

3. Лафкадио Хирн. Призраки и чудеса в старинных японских сказаниях. Кайданы / Пер. с англ. О.А. Павловской. – М.: ЗАО Центрполиграф, 2017. – 255 с.
4. Нихон сёки. Анналы Японии: В 2 т. / Пер. и коммент. Л. М. Ермаковой и А. Н. Мещерякова. Т. 1. Свитки I–XVI. – СПб.: Гиперион, 1997. – 496 с.
5. Нихон сёки. Анналы Японии: В 2 т. / Пер. и коммент. Л. М. Ермаковой и А. Н. Мещерякова.

- Т. 1. Свитки XVII–XXX. – СПб.: Гиперион, 1997. – 432 с.
6. О:кагами – Великое Зерцало. / Пер. с яп. Е. М. Дьяконовой. – СПб.: Гиперион, 2000. – 119 с.
7. Сэй Сёнагон. Записки у изголовья / Пер. со старояп. В. Марковой. – СПб.: ООО Издательство «Пальмира»; М.: «Книга по Требованию», 2018. – 352 с.

УДК 57.01

УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СИСТЕМ

Третьяков Сергей Анатольевич,

*канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики и информатики,
Сургутский государственный педагогический университет, г. Сургут*

АННОТАЦИЯ

Устойчивость сложных биологических динамических (БДС) систем является одним из наиболее сложных и крайне важных вопросов изучения биофизики сложных систем. Способность респираторных нейронных сетей (РНС) находится в различных динамических состояниях (относительного покоя, колебательном и переходном режиме, а так же хаотическом режиме) относит РНС к классу сложных БДС, что усложняет применение классических теорий устойчивости.

ABSTRACT

The stability of complex biological dynamic (BDS) systems is one of the most complex and extremely important issues in the study of the biophysics of complex systems. The ability of respiratory neural networks (RNS) is in various dynamic states (relative rest, oscillatory and transient mode, as well as chaotic mode) assigns RNS to the class of complex MDP, which complicates the application of classical theories of sustainability.

Ключевые слова: устойчивость биологических динамических систем, компартментная организация, параметры математической модели, идентификация.

Keywords: stability of biological dynamic systems, compartmental organization, parameters of the mathematical model, identification.

На сегодняшний день одним из основных инструментов изучения устойчивости физических и технических динамических систем (ФДС и ТДС) является теория Ляпунова (ТЛ). В классическом представлении системы можно разделить на линейные и нелинейные. Линейные системы описываются линейными дифференциальными уравнениями, и вопрос устойчивости сводится к определению знака действительных частей всех корней характеристического уравнения. Отметим так же, что линейные системы могут быть устойчивыми в большом (т.е. или устойчивыми или неустойчивыми). Процедуры Рауса и Гурвица или Найквиста и Михайлова эффективно решают такие вопросы [4,7].

Для нелинейных систем различают устойчивость в малом и в большом. Система может эффективно сопротивляться малым внешним воздействиям (т.е. возвращаться в начальное состояние при снятии внешних драйвов), но при значительных внешних стимулах выходить безвозвратно из первоначального состояния (возврат возможен, но при новых внешних воздействиях, т.е. с затратами энергии).

Существенные отличия биологических динамических систем (БДС) от технических динамических систем (ТДС) их сложная структура организа-

ции, постоянная изменчивость требует существенной корректировки понятия устойчивости БДС. Отметим, что устойчивость динамических систем рассматривается как нахождение систем в стационарном режиме (т.е. $dx/dt = 0$, где $x=(x_1, \dots, x_n)$ – вектор состояния системы (ВСС)). Для БДС данное условие не выполняется, так как в процессе функционирования биосистемы могут менять не только свои функции (например, изменяться соотношение между входом и выходом системы), но также может изменяться структура биосистемы, характер внутренних связей и даже иерархичность. БДС может постоянно флуктуировать по структуре и функциям. Примерами таких БДС могут служить нейросети мозга (НСМ), функциональные системы организма (ФСО), популяции и биосфера в целом [3].

В рамках теории Ляпунова при идентификации математических моделей сама модель априори уже известна и требуется идентифицировать параметры этой математической модели. В рамках функционирования БДС при идентификации ММ считаем, что все свойства и структурные связи БДС неизвестны, при этом исследуются соотношения между ее входом и выходом (т.е. используется подход - “черный ящик”) и по ответам БДС (параметрам y_i) с помо-

пью метода минимальной реализации (ММП), метода адаптивного наблюдателя (МАН) находится адекватная ММ. При этом сами эти модели и даже размерности фазового пространства состояний могут изменяться непрерывно. Выходная функция $y(t)$ может быть интегральной активностью эфферентных нервов, показателями кардио-респираторной функциональной системы организма (процент оксигемоглобина (ПО)) и т.д. Во всех этих случаях важно установить соотношение между величиной входного сигнала (вектором Vi) и выходной функцией $y = y(t)$.

Такой подход нами реализован на примере респираторных нейронных систем млекопитающих.

Реализация данного подхода основана на компартментно-кластерной теории биосистем.

Особенностью компартментной организации РНС является целый ряд принципов (постулатов).

1. РНС структура иерархическая
2. РНС обладает компартментной организацией.
3. Компартменты взаимодействуют между собой.
4. Существует рассеяние (диссипация) возбуждения в работе РНС (вектор bx).
5. Существуют обратные тормозящие связи между компартментами (функция $P(y)$).

6. Существуют внешние управляющие драйвы (вектор ud).

В результате простейшая компартментная модель РНС будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{j=1}^m a_{ij} p_j(y) x_j - bx_i + ud_i \\ y &= \sum_{i=1}^m c_i x_i \end{aligned} \quad (1)$$

$(i = 1 \dots m, i = j)$

где m – число компартментов, a_{ij} – коэффициент влияния j -того компартмента на i -тый, $P_j(y)$ – угнетающая связь, (отрицательная обратная связь), b – коэффициент диссипации, u – внешнее воздействие, d_j – чувствительность i -го компартмента к внешнему воздействию, c_i – весовые коэффициенты [2,6].

Проведенные биофизические эксперименты показали, что полученные общие решения пятикомпаратментной модели адекватно описывают режимы функционирования реальных РНС дыхательного центра экспериментальных животных (кошки).

На рис.1 приведен пример такой РНС.

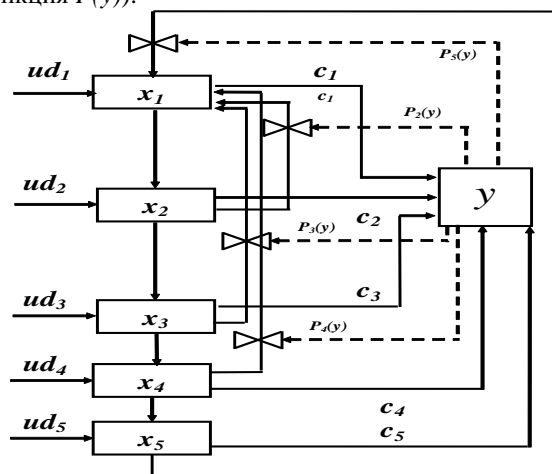


Рис. 1 Пятикомпаратментная модель РНС с подциклами, соответствующая модели (2).

Модель (1) для $m=5$ принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{12}P_2(y)x_2 + a_{13}P_3(y)x_3 - bx_1 + ud_1 \\ \dot{x}_2 &= x_1 - bx_2 + ud_2 \\ \dot{x}_3 &= x_2 - bx_3 + ud_3 \\ \dot{x}_4 &= x_3 - bx_4 + ud_4 \\ \dot{x}_5 &= x_4 - bx_5 + ud_5 \\ y &= c^T x \end{aligned} \quad (2)$$

В отличие от технических динамических систем характер движения БДС таков, что может меняться само фазовое пространство (его размерность), следовательно, меняется порядок модели и соответственно меняются коэффициенты математической модели.

Приведем другой алгоритм идентификации устойчивости БДС с учетом особенностей этих систем. Идентифицируется по выходу БДС (т.е. по параметрам y_i) в ответ на стандартные воздействия (электростимулы, например) линейное приближение ММ. Если при текущих значениях параметров внешнего воздействия матрица A и ее собственные значения не претерпевают существенных изменений, то система находится в устойчивом состоянии. Ширина интервала значений параметров внешних воздействий при которых значения матрицы A и ее инварианты не меняются значительно, определяет устойчивость БДС [1,2].

В рамках нового подхода на внешние реальные воздействия исследуются получаемые по ответам

от БДС (параметрам Y_i) математические модели (в реальном времени), например, в виде систем разностных уравнений вида:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = C^T x(t).$$

Путем изменения параметров внешних воздействий, идентифицируются и исследуются получаемые по определенным программам матрицы A и их собственные значения. Если при изменении длительности или амплитуды (энергии E) воздействия не изменяются существенно инварианты матрицы A , то мы считаем, что БДС не претерпевает существенных изменений (т.е. система находится вблизи некоторого аттрактора). По нашим наблюдениям для респираторных нейросетей такой аттрактор существует.

С учетом вышесказанного следует потребовать выполнения двух условий:

1. Точность измерения параметров моделей (матрица A , ее собственные значения λ_i , и вектора B и C) должно быть в пределах $r = 5 - 10\%$ от величины выходного сигнала $y = y(t)$.

2. Размерность идентифицируемого вектора состояний x $m \leq 7$ (требование минимизации порядка фазового пространства).

В силу того, что параметры r и m по поведению противоположны, существуют оптимальные значения r и m .

На следующем этапе необходимо анализировать устойчивость порядка матрицы A (вектора X и размерности m фазового пространства), а также собственных значений матрицы A . Теперь именно инварианты матрицы определяют динамику БДС в ответ на внешние воздействия или внутренние перестройки самой биосистемы, которые (как показали наши исследования) могут постоянно происходить с любой БДС [5,6].

Данная процедура была продемонстрирована на примере исследования устойчивости респираторных нейронных сетей дыхательного центра млекопитающих и описана в многочисленных работах коллектива и в диссертационном исследовании автора статьи.

Полученные результаты экспериментов позволяют утверждать, что применение к респираторным

нейросетям традиционный подход “феномен – модель – повторный феномен в сравнении с моделью” дает слабый результат. Разработанный метод автоматизированной идентификации стационарных режимов и интервалов устойчивости реальных РНС в рамках компартментного подхода существенно отличается от традиционных методов исследования в рамках детерминистского подхода (например, метода А.М. Ляпунова).

Литература.

1. Бакусов Л.М., Сафин Ш.М., Насыров Р.В. Компартментные модели нейронных механизмов усвоения закономерностей на основе теории самообучающихся рекурсивных фильтров. // ВНМТ. - 2002. - Том IX. - №3. - С. 72 – 75.

2. Ведясова О.А., Еськов В.М., Филатова О.Е. Системный компартментно-кластерный анализ механизмов устойчивости дыхательной ритмики млекопитающих. Монография.-Самара: Российская академ. наук, Науч. совет по проблемам биологической физике.

3. Еськов В.М., Кулаев С.В., Попов Ю.М., Филатова О.Е. Применение компьютерных технологий при измерении нестабильности в стационарных режимах биологических динамических систем // Измерительная техника. - 2006 - № 1. - С. 40-45.

4. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е. Синергетика в клинической кибернетике. Часть I. Теоретические основы системного синтеза и исследований хаоса в биомедицинских системах / Под ред. Григорьева А.И. –Самара: ООО «Офорт», 2006. – 233 с.

5. Еськов В.М. Синергетика в клинической кибернетике. Часть II. Особенности саногенеза и патогенеза в условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры / В.М. Еськов, А.А. Хадарцев, О.Е. Филатова. – Самара: ООО «Офорт», 2007. – 292 с.

6. Еськов В.М. Введение в компартментную теорию респираторных нейронных сетей. - 1994, М.: Наука. – 167 с.

7. Еськов В.М., Филатова О.Е., Иващенко В.П. Компьютерная идентификация иерархических компартментных нейронных сетей. // Измерительная техника. - 1994. - №8. - С. 27-30.

8. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Особые свойства биосистем и их моделирование//Вестник новых медицинских технологий.-2011.-Т. 18, № 3.- С. 331-332.