовый портрет изменения уровня сухожильного рефлекса (x_1) от уровня катехоламинов (x_2). Здесь: F – фазическая патология, T – тоническая патология, N – норма, PN – псевдонорма

Нами было установлено, что практически у всех жителей ХМАО – Югры такая двухфазная суточная динамика поведения ВСОЧ тоже имеет место, но она вся смещена в фазовом пространстве к области T сравнительно с таковыми показателями для жителей средней полосы РФ. Поэтому говорить о каком – то стационарном режиме поведения ВСОЧ и ФМ не приходится. Тем более, если организм переходит от саногенеза к патогенезу, человек заболевает. Тут уж точно мы будем иметь дело со сложными траекториями движения ВСОЧ не только в течение суток, но и при переходе от одного дня к другому.

Если же мы будем производить измерения параметров ВСОЧ ежедневно в одно и тоже время, а

испытуемый не будет резко изменять режим дня, подвергаться стрессам и другим возмущениям, то мы будем говорить об определенном квазиаттракторе поведения ВСОЧ (в данном интервале абсолютного времени (τ_1, τ_2) и в данной области пространства dV , когда человек не поменял место жительства!). В рамках такого подхода мы должны говорить об квазиаттракторах ВСОЧ в утренний период, обеденный, вечерний, ночной и т.д. для определенных условий жизни человека и определенных возрастных периодов. Отметим, что с возрастом динамика движения ВСОЧ, квазиаттракторы поведения ВСОЧ и ФМ, в частности, резко изменяются.

Мы можем говорить об условно стационарных режимах (грубо!) на определенных возрастных интервалах саногенеза и более точно в определенные интервалы суток или сезоны года (для ХМАО – Югры сезонные изменения динамики ВСОЧ весьма существенны). В рамках такого подхода можно говорить о локальных суточных квазиаттракторах динамики ВСОЧ в пределах которых можно считать $dx/dt \approx 0$ или $x_i \approx const (i=1, \dots, k)$. Если ВСОЧ находится внутри квазиаттрактора, размерами которого можно пренебречь в данных исследованиях, то тогда можно для таких состояний организма использовать метод возмущающих воздействий. В этом случае в течении времени τ (его можно условно считать единичным интервалом, т.е. $\tau=1$) на БДС производится некоторое возмущение, воздействие (физическая нагрузка, действие фармпрепарата, электростимуляция афферентных нервов или каких – либо

чувствительных структур, действие неспецифических раздражителей – электромагнитных полей и т.д.) и регистрируется некоторая выходная величина $y=y(t)$. Обычно такой величиной может быть некоторая интегрированная величина, представляющая обобщенный выход БДС.

3. Компарментно-кластерный подход в описании нейросетей дыхательного центра.

Для респираторных нейронных сетей (РНС) дыхательного центра (ДЦ) млекопитающих это может быть активность диафрагмального нерва или самой диафрагмы. Для кардио – респираторной ФСО это могут быть ЧСС или значения артериального давления (САД и ДАД). В любом случае эти выходные величины $y(t)$ должны в интегральной форме представлять деятельность систем регуляции какой – либо БДС (ФСО, например). Это могут быть и биохимические показатели, например, билирубин крови или АЛАТ при развитии болезни Боткина. В этом случае действие вируса может рассматриваться как возмущающий фактор и выходные величины $y(t)$ будут представлять скрытые механизмы регуляции и управления со стороны разных БДС по отношению к внедренному патогенному фактору. С этих позиций и любая травма, хирургическое вмешательство – это тоже внешнее возмущение и организм будет пытаться устранить возникшие повреждения.

В рамках такого подхода любое заболевание – это внешний возмущающий фактор, который в рамках компарментно – кластерной

теории биосистем – ККТБ будет описываться некоторыми моделями вида (1), которые мы уже представляли в ряде публикаций [5, 6, 7, 10, 13].

Эти модели в виде систем дифференциальных уравнений (в векторно – матричной форме) хорошо описывают потоки, о которых говорилось в ряде наших работ [5, 10, 11]. Однако в реальной ситуации мы работаем с дискретными моделями, т.к. измерения значений x_i , ud , y и других мы производим дискретно, через кванты времени τ (обычно $\tau=1$).

Известно, что медицине вообще никто не работает с потоками, т.е. идентификация диагностических признаков (функциональная диагностика, биохимические показатели и т.д.) всегда производится дискретно. Например, при поступлении пациента в больницу и при выписке разово делается рентгеновский снимок. Иногда такие измерения производятся несколько раз и в редких случаях производится непрерывное мониторирование (холтеровское мониторирование). В целом, в здравоохранении мы имеем дело с дискретными измерениями и дискретными моделями в виде разностных уравнений (РУ). Для таких целей разработан специальный математический аппарат в виде ККТБ, метода минимальной реализации (ММР) и методов идентификации оптимальных моделей БДС в рамках компарментно – кластерного подхода. Рассмотрим эти подходы более подробно применительно к изучению ФСО.

Известно, что описание динамики поведения любых динамических систем может быть сведено к модельным

представлениям структурно-функциональной организации этих систем. Априори можно утверждать, что существует некоторая математическая модель реальной БДС, которая достаточно точно будет представлять все основные динамические характеристики исследуемого биологического объекта. Однако в реальной ситуации идентификация такой (будем ее называть) базовой модели (БМ) – задача весьма сложная. Если ее (т.е. БМ) представлять в качестве «черного ящика» (ЧЯ), то по соотношению между входным (описывается слагаемым u или Bu в наших моделях) воздействием (стимулом) и выходными характеристиками ЧЯ (функцией $y=y(t)$) можно построить некоторую упрощенную новую модель. Последняя с заданной степенью точности может описывать динамику БМ и в этом смысле будет подобна исследуемой БМ. В рамках такого подхода можно решать задачу минимизации порядка новой модели, т.е. уменьшения размерности m вектора состояния x , где $x \in R^m$, что эквивалентно определению размерности подпространства k и идентификации параметров порядка k ; данной БДС.

При использовании подхода «черный ящик» мы считаем, что структура и внутренние процессы исследуемой системы очень сложные. Поэтому полная их идентификация не производится, а выполняются эксперименты по идентификации некоторого линейного приближения вида:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times 1}$, $C \in R^{1 \times n}$ (при $i = \overline{1, N}$).

Здесь единичное ступенчатое входное воздействие u имеет вид:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

а последовательность $y(t)$ является последовательностью откликов исследуемой системы $\{y(t), t=1, 2, \dots\}$ на входное воздействие u .

Эту последовательность можно представить как

$$y(t) = CA^{t-1}B, \quad t=1, 2, \dots \quad (3)$$

при условии, что начальное состояние будет нулевым.

В дальнейшем задачи ММР будем сводить к построению системы наименьшего порядка линейных разностных уравнений вида:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= Ax_t + Bu_t \\ y_t &= Cx_t, \quad t=0, 1, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Система (2) может быть получена при исследовании систем с непрерывным временем. При этом непрерывный объект (например, биологические динамические системы) будет описываться дискретными значениями в фиксированные моменты времени. При использовании аналого-цифрового преобразователя - АЦП именно такая ситуация и возникает, а для получения необходимого отображения "вход-выход" Φ требуется проведение ряда экспериментов.

Эти эксперименты имеют три особенности. Во-первых, входные воздействия задаются в виде прямоугольного импульса длительностью τ или серий импульсов общей длительностью (серии) τ и должны заканчиваться в некоторый момент времени t_0 . Во-вторых, наблюдение выходных величин

необходимо производить после исчисления t_0 (т.е. окончания стимуляции объекта) сколь угодно долго и независимо от их численных значений. Для БДС, если они находятся в стационарных (без генерации возбуждения) состояниях, длительность эпохи T наблюдения ответа должна удовлетворять неравенству $T \leq 2m+1$, где m -предполагаемый порядок модели (1). Как правило, дальнейшее наблюдение дает просто нулевые значения выхода системы, т.е. мало информативны и их можно не учитывать при построении модели. Наконец, в-третьих, начальный момент t_0 можно считать равным 0, т.к. БДС должна находиться в стационарном состоянии до t_0 , т.е. производная от вектора состояний x должна быть равна $dx/dt = 0$.

При перечисленных условиях всегда можно получить решение задачи реализации заданного отображения φ . Иными словами всегда можно указать тройку матриц C, A, B (3), которая является реализацией отображения "вход-выход" φ (при условии совпадения отображения "вход-выход" исследуемой системы с заданным отображением φ).

Если построена система (4), то одновременно будем считать определенной передаточную функцию системы, которая имеет вид:

$$W(\xi) = C(\xi I - A)^{-1} B \quad (5)$$

Поскольку мы будем иметь дело с конечной последовательностью откликов y_i системы (используем реально $2m + 1$ точек), то построение минимальной реализации будем производить в рамках частичной минимальной реализации.

Первоначально рассмотрим постановку задачи минимальной реализации (МР) для бесконечной последовательности откликов некоторой исследуемой системы. Для этого рассмотрим простейший случай постановки задачи МР для последовательности чисел $(p_1, \dots, p_N) = \{p\}$.

Определение 1. Тройка матриц $Z = (A, B, C)$, удовлетворяющих равенству (6), называется реализацией последовательности $\{p\}$, а число N – ее размерностью:

$$CA^{i-1}B = p_i \quad (6)$$

где: $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times 1}$, $C \in R^{1 \times n}$ при $i = \overline{1, N}$.

Будем называть последовательность $\{p\}$ – последовательностью марковских параметров (в наших исследованиях это эквивалентно y_i).

В общем случае реализация Z всегда существует. Например, для размерности N (когда она равна количеству марковских параметров в заданной произвольной последовательности) можно взять следующий вид матриц:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$C = (p_1, \dots, p_N).$$

Легко убедиться, что для этого случая условие (6) реализуется. Такой вариант, однако, мало интересен, так как для бесконечной последовательности $\{p\}$ реализация Z имеет бесконечную размерность. Естественно возникает вопрос в этой связи о конечной и наименьшей

размерности n . Отыскание наименьшего n , для которого выполняется (6), и является решением задачи минимальной реализации для последовательности $\{p\}$.

Определение 2. Размерностью минимальной реализации для последовательности $\{p\}$ называется такое число d (зависящее от $\{p\}$), для которого существует реализация размерности d и не существует реализации меньшей размерности. Тогда минимальной реализацией будем считать реализацию размерности d . Для бесконечной последовательности (p_1, p_2, \dots) , будем требовать, чтобы соотношение (6) выполнялось для всех натуральных чисел. Наконец, если не существует реализации конечных размерностей, то $d = \infty$.

Для дальнейшего изложения введем понятие ганкелевых матриц H_{ij} . Эти квадратные матрицы содержат элементы, состоящие из элементов последовательности $\{p\}$, т.е.:

$$H_{ij} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & \dots & p_j \\ p_2 & p_3 & \dots & p_{j+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_i & p_{i+1} & \dots & p_{j+i+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Если имеется бесконечная последовательность марковских параметров $\{p\}$, то операторы сдвига индуцируют на ганкелевой матрице бесконечной размерности $H(p)$ свой оператор сдвига, т.е.:

$$G^k H(p) = H(G^k p) = \begin{bmatrix} p_{k+1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{k+2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (9)$$

Отсюда следует, что ганкелевы матрицы эквивалентны последовательности $\{p\}$ и их можно использовать вместо $\{p\}$ в качестве исходного материала для различных

расчетов. Можно показать, что при равенстве рангов матриц для некоторого n , т.е.

$$\text{rank}(H_{n+1,j}) = \text{rank}(H_{n,j}) = n \quad (j=n, n+1, \dots) \quad (10)$$

выводится необходимое и достаточное условие реализуемости бесконечной последовательности марковских параметров $\{P_{ij}\}_{i=1}^{\infty}$. Здесь n будет размерностью реализации, а приведенное равенство называется "условием рангов".

В терминах передаточной функции $W(\xi)$ минимальную реализацию можно трактовать несколько иначе. Если имеется формальный степенной

ряд $\Gamma(\xi) = \sum_{i=1}^{\infty} P_i \xi^i$ и выполняется

соотношение $p_i = CA^{i-1}B$, $i = \overline{1, N}$, то тройка $Z = (C, A, B)$ является частичной реализацией ряда Γ порядка N .

Отметим, что каждой частичной реализации в этом случае соответствует свой степенной ряд

$$W(\xi) = \sum_{i=1}^{\infty} CA^{i-1}B \xi^i \quad (11)$$

Если мы имеем дело с реализацией конечной размерности, то ряд (3.11) сходится в окрестности бесконечности к рациональной функции

$$W(\xi) = C(\xi I - A)^{-1}B \quad (12)$$

Будем называть $Z = (C, A, B)$ полной реализацией Γ , если соотношение $p_i = CA^{i-1}B$ выполняется для всех натуральных i . Тогда Γ имеет полную реализацию конечной размерности в том и только в том случае, если Γ сходится в окрестности бесконечности к рациональной функции. При этом $\Gamma = W$. (см.11).

В общем случае проблема МР, рассматриваемая нами, имеет более

одного решения. Для конкретного пространства состояний, т.е. фиксированного m , решение задачи МР будет единственно с точностью до выбора базиса. Связано это с тем, что при работе с черным ящиком мы имеем дело только с отображением "вход-выход" и биологически (физически) осмысленными являются только вход и выход. Получаемые при идентификации ЧЯ переменные состояния (например, компоненты вектора x в моделях (1) и (2) наделять определенным содержательным смыслом довольно затруднительно без знания внутренней структуры ЧЯ. Такие переменные состояния являются некоторыми обобщенными переменными, описывающими "вход-выход", т.е. некоторую идеализированную модель реальной системы. Отсюда возникает свобода выбора канонической модели отображения "вход-выход". Представление реальных биологических (или физических) переменных, описывающих неизвестную реальную систему, может осуществляться в виде линейной комбинации полученных переменных состояния идеальной модели или каким-либо более сложным способом. В случае компартментных моделей мы будем использовать именно линейную форму в первом приближении [5, 6, 10, 11].

Возможен и обратный переход, т.е. переменные состояния идеальной модели представляются как линейная комбинация истинных биологических переменных, описывающих реальную систему. Это позволяет обнаруживать некоторые свойства системы или использовать для описания меньшее

число параметров. Последнее составляет основу синтеза, т.е. решение задачи минимизации размерности фазового пространства. Таким образом, при фиксированном m задача МР будет иметь единственное решение с точностью до выбора базиса.

Для идентификации БДС с помощью ММР важны понятия наблюдаемости и достижимости. Будем говорить, что состояние $x(t_0)$ исследуемой системы наблюдаемо, если оно может быть определено по некоторым последующим значениям выходной переменной $y(t)$ (при $t > t_0$ и $t - t_0 < \infty$). Если для момента времени t_1 существует момент $t_2 > t_1$ и такой вход $u(t)$, который переводит состояние системы $x(t_1)$ в состояние $x(t_2) = 0$ при условии, что $t - t_0 < \infty$, то мы будем говорить о достижимости состояния $x(t_1)$ исследуемой линейной системы.

Наконец, система называется полностью достижимой (или наблюдаемой), если каждое ее состояние достижимо (или наблюдаемо). Отсюда следует, что каноничность системы равносильна совместной полной достижимости и полной наблюдаемости. В рамках этих понятий две системы Z_1 и Z_2 (одновременно полностью достижимы и полностью наблюдаемы) с одинаковыми отображениями "вход-выход" будут различаться только используемыми базисами в соответствующих пространствах состояний. Более того, можно утверждать, что понятия "минимальная" и "каноническая" в отношении реализации являются равносильными, так как размерность системы минимальна в классе всех реализаций отображения "вход-выход"

φ только для случая, когда Z является канонической реализацией φ .

Таким образом, минимальная реализация полностью определяет свойства системы. Действительно, на численную реализацию отображения "вход-выход" влияет лишь полностью достижимая и полностью наблюдаемая часть системы. Остальная часть системы не оказывает какого-либо влияния и выбирается произвольно. В качестве примера канонической формы для построения МР можно привести каноническую форму достижимости вида:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & -a_n \\ 1 & \dots & 0 & -a_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [c, 0, \dots, 0].$$

Рассмотрим теперь стандартный способ построения МР. Можно показать, что для бесконечной последовательности $(p_i)_{i=1}^{\infty}$, имеющей минимальную реализацию размерностью n при условии существования единственного вектора x , удовлетворяющего соотношению $(x^T, -1) H_{n+1}, j = 0^T (j = 1, 2, \dots)$, минимальная реализация имеет вид [5, 6, 10, 11]:

$$Z_n = \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_{n-1} \\ p_n \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \right).$$

Отметим, что в настоящее время существует несколько алгоритмов решения задачи МР, основанных на

свойствах ганкелевых матриц, которые определяют все элементы МР. Однако наиболее перспективным алгоритмом является алгоритм построения МР, основанный на свойстве вложенности. Рассмотрим его подробнее.

Пусть последовательности $\{p\}$ (см. (6)) соответствуют МР $Z_N = (A_N, B_N, C_N)$. Если последовательность марковских параметров была построена и первые N чисел $p_i (i = 1, \dots, N)$ не изменились, т.е. получили $(p_1, \dots, p_N, \dots, p_M)$, где $M > N$, то новой последовательности будет соответствовать МР $Z_M = (A_M, B_M, C_M)$, $M \geq N$. Тогда матрицы A_N, B_N, C_N являются подматрицами матриц A_M, B_M, C_M , они располагаются в верхних левых углах этих новых матриц. Следовательно, при возрастании числа марковских параметров в данной $\{p\}$ получается в общем случае неединственная последовательность минимальных частичных реализаций $\{Z_0, Z_1, \dots\}$ возрастающих размерностей. Таким образом, при увеличении числа марковских параметров матрицы A, B, C не строятся заново, а лишь достраиваются, что значительно упрощает процедуру расчетов в сравнении с другими методами, где эти матрицы каждый раз рассчитываются заново. Легко видеть, что размер реализации m является функцией точности идентификации исследуемого объекта.

Введем понятие степенных индексов ν , образующих некоторую последовательность $\{\nu(0), \nu(1), \dots\}$ при $\nu(0) = 0$ и $n = 0, 1, 2, \dots$. Если $p = (p_1, p_2, \dots)$ – бесконечная последовательность марковских параметров, $\{H_{i,j}\}_{i,j=1,2,\dots}$ – семейство ганкелевых матриц, то $\nu(n+1)$ определим как наименьшее целое

(большее $\nu(n)$), для которого прямоугольная матрица $H_{n+1} = H\nu_{(n)+1}$, $\nu_{(n+1)}$.

Если $H_{i,j}$ – бесконечная ганкелева матрица последовательности p имеет конечный ранг, то процесс нахождения ν завершается после конечного числа шагов, например, после некоторого n^* . Конечному n^* соответствует такое же число вложенных друг в друга реализаций, т.е. системных представлений, а их окончательная размерность определяется соответствующим степенным индексом $\nu(n^*)$. Степенные индексы используются при увеличения количества марковских параметров с N до M . При этом вычисление ранга матрицы H_{n+1} потребует увеличения степенных индексов до некоторого $K > N > n$ при условии, что реализация Z_n реализует все N марковских параметров и данных для ее построения достаточно.

Вообще определение рангов H_{ij} относится к разделу некорректных задач, так как небольшая вариация последовательности марковских параметров может привести к дискретному изменению результата, т.е. к изменению ранга получаемых матриц. В этой связи выполнена факторизация ганкелевых матриц, при которой в описанной выше процедуре не требовалось нахождения ранга этих матриц.

Важным понятием в ММР является степень Мак-Миллана $\Delta(p)$, равная размерности минимальной реализации. Для любой последовательности марковских параметров существует свое значение $\Delta(p)$. Если бесконечная последовательность $\{p\}$ вещественных чисел со степенными индексами $\{\nu(n)$,

$n \in N\}$, то степень Мак-Миллана для $\{p\}$ определяется из формулы:

$$\Delta(p) = \sup \{ \nu(n), n \in N \}.$$

Отметим, что для некоторой последовательности $(p_1, \dots, p_{\bar{N}})$ при $\bar{N} = 1, 2, 3 \dots; \bar{N} < N$ имеется степень Мак-Миллана $\nu(n)$, для которой выполняется соотношение:

$$\nu(n-1) + \nu(n) \leq \bar{N} < \nu(n) + \nu(n+1) \text{ при } \nu(-1) = 0.$$

Таким образом, каждая последовательность $(p_1, \dots, p_{\bar{N}})$ имеет минимальную реализацию $Z_N = (A_N, B_N, C_N)$ размерности $\nu(n)$, которая удовлетворяет приведенному выше неравенству. Тогда можно построить семейство $Z = \{Z_n, n \in N\}$ частичных минимальных реализаций последовательности $\{p\}$, а $p_i = C_n A_n^{i-1} B_n$ для соответствующей части последовательности $\{p\}$.

Отметим, что $Z_0 = (0, 0, 0)$ при $p_1 = 0$. Множество $Z = \{Z_n, n \in N\}$ называется полным семейством минимальных частичных реализаций последовательности $\{p\}$.

Наиболее важным понятием для построения МР заданной последовательности $(p_1, \dots, p_{\bar{N}})$ является понятие вспомогательной последовательности $\{r\} = (r_1, \dots, r_{\bar{N}})$ параметров, которая содержит полную информацию о требуемой МР. Составление для последовательности p марковских параметров вспомогательной последовательности параметров требует использования линейного функционала, определенного на векторном пространстве вещественных полиномов, т.е.:

$$p * (z^{i-1}) = p_i, i = 1, 2, 3, \dots$$

Если $F(z) = \sum f_i z^i$ и $G(z) = \sum g_i z^i$ два полинома, то $p*(FG) = fHg$, где: $f, g \in R^\infty$ и $f = (f_0, f_1, \dots)'$, а $g = (g_0, g_1, \dots)'$.

Причем бесконечный вектор $V(z) = (1, z, z^2, \dots)$ определяет соотношение между векторами в R^∞ и полиномами следующим образом:

$$F(z) = V'(z) f', \text{ а } G(z) = V'(z) g'.$$

Вспомогательная последовательность параметров обладает следующими свойствами. Во-первых, она разбита на секции, которые используются для построения реализаций соответствующих размерностей. Секционные индексы $\{\sigma(m), m \in M\}$, для некоторой (найденной каким-либо образом) последовательности вещественных чисел $\{r\}$, которую будем считать вспомогательной последовательностью параметров, находятся следующим образом. Пусть $\sigma(0) = 0$ и $m = 0, 1, 2, \dots$. Берем первое не нулевое r_i такое, что $i > \sigma(m)$. Обозначим через $\delta(m+1) = i - \sigma(m)$, отсюда $\sigma(m+1) = \sigma(m) + 2\delta(m+1)$. Тогда можно показать, что для последовательности степенных индексов $\{v(n), n \in N\}$ в точности выполняются соотношения $\sigma(n) = 2v(n)$. В этом случае множество M , определенное для секционных индексов, в точности аналогично множеству N .

Во-вторых, последовательность параметров автоматически разделена на секции, и i -я секция содержит $\sigma(i) - \sigma(i-1) = 2v(i) - v(i-1) = 2\delta(i)$ элементов.

В-третьих, первые $\sigma(n)$ элементов последовательности параметров r используются для построения реализации Z_n размерности $v(n)$.

Следовательно, первоначально производятся вычисление, согласно определению, индексов $\{\sigma(m), m \in N\}$, а затем определяется последовательность степенных индексов $\{v(n), n \in N\}$; $\{\sigma(m), m \in N$:

$$v(m) = \frac{1}{2} \sigma(m)\}. \text{ Таким образом,}$$

последовательность параметров r полностью определяет семейство реализаций $\{Z_m, m \in M\}$ троек матриц (системного представления) $Z_m = (A_m, B_m, C_m)$. Вместо Z_m можно записать $Z(v(m), r)$, так как размерности реализаций находятся в прямой зависимости от последовательности r . Тогда $Z(v(m), r)$ является реализацией некоторой последовательности p . Фактически r определяет p , так как $p_i = C A^{i-1} B$.

Если не использовать построение последовательности r , то тогда необходимо вычислять ранги H_{ij} и отказываться от свойства вложенности, что значительно усложняет все расчеты. Нами было теоретически и экспериментально установлено, что невозможно существование двух разных последовательностей r таких, что они обеспечат минимальную реализация p .

Элементы матриц МР Z_n размерности $v(n)$ содержатся в последовательности параметров $r_1, \dots, r_{\sigma(n)}$. Коэффициенты матриц Z_n удовлетворяют рекуррентным соотношениям:

$$Q_{n+1}(z) = \alpha_{n+1}(z) Q_n(z) - \beta_n Q_{n-2}(z), \quad (13)$$

$$Q_0(z) = 1, \quad Q_{-1}(z) = 0.$$

Здесь $\alpha_n(Z) = Z^{\delta(n)} - \alpha_{n1} Z^{\delta(n)-1} - \dots - \alpha_{n\delta(n)}$, где $\delta(n) = v(n) - v(n-1)$ и $\alpha_n = (\alpha_{n\delta(n)}, \dots, \alpha_{n1}) \in R^{\delta(n)}$ – единственное решение системы линейных уравнений, элементы матриц которой

представляют линейные комбинации марковских параметров.

Для построения матриц A , B и C (системного представления) используется матрица $F \in R^{m \times m}$, которая определяется для произвольного полинома $P(z) = z^m + P_1 z^{m-1} + \dots + P_m$ следующим образом:

$$F(P) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -P_m \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -P_{m-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -P_{m-2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -P_1 \end{bmatrix}.$$

Введем также трехдиагональную матрицу размерности $v(n) \times v(n)$ вида:

$$A_n = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & \dots & \cdot & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & \dots & \cdot & 0 \\ 0 & A_{32} & A_{33} & \cdot & \dots & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & A_{n-1n} \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & A_{nn-1} & A_{nn} \end{bmatrix},$$

где $A_{kk} = F(\alpha_k) : \delta(k) \times \delta(k)$; $A_{kk+1} : \beta_k$ в правом верхнем углу и нули – в остальных позициях. Здесь имеются полиномы $\{\alpha_n, n \in N\}$ и вещественные числа $\{\beta_{n-1}, n \in N\}$, которые удовлетворяют указанным выше рекуррентным соотношениям.

Вектор B_n остается неизменным для всех реализаций

$$B_n = (1, 0, \dots, 0) \in R^{v(n)}.$$

Наконец вектор C_n состоит из $v(n)$ элементов и имеет вид

$$C_n = \beta_0 e_{v(1)} \in R^{v(n)},$$

где

$$e_{v(1)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0).$$

$v(1)$

Для этих значений системного представления последовательность $\{Z_n, n \in N\}$ является полным вложенным семейством частичных минимальных реализаций последовательности p . Таким образом, реализация $Z_n = (A_n, B_n,$

$C_n)$ однозначно определяется полиномами $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ и числами $\{\beta_0, \dots, \beta_{n-1}\}$.

3. Проблема точности ММР и системный синтез.

В общем случае проблема минимальной реализации имеет более одного решения. Более того, поскольку на практике приходится иметь дело с приближенными измерениями и вычислениями, то задача построения минимальной реализации, вообще говоря, относится к разряду некорректных задач.

Отметим, что проблема точности идентификации динамических систем методом МР имеет как минимум два аспекта. Во-первых, марковские параметры могут меняться при измерениях, а это автоматически приводит к дискретным изменениям результата, например, возрастает порядок реализации. Существует понятие ошибки измерительных приборов (усилителей биопотенциалов, интеграторов, аналого-цифрового преобразователя), что приводит к возникновению последовательности погрешностей $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_N)$. Эти погрешности приводят к новой последовательности p , в которой каждое $p_k \in [p_k - \mu_k, p_k + \mu_k]$. Таким образом возникает необходимость в двойной точности, так как при вычислении матриц, детерминантов происходит накопление ошибок на каждом шаге вычислений (например, из-за больших размерностей ганкелевых матриц).

С другой стороны, задача точности может быть рассмотрена в аспекте совпадения экспериментальных кривых с полученными теоретически. Такое совпадение можно иметь с очень

маленькой погрешностью, однако при этом возрастает порядок МР. В пределе можно добиться совпадения этих кривых, если размерность минимальной реализации будет совпадать с количеством точек дискретизации кривой. В экспериментах автора с РНС период квантования аналогового сигнала с эфферентных нервов лежал в пределах 1-10 мсек, а периоды наблюдения (эпохи) не менее 5-7 мсек. или даже до 5 мин. Таким образом, число экспериментальных точек может исчисляться тысячами, но использовать такие порядки МР вряд ли целесообразно. Поэтому в реальных вычислениях задавались погрешности, которые обеспечивали точность 1-5 % (от амплитуды регистрируемых сигналов) и при этом размерность МР была не более 7-9. В ряде биологических экспериментов погрешность доходила до 10 %.

Если использовать ММР для построения нелинейных моделей непосредственно, то резко возрастает размерность реализации (например, из-за шумов входных сигналов или сложной динамики поведения БДС). В этой связи для компартментных БДС предлагается некоторая упрощенная процедура идентификации моделей нелинейного поведения, например, нейронных сетей, основанная на исследовании квазилинейного поведения БДС.

Точность идентификации методом МР параметров БДС может быть недостаточной. В случае нелинейного поведения БДС ММР использовался только для выяснения структуры модели, а для получения точных значений параметров использовался

метод адаптивного идентификатора (АИ). Программное обеспечение АИ основывается в ряде теоретических представлений. В частности, адаптивный идентификатор – это фактически градиентный метод решения задачи наименьших квадратов. Если вход на систему управления произволен, то, адаптируя систему по наблюдаемому сигналу, можно использовать результат для отслеживания исходного сигнала. В этом случае можно гарантировать, что ошибка выхода стремится к 0. При этом все переменные фазового состояния могут и не совпадать.

Идеология подстройки модели под объект следующая. Пусть $u(t)$ – вход в систему управления, которую мы собираемся идентифицировать, а $y(t)$ – выход этой системы. Пусть на модель, которую мы будем адаптировать с использованием алгоритма адаптивной идентификации, подается тот же самый вход $u(t)$, а $\hat{y}(t)$ – выход этой модельной системы. Обозначим через $e(t)$ разность между $y(t)$ и $\hat{y}(t)$, т.е. $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. Идеология подстройки модели под объект, когда вход в объект $u(t) \neq 0$, такова, чтобы в любой момент времени t выполнялось $e(t) \rightarrow 0$.

Существуют несколько алгоритмов решения этой проблемы. Нами используется алгоритм, разработанный для идентификации систем с многомерным входом и многомерным выходом. В основе алгоритма лежит результат построения АИ для линейного многомерного случая, в котором объект описывается известным уже разностным уравнением:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \text{ (при } x(0) = x_0) \\ y(k) &= cx(k). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь x – n -мерный вектор состояния реального объекта, $u \in R^r$ – вектора входа, $y \in R^m$ – вектора выхода, тройка $(A, B, C)_m$ – системное представление. Предполагается, что пара (C, A) наблюдаемая.

Метод основан на использовании оригинальной канонической формы адаптивной системы управления вида:

$$z(k+1) = A_m z(k) - \alpha y(k) + \beta u(k), z(0) = z_0$$

$$y(k) = P_m z(k),$$

где: $P_m = [I_m, I_m, \dots, I_m] \in R^{m \times md}$ (d – индекс наблюдаемости), $z(k) = [z_1^T(k), \dots, z_2^T(k), \dots, z_d^T(k)]^T \in R^n$ – вектор

фазового состояния модели; $z_i^T(k) \in R^{m/d}$ – подвектор $z(k)$, $A_1 = \text{blok diag} \{-\lambda_i I\}_{i=1}^d \in R^{1d \times 1d}$ – фильтр модельной системы, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_d]^+ \in R^{n \times m}$ – матрица модельной системы, параметры которой нужно найти, $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d]^+ \in R^{n \times r}$ – тоже некоторая матрица, причем символ $+$ означает блочное транспонирование этих матриц.

Программная реализация представленных выше алгоритмов показала высокую точность и быстрое действие процедуры параметрической идентификации моделей РНС в управляемом биологическом эксперименте. Таким образом, использование перечисленных методов идентификации позволяет строить компартментные модели различных БДС в m -мерном пространстве состояний. Однако остаются открытыми вопросы выбора оптимальных периодов квантования аналоговых сигналов от биообъектов и необходимой (достаточной) длительности всего интервала наблюдения T (напомним, что

$T \leq (2m+1)\tau$), а также длительности τ ВУВ [5, 10, 11].

Итак, одним из распространенных методов исследования динамических систем, находящихся в состоянии биологического равновесия, является метод анализа отклика этих систем на внешнее воздействие. При этом предполагается, что в условно стационарном состоянии переменные изучаемых систем либо постоянные, либо совершают некоторые колебания вокруг среднего уровня (небольшие флуктуации в пределах малых параметров).

Отметим, что идентификация моделей с помощью ММР выполняется для ряда ФСО, находящихся в условно стационарных режимах при действии возмущающих факторов. При этом решение задачи мы выполняем из требования наименьшей размерности фазового пространства математической модели ЧЯ, который представляет исследуемую БДС. Разработанная программа [5, 6] на ЭВМ метода минимальной реализации позволяет:

а) построить линейную математическую модель вида (4) наименьшего порядка с заданной степенью точности и перевести ее в вид дифференциальных уравнений;

б) отыскивать диапазоны применимости линейного приближения сложного, нелинейного во всем диапазоне функционирования БДС динамического процесса;

в) отыскивать точки катастроф, соответствующие радикальным изменениям условий функционирования модели.

Под точками катастроф (или областями джокеров) мы будем понимать такие граничные области

функционирования реальных БДС вблизи стационарных точек, когда под действием некоторых внешних факторов или внутреннего изменения самой БДС (для адаптивных респираторных сетей, например) резко повышается порядок линейного приближения. Изучаемая динамическая система переходит в этом случае к нелинейным приближениям, появляются бифуркации более высокого порядка, возрастает сложность динамического ответа на предъявляемые входные воздействия. Последнее особенно важно на определенных этапах экспериментальных исследований, когда принципиально необходимо фиксировать структурные изменения БДС. Особо это касается ФСО пациентов, у которых значительно выражены патологические признаки и области джокеров для них могут соответствовать резким изменениям функций организма (могут быть даже приближения к смертельному исходу).

Эвристическим критерием применимости разработанного метода является получение в результате использования ММР модели невысокого порядка, практически $m < 7$. Соответственно и при отыскании диапазона применимости необходимо руководствоваться этим критерием. Сам алгоритм построения упрощенных моделей использует эмпирические данные между подаваемым на вход РНС воздействием и получаемым на выходе отклонением выходной переменной. Спецификой используемого алгоритма является возможность при увеличении наблюдаемого промежутка времени T выходной величины НС не искать всю

модель заново, а лишь достраивать ее в случае необходимости. Указанная процедура производится в точке положения равновесия системы (1). Рассмотрим конкретные примеры использования ММР для идентификации параметров синергизма у РНС в различных состояниях.

Использование представленных алгоритмов и подходов позволяющие разработать комплекс алгоритмов для идентификации параметров синергизма в ФСО на примере КРС и, в частности, для РНС, как составной части КРС. В основе разработанного нами метода идентификации полного синергизма или степени синергизма БДС лежат два условия, которые требуют выполнения, если мы будем применять ККП для идентификации синергизма в таких биосистемах, как КРС. Во-первых подразумевается, что исследуемые БДС могут быть представлены в виде компартментно-кластерных структур. Само понятие компартмент, как мы уже отмечали выше, объединяет совокупность некоторых одинаковых по функциям (морфология может быть даже различной) элементов, которые дают некоторый синергический эффект. Иными словами ККП и ККТБ в своей основе уже базируется на принципах синергизма, т.к. в основе компартментов лежит взаимодействие синергичных элементов.

Например, группа дыхательных нейронов может быть объединена в компартмент, если они выполняют общую функцию (формируют нарастание инспираторной активности – ramp – в начальный период инспирации – это компартмент ранних инспираторных нейронов). Аналогично мышечные клетки, которые

объединены в двигательную единицу, обеспечивают синхронную работу группы миофибрилл, т.е. компартмента. Именно для таких мышечных компартментов строилась стохастическая теория Антонца В.А. [2-3]. Однако в этой теории отсутствует возможность изменения размерности фазового пространства в ходе выполнения функций мышечной БДС.

В целом, можно привести много примеров компартментной [5, 6, 9-13] организации БДС на различных уровнях их функционирования (клеточном, уровень функциональных систем организма (ФСО) человека, популяционном уровне). Более того, компартменты могут организовывать кластеры и тогда можно говорить о синергических взаимоотношениях в кластерных системах. В последнем случае можно привести классический пример из области физиологии, когда мышцы, обеспечивающие сокращение (бицепс), образуют один кластер а мышцы разгибатели (трицепс) обеспечивают другое движение. При этом работа этих кластеров должна быть синергичной – при сгибании руки бицепс сокращается а трицепс расслабляется. Именно этот тип синергии впервые отметил Ч. Шеррингтон на рубеже 19-го и 20-го веков и именно он заложил основы науки синергетики в биологии.

Литература

1. Анохин П.К. Кибернетика функциональных систем. - М., Медицина, 1998. – 285 с.
2. Антонен В. А., Ковалева Э. П. Оценка управления статическим напряжением скелетной мышцы по ее микродвижениям. // Биофизика. - 1996.- Т. 41, вып. 3. – С. 711 - 717.
3. Антонен В. А., Ковалева Э. П. Статистическое моделирование произвольных микроколебаний конечности. // Биофизика. – 1996. – Т. 41, № 3. – С. 704 - 710.
4. Аршинов В.И., Войцехович В.Э. Синергетическое знание: между сетью и принципами // Синергетическая парадигма. – М.: Процесс-Традиция, 2000. - С. 107-120.
5. Ведясова О.А., Еськов В.М., Пашнин А.С., Попов Ю.М., Третьяков С.А. Идентификация синергизма и интервалов устойчивости в респираторных нейросетях. // Нейронауки, Донецк. - 2005. - Т.1, №1.- С.16 – 17.
6. Еськов В.М., Филатова О.Е., Фудин Н.А. и др. Проблема выбора оптимальных математических моделей в теории идентификации биологических динамических систем. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. - 2004. - Том 3., № 2. - С. 143-145.
7. Еськов В. М., Гавриленко Т.В., Еськов В.В., Пашнин А. С., Балтикова А. А. Программа персонифицированной оценки значимости отдельных диагностических признаков больного. // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ №2013611827 от 06 февраля 2013 г., РОСПАТЕНТ. – Москва, 2013.
8. Малинецкий Г.Г. Синергетика. Король умер. Да здравствует король! // Синергетика. Труды семинара. Вып. 1. – М.: МГУ, 1998. - С. 52-69.

9. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине. Часть X. Динамика поведения вектора состояния организма жителей Югры в условиях нормы и патологии. / Под ред. – 2011. В.М. Еськова, А.А. Хадарцева, Самара: Изд-во ООО «Офорт» (гриф РАН), 2012. – 186 с.
10. Eskov V.M.: The dependence of activity of cyclic respiratory neuron network with subcycles on damping coefficient // *Neural Network World* – 1996. – №1 – pp.57-67.
11. Eskov V.M.: Models of hierarchical respiratory neuron networks // *Neurocomputing*. – 1996. – Vol.11 – pp.203-226.
12. Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Kozlova V.V., Filatov M.A. Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems. // *Measurement techniques* - 2012 - Volume 55, Issue 9. – P. 1096-1101.
13. Filatova O.E., Zuevskaya T.Y., Popov Y.M., Pashnin A.S., Magamedov Sh.K., Filatov M.A. The investigation of biological dynamic system's homeostasis according to new compartmental-cluster's approaching. // *Information Technologies in Science, Education, Telecommunication and Business (IT+S&E'05)* – 2005. – P. 257-258.

systems - BDS, determining the degree of synergistic with the work of the BDS. It is becoming clear that without a definition of quantitative measures (values synergies) measure, to evaluate synergy BDS becomes impossible.

Key words: *order parameters, method of the minimum realization, brain fazaton, functional systems of an organism.*

COMPARTMENT-CLUSTER THEORY OF BIOSYSTEMS

*Pashnin A.S. Klyus I.V.
Berestin D. K. Umarov E.D.*

The solution of system synthesis is closely linked with the main tasks of the theory of chaos, self-organization. The latter is due to the terms of the synergistic operation of dynamic biological