

БИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКОЙ ЗАДАЧИ

А. Б. БУШУЕВ¹, В. Ю. БАЖИН², Ю. В. ЛИТВИНОВ¹,
В. А. ПЕТРОВ¹, О. К. МАНСУРОВА²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bushuev@inbox.ru

²Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Россия

Процесс решения изобретательской задачи по алгоритму решения изобретательских задач предполагает переход от прототипа изобретения к формированию технического противоречия между его двумя альтернативными свойствами. Поэтому процесс рассматривается как гомеостатическое бинарное деление биологической клетки. Математической моделью является аттрактор Лоренца, для которого показано, что графики энергий обоих гомеостатов „мать—дочка“ совпадают. Приведен пример решения изобретательской задачи в опыте Бенара, в котором найдены противоречия между температурой и скоростью потока частиц. Разрешение противоречия приводит к нарушению симметрии и возникновению замкнутых петель конвекции. Для оценки асимметрии аттрактора предложен новый численный метод расчета по структуре системы нелинейных дифференциальных уравнений. На основе системы уравнений в базисе физических координат строится информационно-энергетическая схема аттрактора, для которой введены понятия матриц входных и выходных сигналов, а также передаточных матриц блоков. Схема не зависит от начальных и граничных условий, а также численных значений коэффициентов аттрактора, а зависит только от физических размерностей входов и выходов блоков. Графическое представление структуры с передаточными матрицами позволяет найти вертикальную ось симметрии аттрактора и определить степень асимметрии по отношениям ресурсоемкости левой и правой частей.

Ключевые слова: аттрактор Лоренца, энергия гомеостаза, бинарное деление клетки, оценка асимметрии структуры, АРИЗ, прототип, техническое противоречие

Введение. Передача наследственной информации последующим поколениям техники осуществляется человеком при проектировании и изготовлении технических систем. В области патентного права, в сфере изобретательства изобретению передаются некоторые свойства прототипа, позволяющие реализовать заданную функцию посредством конструктивных признаков. В частности, в алгоритме решения изобретательских задач (АРИЗ) [1] механизм передачи информации представляет собой цепь противоречий, образующих конфликт альтернативных свойств изобретения. Для формирования технического противоречия (ТП) в конструкции прототипа выбираются два элемента — инструмент и изделие: например, при токарном точении — резец и деталь. Модель их взаимодействия в системе суждений изобретателя представляет гомеостаз [2] единства и борьбы двух альтернативных свойств — быстроты действия и точности обработки. Гомеостаз относится к свойствам живой природы и используется для моделирования процессов передачи наследственной информации на генетическом уровне [3]. Математические модели развития популяций в техническом творчестве позволяют автоматизировать процесс решения изобретательских задач [4]. В работе [5] математическая модель гомеостаза строится на основе системы уравнений развития популяций, которая, для режима поиска решения, приведена к системе трех нелинейных дифференциальных

уравнений аттрактора Рёсслера. Показано, что энергия ведущего гомеостата, образованного альтернативными „родительскими“ свойствами ТП прототипа, зеркально передается энергии ведомого гомеостата, образованного свойством нового решения и одним из „родительских“ свойств ТП прототипа. Для моделирования процесса получения нового решения путем бинарного деления „материнской“ клетки на „дочерние“ в настоящей статье предлагается использовать аттрактор Лоренца. Поставим задачу — методом графического анализа решений системы нелинейных дифференциальных уравнений определить физический смысл координат прототипа, которые в уравнениях Лоренца задают альтернативные свойства ТП, а также найти численную оценку нарушения симметрии в структуре уравнений Лоренца.

Аттрактор Лоренца. Система уравнений аттрактора Лоренца имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sigma(y - x); \\ \dot{y}(t) &= x(r - z) - y; \\ \dot{z}(t) &= xy - b, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ — координаты аттрактора; $\sigma=10$, $r=28$, $b=8/3$ — коэффициенты, задающие режим хаотических колебаний координат; t — текущее время.

Впервые система (1) была получена Э. Лоренцом для задачи о конвекции морской воды в плоском слое [6]. Наиболее известные применения модели Лоренца в физических задачах — это конвекция в замкнутой петле, вращение водяного колеса, модель однододового лазера, диссипативный гармонический осциллятор с инерционной системой [7].

Будем рассматривать систему уравнений (1) как треугольную динамическую структуру в виде графа [8], вершины которого — координаты $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, а ребра — бинарные отношения R между координатами, т.е. xRy , xRz , yRz .

С точки зрения гомеостатики бинарные отношения R определяют гомеостаты вынужденных движений координат под действием друг друга и структурно задают модель так называемого „малого коллектива“ [2], имеющего два уровня иерархии — уровень руководителя и уровень исполнителей.

Рассмотрим графики координат аттрактора (рис. 1), построенные для начальных условий $x(0)=5,9$, $y(0)=5,1$, $z(0)=4,8$. Замечаем, что $z(t)$ отличается от $x(t)$ и $y(t)$ наличием существенной постоянной составляющей, относительно которой происходят хаотические колебания. В то же время графики $x(t)$ и $y(t)$ похожи друг на друга и имеют постоянную составляющую, близкую к нулю. Характер процессов сохраняется и при других начальных условиях, за исключением начального процесса втягивания аттрактора в колебания. Следовательно, координата $z(t)$ отвечает за действия руководителя, а координаты $x(t)$ и $y(t)$ — за действия исполнителей на нижнем уровне иерархии. С другой стороны, если рассматривать аттрактор как модель клетки в преддверии митоза, то руководитель $z(t)$ может рассматриваться как материнская клетка, а исполнители $x(t)$ и $y(t)$ — как дочерние клетки. И, наконец, с третьей стороны — решения изобретательской задачи, координата $z(t)$ характеризует свойство прототипа, а координаты $x(t)$ и $y(t)$ характеризуют два альтернативных свойства технического противоречия.

Определим мощности $P_{xz}(t)$ и $P_{yz}(t)$ и энергии $E_{xz}(t)$ и $E_{yz}(t)$ взаимодействия дочерних и материнской клеток:

$$P_{xz}(t) = x(t)z(t), P_{yz}(t) = y(t)z(t), E_{xz}(t) = \int_0^t P_{xz}(t)dt, E_{yz}(t) = \int_0^t P_{yz}(t)dt,$$

где произведения координат в гомеостатике определяют партнерские бинарные отношения, а в теории развития популяций отвечают за передачу наследственной информации.

Аналогично определяются мощность и энергия гомеостата дочерних клеток:

$$P_{xy}(t) = x(t)y(t), E_{xy}(t) = \int_0^t P_{xy}(t) dt.$$

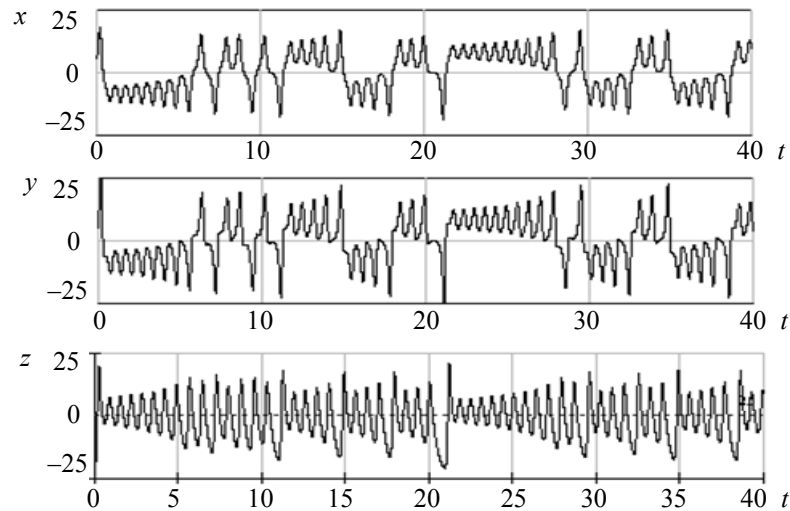


Рис. 1

Графики энергий приведены на рис. 2, из которого следует, что энергии гомеостатов $E_{xz}(t)$ и $E_{yz}(t)$ практически совпадают и ограничены. Это означает, что обеим дочерним клеткам передается одинаковая энергия, т.е. перед митозом альтернативные свойства ТП в системе суждений изобретателя равнозначны и энергетически установились в некоторой ограниченной области. Энергия взаимного гомеостата дочерних клеток $E_{xy}(t)$, являющаяся, по сути, внутренней энергией материнской клетки, неограниченно возрастает, следовательно, свойство прототипа неустойчиво, гомеостат альтернативных свойств ТП готов к распаду. В АРИЗ такая ситуация эквивалентна выбору ТП-1 или ТП-2, определяющих главный производственный процесс изобретательской задачи, заданный ее названием.

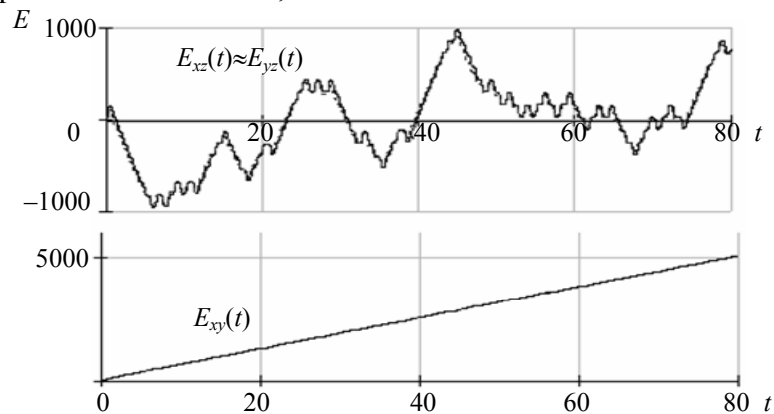


Рис. 2

Пример изобретательской задачи. Рассмотрим физическую задачу о конвекции в замкнутой петле в опыте Бенара [9]. В этом опыте нагревают снизу узкий слой жидкости, размещенный между двумя листами стекла (рис. 3). Если разность ΔT температур нижнего T_1 и верхнего T_2 стеклов не превышает некоторого критического значения $\Delta T < \Delta T_{кр}$, то температура от T_2 до T_1 увеличивается практически линейно и энергия в верхний лист передается за счет теплопроводности.

При $\Delta T > \Delta T_{кр}$ по всему слою жидкости возникают ячейки Бенара, образованные восходящими и нисходящими потоками частичек, тепло передается конвекцией. Соседние ячейки вращаются в противоположных направлениях. При моделировании конвекции, в соответствии с уравнениями (1), координаты аттрактора приобретают следующие значения: $x(t)$ —

скорость течения, $y(t)$ — отклонение температуры от средней в точке, отстоящей от нижней точки петли на 90° , $z(t)$ — то же, но в нижней точке с температурой T_1 .

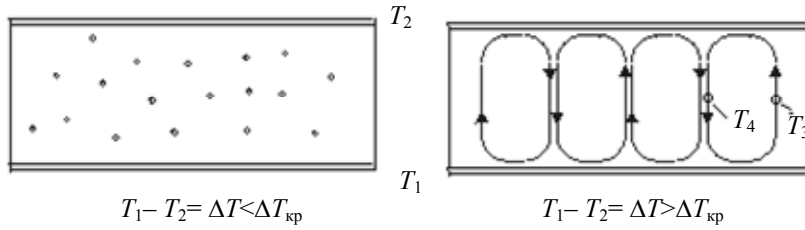


Рис. 3

Будем рассматривать задачу в режиме теплопроводности как прототип технической системы, а режим возникновения конвекции — как изобретение. Нежелательный эффект прототипа — низкая теплопередача. Прототип как материнская клетка имеет свойство $z(t)$, т.е. температуру источника тепла T_1 (с учетом отклонения от средней). Сформулируем ТП для точки петли с температурой T_3 (см. рис. 3), характеризуемой свойством $y(t)$ для момента, когда $T_3 - T_2 = \Delta T_{кр}$. В этот момент в точке с температурой T_3 под действием нагрева зарождается поток восходящих частичек, начинается первый участок петли конвекции (от T_3 до T_2). Появляется скорость течения $x(t)$. Нагретые частички жидкости поднимаются до верхнего стекла, охлаждаются до температуры T_2 , сжимаются, их удельный вес увеличивается, и они начинают опускаться навстречу поднимающимся горячим частичкам, тормозя их и охлаждая. В этом и заключается ТП, т.е. увеличение температуры в результате приводит к появлению течения холодных частичек с направленной вниз скоростью $x(t)$, которые уменьшают нагрев $y(t)$ в точке с температурой T_3 .

Разрешение противоречия, т.е. решение изобретательской задачи, происходит по стандартному АРИЗ, а именно разнесению противоречивых свойств в пространстве. Поток нисходящих частиц сдвигается в сторону и замыкает петлю конвекции, проходя через точку с температурой T_4 .

Сечение yz (рис. 4) аттрактора Лоренца показывает две соседние петли конвекции — левая вращается по часовой стрелке, а правая — против часовой. Петли находятся в состоянии гомеостата, т.е. обмениваются частичками, несущими энергию наследственной информации. Простейшая оценка количества информации, генерируемой ячейками Бенара при их возникновении, оценивается в 1 бит, когда апостериори определяется направление вращения ячейки в определенной точке, например с температурой T_3 . В АРИЗ получение этой информации эквивалентно выбору ТП-1 или ТП-2 либо выбору знака (+/-) при поиске математической величины.

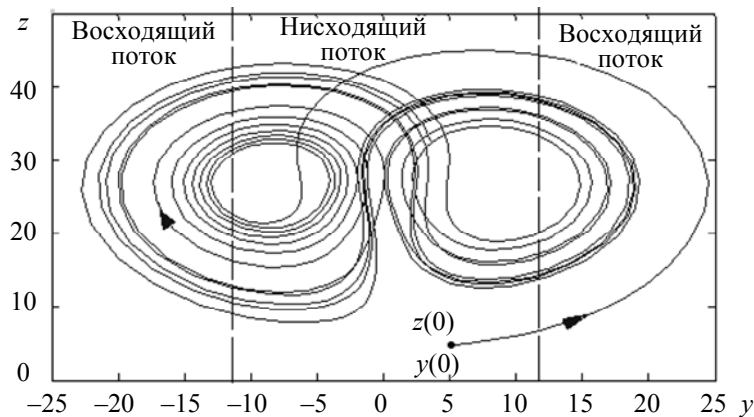


Рис. 4

Оценка степени нарушения структурной симметрии уравнений аттрактора. Нарушение симметрии является важнейшим условием получения новых знаний. В АРИЗ нарушение симметрии прототипа, имеющего одно нежелательное свойство, приводит к противоре-

чению между двумя техническими свойствами и последующему выбору одного из них. В опыте Бенара структура жидкости до достижения критической точки физически симметрична. В за- критической области появляются ячейки, в которых частички жидкости, вследствие нарушения устойчивости, „перескакивают“ с лепестка на лепесток в процессе каскада бифуркаций (см. рис. 4). В работе [10] отмечается, что для большинства природных структур характерна сильная асимметрия, которая отражается при моделировании асимметрией начальных и граничных условий при решении дифференциальных уравнений. В гомеостатике [2], согласно третьему постулату Ю. М. Горского, необходимым условием устойчивости гомеостата является непревышение определенной степени асимметрии антагонистов по входным сигналам, начальным условиям, параметрам и степени устойчивости. Например, в уравнениях развития популяций

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_1x(t)y(t) + b_1x(t); \\ \dot{y}(t) = a_2x(t)y(t) + b_2x(t), \end{cases}$$

где $x(t)$ и $y(t)$ — число особей мужского и женского пола, a_i и b_i , $i=1, 2$, — коэффициенты рождаемости и смертности соответственно, асимметрия заключается в выборе разных начальных условий $x(0)$ и $y(0)$, коэффициентов a_1 и a_2 , b_1 и b_2 . Однако структурно оба уравнения симметричны относительно друг друга, чего нельзя сказать о системе уравнений (1) аттрактора Лоренца.

Оценим степень нарушения симметрии в системе (1), составив ее информационно-энергетическую схему (ИЭС) [11]. ИЭС формируется как схема моделирования дифференциальных уравнений, например, в программной среде MatLab, причем координаты $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ и коэффициенты σ , r , b должны иметь реальные физические размерности. Рассмотрим пример опыта Бенара, где переменные y и z измеряются в температурных градусах, а переменная x , как скорость потока — в метрах в секунду. Тогда размерности производных в левой части уравнений системы (1) получаются делением соответствующих координат на секунду. Для вычитания слагаемых в правой части уравнений (1) введем коэффициенты размерностей, тогда система приобретет следующий вид:

$$\left. \begin{cases} \frac{dx}{dt} = c_1\sigma y - \sigma x; \\ \frac{dy}{dt} = xr - c_2xz - c_3y; \\ \frac{dz}{dt} = c_4xy - bz. \end{cases} \right\} \quad (2)$$

Таким образом, для формирования ИЭС необходимы следующие блоки: 3 интегратора, 2 множителя, 3 сумматора и 7 усилителей для моделирования коэффициентов $c_1\sigma$, σ , r , c_2 , c_3 , c_4 , b . Для обозначения сигналов на входах и выходах блоков введем симметричные диагональные 2×2 -матрицы, например, для сигнала x :

$$x = \begin{bmatrix} L^m & 0 \\ 0 & T_B^n \end{bmatrix},$$

где m и n — показатели степени основных единиц длины L и времени T_B в системе кинематических величин Бартини [12, 13].

Тогда передаточная матрица W блока равна произведению матрицы выходного сигнала на обратную матрицу входного сигнала, например, передаточная матрица любого интегратора

по времени равна $\begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T_B^1 \end{bmatrix}$. Приведем матрицы переменных аттрактора с размерностями в ба-

зисе LT_B Бартини для температуры $y=z$ и скорости потока x : $y = z = \begin{bmatrix} L^5 & 0 \\ 0 & T_B^{-4} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T_B^{-1} \end{bmatrix}$.

На основании матриц входных и выходных сигналов рассчитаны передаточные матрицы всех блоков аттрактора и из передаточных матриц блоков составлена ИЭС (рис. 5, а).

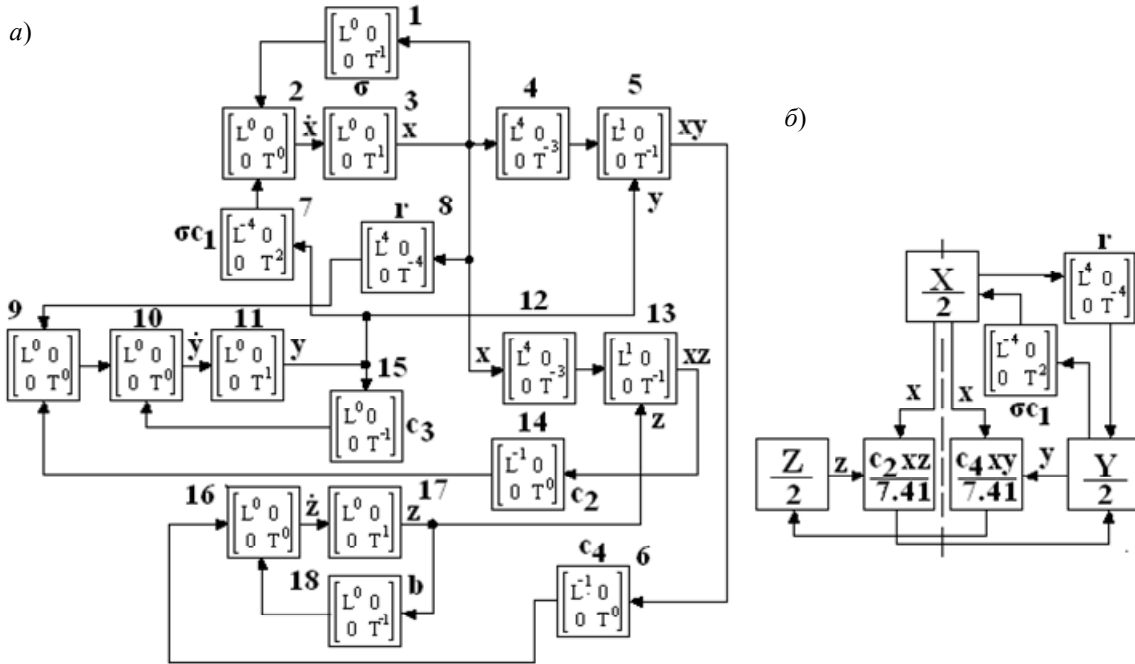


Рис. 5

Выделяем три идентичные структуры интегрирующих узлов переменных: x — блоки 1, 2, 3 с сумматором и обратной связью σ ; y — блоки 9, 10, 11, 15 с сумматором и обратной связью c_3 ; z — блоки 16, 17, 18 с сумматором и обратной связью b . „Сворачиваем“ каждый узел в три одинаковых блока, обозначенные на рис. 5, б как X, Y, Z соответственно. Аналогично „сворачиваются“ два узла блоков умножения: xy — блоки 4, 5, 6 с коэффициентом c_4 и xz — блоки 12, 13, 14 с коэффициентом c_2 . Анализ свернутой структуры (см. рис. 5, б) показывает, что вертикальная ось симметрии проходит через блок X , а нарушают симметрию блоки σ_{c1-7} и $r-8$ (см. рис. 5, а).

Введем понятие ресурсоемкости блока [14—16]:

$$R = \sqrt{m^2 + n^2}.$$

Общая ресурсоемкость ИЭС равна сумме ресурсоемкостей блоков; ресурсоемкость свернутых узлов приведена под их названиями на рис. 5, б. Численно степень нарушения симметрии γ в аттракторе определяется как отношение ресурсоемкости правой части структуры к ее левой части:

$$\gamma = \frac{1+2+7,41+\sqrt{(-4)^2+2^2}+\sqrt{4^2+(-4)^2}}{1+2+7,41} = 2,15.$$

Заключение. В результате анализа структуры и решений дифференциальных уравнений установлено, что аттрактор Лоренца представляет собой двухуровневый гомеостат, на верхнем уровне которого эквивалентом материнской клетки является прототип изобретения, обладающий симметрией. При нарушении симметрии состояние прототипа становится неус-

тойчивым, появляются дочерние клетки, вырабатывающие альтернативные свойства технического противоречия в результате гомеостаза с материнской клеткой.

Предложен метод численной оценки степени асимметрии системы нелинейных дифференциальных уравнений, не зависящий от начальных условий и коэффициентов уравнений. Метод предполагает расчет ресурсоемкости информационно-энергетической структуры в базе физических координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтишуллер Г. С.* Найти идею: Введение в ТРИЗ — теорию решения изобретательских задач. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 400 с.
2. *Горский Ю. М.* Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония в живых, природных, социальных и искусственных системах. Иркутск: ИГЭА, 1998. 337 с.
3. Homeostasis in a feed forward loop gene regulatory motif / *F. Antoneli, M. Golubitsky, I. Stewart* // J. of Theoretical Biology. 2018. Vol. 445. P. 103—109. DOI: 10.1016/j.jtbi.2018.02.026.
4. *Albers A., Leon-Rovira N., Aguayo H., Maier T.* Development of an engine crankshaft in a framework of computer-aided innovation // Computers in Industry. 2009. Vol. 60, iss. 8. P. 604—612. DOI: 10.1016/j.compind.2009.05.017.
5. *Бушуев А. Б., Чепинский С. А.* Хаотические гомеостаты // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 11. С. 59—63.
6. *Лоренц Э.* Детерминированное непериодическое движение // Странные аттракторы: Сб. статей / Пер. с англ.; Под ред. *А. Н. Колмогорова, С. П. Новикова*. М.: Мир, 1981. С. 88—116.
7. *Ланда П. С.* Нелинейные колебания и волны. М.: Либроком, 2010. 552 с.
8. *Бушуев А. Б., Быстров С. В., Григорьев В. В.* Анализ треугольных динамических структур // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 59—66.
9. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 344 с.
10. *Николис Дж.* Динамика иерархических систем: Эволюционное представление: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 488 с.
11. *Бушуев А. Б.* Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 3—7.
12. *Бартини Р. О., Кузнецов П. Г.* О множественности геометрий и множественности физик // Проблемы и особенности современной научной методологии: Сб. Свердловск: АН СССР, Урал. науч. центр., 1978. С. 55—65.
13. *Di Bartini R. O.* Relations between physical constants // Progress in Physics. 2005. Vol. 3. P. 34—40.
14. *Бушуев А. Б.* Векторный анализ ресурсов // Развитие инструментов решения изобретательских задач: Сб. науч. работ (Библиотека Саммита разработчиков ТРИЗ). СПб, 2008. Вып. 2. С. 48—57.
15. *Бушуев А. Б., Петров В. А.* Имитационное моделирование систем управления в LT-базисе // Тр. Восьмой Всерос. науч.-практ. конф. „Имитационное моделирование. Теория и практика“ (ИММОД-2017). СПб, 2017. С. 88—93.
16. *Bushuev A. B., Kudriavtseva V. A.* Simulation of the block diagrams of the information energy converters // Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Applied Energy (IAPE'19), Oxford, UK. 2019. N 272. P. 40.

Сведения об авторах

- Александр Борисович Бушуев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: bushuev@inbox.ru
- Владимир Юрьевич Бажин** — д-р. техн. наук, доцент; Горный университет, кафедра автоматизации технологических процессов и производств
- Юрий Володарович Литвинов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: yur113@yandex.ru
- Вадим Аркадьевич Петров** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: petrov_vadim_a@mail.ru

Ольга Карибековна Мансурова

— канд. техн. наук, доцент; Горный университет, кафедра автоматизации технологических процессов и производств;
E-mail: erke7@mail.ruПоступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Бушувев А. Б., Бажин В. Ю., Литвинов Ю. В., Петров В. А., Мансурова О. К. Биологическая модель поиска решения изобретательской задачи // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 851—859.

BIOLOGICAL MODEL FOR FINDING SOLUTIONS TO AN INVENTIVE PROBLEM

A. B. Bushuev¹, V. Yu. Bazhin², Yu. V. Litvinov¹,
V. A. Petrov¹, O. K. Mansurova²¹ ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: bushuev@inbox.ru² St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia

The process of solving an inventive problem by the known specialized algorithm involves transition from a prototype to technical contradiction between two alternative properties. Therefore, the process is considered as a homeostatic binary division of a biological cell. The mathematical model is the Lorenz attractor, for which it is shown that the energy graphs of both mother-daughter homeostats coincide. An example of solving the inventive problem in the Benard experiment, in which the contradictions between the temperature and the velocity of the particle flow are found, is given. The resolution of the contradiction leads to a violation of symmetry and the appearance of closed convection loops. To estimate the attractor asymmetry, a new numerical method for calculating the structure of a system of nonlinear differential equations is proposed. Based on a system of equations in the basis of physical coordinates, an information-energy scheme of the attractor is constructed, for which the concepts of matrices of input and output signals, as well as transfer matrices of blocks are introduced. The scheme does not depend on the initial and boundary conditions, as well as the numerical values of the attractor coefficients, but only on the physical dimensions of the inputs and outputs of the blocks. The graphical representation of the structure with transfer matrices allows to find the vertical axis of the attractor symmetry and to determine the degree of asymmetry in the relations of resource consumption of the left and the right parts.

Keywords: the Lorenz attractor, energy homeostasis, binary cell division, evaluation of the asymmetry of the structure, ARIZ, prototype, technical contradiction

REFERENCES

1. Al'tshuller G.S. *Nayti ideyu: Vvedeniye v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach* (Find an Idea: Introduction to TRIZ – Theory of Inventive Problem Solving), Moscow, 2007, 400 p. (in Russ.)
2. Gorskiy Yu.M. *Osnovy gomeostatiki. Garmoniya i disgarmoniya v zhivyykh, prirodnykh, sotsial'nykh i iskusstvennykh sistemakh* (The Basics of Homeostatics. Harmony and Disharmony in Living, Natural, Social and Artificial Systems), Irkutsk, 1998, 337 p. (in Russ.)
3. Antoneli F., Golubitsky M., Stewart I. *Journal of Theoretical Biology*, 2018. Vol. 445. pp. 103—109. DOI: 10.1016/j.jtbi.2018.02.026.
4. Albers A., Leon-Rovira N., Aguayo H., Maier T. *Computers in Industry*, 2009, no. 8(60), pp. 604—612. DOI: 10.1016/j.compind.2009.05.017.
5. Bushuev A.B., Chepinskiy S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2007, no. 11(50), pp. 59—63. (in Russ.)
6. Lorenz E.N. *Deterministic Nonperiodic Flow In: Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, no. 2(20), pp. 130—141.
7. Landa P.S. *Nonlinear Oscillations and Waves in Dynamical Systems*, Amsterdam, Springer, 1996, 544 p.
8. Bushuev A.B., Bystrov S.V., Grigor'yev V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp. 59—66. (in Russ.)
9. Nicolis G., Prigogine I. *Exploring Complexity*, St. Martin's Press, 1989, 328 p.
10. Nicolis G. *Dynamics of hierarchical systems: an evolutionary approach*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1986.
11. Bushuev A.B. *Measurement Techniques*, 2017, no. 9(60), pp. 857—862.
12. Bartini R.O., Kuznetsov P.G. *O mnozhestvennosti geometriy i mnozhestvennosti fizik. Problemy i osobennosti sovremennoy nauchnoy metodologii* (On the Multiplicity of Geometries and the Multiplicity of Physicists. Problems and Features of Modern Scientific Methodology), Sverdlovsk, 1978, pp. 55—65. (in Russ.)
13. di Bartini R.O. *Progress in Physics*, 2005, October, vol. 3, pp. 34—40.

14. Bushuev A.B. *Razvitiye instrumentov resheniya izobretatel'skikh zadach / Sbornik nauchnykh rabot. Biblioteka Sammita Razrabotchikov TRIZ (Development of Tools for Solving Inventive Problems / Collection of Scientific Papers. TRIZ Developer Summit Library)*, St. Petersburg, 2008, no. 2, pp. 48–57. (in Russ.)
15. Bushuev A.B., Petrov V.A. *Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika (IMMOD-2017) (Simulation. Theory and Practice" (IMMOD-2017))*, Proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2017, pp. 88–93. (in Russ.)
16. Bushuev A.B., Kudriavtseva V.A. *Proceedings of the Intern. Conference on Innovative Applied Energy (IAPE'19)*, UK, Oxford, 2019, no. 272, pp. 40.

Data on authors

- | | | |
|-----------------------------|---|--|
| Alexander B. Bushuev | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: bushuev@inbox.ru |
| Vladimir Yu. Bazhin | — | Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Mining University, Department of Technological Process Automation and Production |
| Yury V. Litvinov | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: yurl13@yandex.ru |
| Vadim A. Petrov | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: petrov_vadim_a@mail.ru |
| Olga K. Mansurova | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University, Department of Technological Process Automation and Production; E-mail: erke7@mail.ru |

For citation: Bushuev A. B., Bazhin V. Yu., Litvinov Yu. V., Petrov V. A., Mansurova O. K. Biological model for finding solutions to an inventive problem. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 851—859 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-851-859