ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 621.3.019

А.М. Резник

Институт математических машин и систем НАН Украины

РАЗВИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

Предложена новая модель разви-вающейся системы позволяющая объединить детерминистский и стохастический подходы к изучению явлений развития. Развивающаяся система определена как популяция детермини-рованных динамических систем, способных к размножению. Рассмотрена эволюция таких систем в реальном мире, процессы формирования сложных многоклеточных организмов, образование нервной системы, формирование цивилизации. Предложены модель стохастической динамической системы и теория инфинитезимального оператора, позволя-ющего представить процессы развития в компактной аддитивной форме.

Запропоновано нову модель системи що розвивається, яка дозволяє поєднати детермі-ністський та стохастичний підходи до вивчення явищ розвитку. Систему що розвивається визна-чено як популяцію детермінованих динамічних систем, здатних до розмноження. Розглянуто еволюцію таких систем в реальному світі, процеси формування складних багатоклітинних організмів, утворення нервової системи, формування цивілі-зації. Запропоновано модель стохастичної динаміч-ної системи та теорію інфінітезимального опера-тору, що дозволяє представити процеси розвитку у компактній адитивній формі.

A new model of evolving system that allows to combine stochastic and deterministic approaches is proposed. Evolving system is defined as population of deterministic dynamic systems capable of reproduction. The study is dedicated to evolution of such systems in the real world, processes of forming of complex multicellular organisms, neural system emergence, civilization development. The model of stochastic dynamic system and infinitesimal operator theory, that allows to represent evolution processes in a compact form, are proposed.

Ключевые слова: развитие, динамическая система, эволюция, инфинитезимальный оператор, информация, генотип.

Введение

Понятие развития может относиться к различным сущностям. Говоря о развитии растения, химической реакции или научной теории, мы имеем в виду различные объекты. В первом случае это материальный объект, во втором – процесс, а в последнем – понятие, существующее в сознании ученых. Во всех этих случаях речь идет о некоторых внутренних изменениях, при которых сущность, т.е. наше представление об объекте сохраняется. Объекты такого рода всегда привлекали внимание ученых, однако лишь недавно они стали предметом систематического изучения. Наиболее характерной чертой развивающихся объектов и процессов является степенной характер изменения их наблюдаемых свойств. Поиск адекватного объяснения таких изменений составляет предмет большинства исследований, проводимых в этой области [1,2]. Сейчас можно считать установленной связь развития с изменениями структуры больших систем и нелинейной динамикой их поведения. Эту сторону процессов развития изучает синергетика и теория катастроф [2,3]. Обобщенные модели процессов развития в природе и обществе рассматривают философы, пытаясь дать им научное объяснение [4]. Более конструктивным можно считать подход общей теории систем, рассматривающей развитие как свойство открытых систем [5]. Однако теория открытых систем пока не разработана, а существующие концепции целеустремленных и адаптивных динамических систем, которые способны приспосабливать свое поведения к меняющимся условиям окружения [6,7], представляют весьма приближенные модели развивающихся систем. В работе [8] нами была предложена системная концепция развития как способа существования детерминированных систем, обеспечивающего им самосохранение в условиях открытого внешнего мира. Общую модель развивающейся системы представляет популяция элементарных детерминированных систем, способных к размножению. Позднее эта концепция была применена для объяснения природы интеллекта [9]. Данная работа предлагает развитие и более полное обоснование указанной концепции.

Динамическая система и внешний мир

В общей теории систем динамическая система определена как многоместное отношение на множестве пар временных объектов $\{X_t, Y_t\}$: $X_t \in \Xi$, $Y_t \in \mathrm{H}$, $t \in T$. Здесь T - линейно упорядоченное множество моментов времени, X_t и Y_t - текущие значения входного и выходного объектов системы. Упорядоченность моментов времени позволяет представить это отношение в форме последовательности $\{X_t, Y_t, A_t\}$, где $A_t \in \Re$ - текущее состояние системы. Такое представление соответствует модели «черного ящика», в которой значения X_t и Y_t доступны для наблюдения, а состояние A_t является скрытым параметром системы. Поведение динамической системы можно представить соотношениями [5]:

$$Y_t = F(X_t, A_t), \quad (1)$$

$$A_t = \Phi(A_{t-\tau}, X_{t-\tau}^t), \quad (2)$$

первое из которых называют уравнением вход/выход, а второе – уравнением состояний. Величина $X_{t-\tau}^t \in R^{n \times T}$ представляет реализацию n-мерного вектора X_t на интервале наблюдения $(t-\tau, t)$. Состояние $A_t \in \Re \subset R^{n \times \mathrm{T}}$ отражает предыдущее поведение системы. Мощность множества состояний $|\Re|$ характеризует степень сложности системы.

Выражения (1-2) определяют детерминирован-ную динамическую систему. Считается, что функции $F(.)$ и $\Phi(.)$ однозначно отображают элементы области определения, ($\Xi \times \Re$ и $\Re \times \Xi \times T$) в области значений (H и $\Re$, соответственно). Иногда допускается, что эти функции являются стохастическими, т.е. такое отображение не является однозначным, а значение функции является случайной величиной, которую можно представить распределением вероятностей на множестве H.

Реально динамическая система существует в некотором окружении, представляющем инверсную динамическую систему, выход которой является входом данной системы, а вход - ее выходом (рис.1).

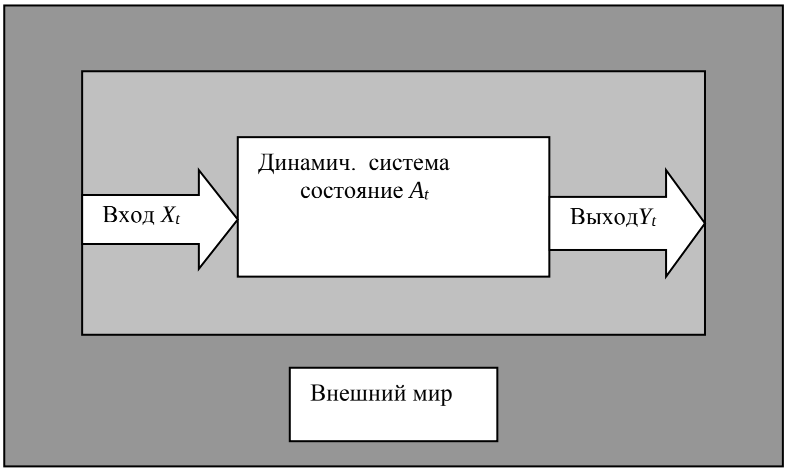

Рис1. Динамическая система и внешний мир

Предполагается что окружение намного сложнее данной системы, а состояние инверсной системы $B_t \in \aleph$ при $|\aleph| >> |\Re|$ не зависит от ее состояния. Уравнения вход/выход внешнего окружения системы можно представить как инверсию (1):

$$X_t = F^*(Y_t, B_t). \quad (3)$$

Условием сосуществования системы и ее окружения является выполнение равенства:

$$Y_t = F[F^*(Y_t, B_t), A_t]. \quad (4)$$

Данное условие равнозначно требованию эквивалентности множеств $\aleph \equiv \Re$, что противоречит исходному требованию независимос-ти текущих состояний системы и ее окружения. Если отказаться от этого требования, то выполнение условия (4) становится случайным событием. Для заданной реализации $X_{t-\theta}^t$ это условие может выполняться лишь на конечном интервале времени θ, в пределах которого поведение системы и ее окружения согласуются. Интервал θ можно рассматривать как время жизни данного экземпляра детерминированной систе-мы в реальном окружении.

Общая теория систем базируется на предположении о том, что внешний мир является открытой системой. Состояние такой системы не определено, поэтому считается, что внешний мир не влияет на поведение детерминированной системы, заданной формулами (1-2). Во многих случаях это предположение оправданно, поскольку влияние окружения оказывается незначительным. Исключение до последнего времени составляли лишь явления микромира, для которых оказалось невозможным проводить наблюдения, не влияя на поведение наблюдаемых объектов. Чтобы обойти эту проблему, было введено соотношение неопределенности, позволившее вместо детерминированной модели системы использовать статистическую квантовую модель явлений микромира. Хотя попытки применить квантовую модель для более широкого класса систем (см., напр. [10]) особого успеха не имели, тем не менее статистический подход к описанию поведения систем получил развитие в теории адаптивных систем, стохастических автоматов, распознавании образов [6,7,11].

Простейшие развивающиеся системы

Принятое в общей теории систем предположение об открытости окружения эквивалентно допущению, что внешний мир заведомо удовлетворяет условиям (4). Это равносильно существованию некой капсулы, изолирующей систему от внешнего мира, при условии, что окружение внутри капсулы представляет собой инверсную систему. Решениями уравнения (4) в этом случае являются собственные функции внутренней среды капсулы. Для выполнения условий согласованности функции F(.) и F*(.) должны отвечать этим решениям, т.е. допускать разложения по собственным функциям внутреннего пространства капсулы. Если капсула охватывает все пространство, то ее собственные функции отражают общие законы этого пространства а соответ-ствующие им элементарные системы являются фундаментальными, способными существовать сколь угодно долго. Примером могут служить долгоживущие элементарные частицы, отражающие общие законы Природы. Поскольку наряду с долгоживущими существуют короткоживущие частицы, то следует признать, что одна и та же среда может содержать как фундаментальные, так и нефундаментальные системы, назовем их реальными, для которых условия согласованности выполняются не всегда, Каждый экземпляр реальной системы имеет конечное время жизни и для продолжения существования погибшие экземпляры должны заменяться другимм, начальные состояния которых удовлетворяют условию (4). Для этого реальная система должна содержать механизм размножения, порождающий новые свои экземпляры, более отвечающие текущему состоянию окружения. Ее поведение напоминает процесс релаксации, включающий спокойные (латентные) периоды накопления изменений, чередующиеся со скачкообразными переходами в следующее начальное состояние.

Релаксационное поведение детерминированной системы можно представить как последователь-ность проверок выполнения условий согласования (4) и приведение в действие механизма размножения при нарушении этих условий. Этот механизм может воздействовать как на данную систему, так и на ее локальное окружение. В первом случае он создает копии системы, отличающиеся начальным состоянием, из которых выживают наиболее удачные. Во втором случае скачок состояния выполняет окружение системы, образующее ее капсулу. Скачкообразное изменение состояния окружения может происходить как перемещение границ капсулы или как обмен элементами между внутренней и внешней средой капсулы при сохранении условий на границе с детерминированной системой. Это соответствует обмену веществ, наблюдаемому в Природе. Примером может служить живая клетка, детерминированное ядро которой окружает протоплазма с мембраной, изолирующие ядро от неблагоприятных воздействий внешней среды.

Способность преодолевать нарушение условий согласования (4) путем скачкообразного изменения своего состояния является ключевым свойством развивающихся систем. Это свойство присуще объектам как живой, так и неживой природы. В неживой природе развитие - это необратимый процесс, связанный с преобразованием энергии. Примером могут служить химические или ядерные реакции, развитие которых наблюдается как изменение свойств или параметров процесса. В отличие от неживых объектов, развитие которых завершается при исчерпании соответствующих реагентов или источников энергии, развитие объектов живой природы носит более сложный характер.

Простейшей долгоживущей развивающейся системой является популяция, члены которой (индивиды) представляют собой элементарные системы, наследующие ее видимые свойства. Ее поведение включает кратковременную детерми-нированную составляющую, характеризующую поведение индивидов в пределах времени их жизни, и долговременную стохастическую, отражающую динамику изменения численности популяции. Процесс эволюции начался, вероятно, с появления примитивных систем, способных к размножению. Эта способность свойственна кристаллам, некоторые из которых могли стать прототипом развивающейся системы. Рост популяций примитивных систем вел к заполнению окружающего пространства их потомками и усилению взаимного влияния внутри популяции. Примитивные системы, обладающие близкими свойствами, могли интерпретировать реакции соседей и соответственно изменять собственные реакции. Это могло дать начало формированию простейших развивающихся систем - популяций, способных координировать реакции своих членов на воздействия окружения. Интеграция таких простейших систем могла способствовать появлению больших макросистем, обладающих целостным поведением по отношению к их окружению. В ходе эволюции формировались все более сложно организованные макросистемы, выжившие виды которых стали представителями современной живой природы.

На вход каждого члена макросистемы действует композиция, состоящая из реакций других ее членов и воздействий внешней среды:

$$X_t^i = G^i V_{t_0}^t \oplus \Xi_t^i , \qquad (5)$$

где: $V_{t_0}^t = \{v_\theta^1, .. v_\theta^k, .. v_\theta^K\}_{t_0}^t$ - реализация совместной реакции K членов макросистемы;

G^i - оператор Грина;

Ξ_t^i - воздействие внешней среды на i-го члена макросистемы в момент времени t.

Составляющую вектора X_t^i можно представить в развернутом виде:

$$x_t^i(j) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^K g(r^{i,j} - r^k, \tau) v_{t-\tau}^k d\tau + \xi_t^i(j) , \qquad (6)$$

где: $r^{i,j}, r^k$ - координаты j -го входа i-й и выхода k-го члена макросистемы;

$g(r^{i,j} - r^k, \tau)$ - передаточная функция окружающей среды;

$\xi_t^i(j)$ - составляющая воздействия внешней среды на j-й вход i- го члена макросистемы.

Соотношения между членами композиции (5) для различных членов макросистемы могут существенно отличаться. Эти различия минимальны в дисперсных макросистемах, состоящих из удаленных друг от друга членов макросистемы. Для них преобладающим является влияние внешней среды. Примером дисперсной макросистемы может служить колония бактерий, для которой объединяющим фактором являются условия общей внешней среды. Размножение бактерий осуществ-ляется путем деления индивидов, которые выжили на протяжении латентного периода. Деление обеспечивает передачу эстафеты жизни наследникам и почти не влияет на условия существования остальных бактерий колонии.

В консолидированных макросистемах, будем называть их организмами, состоящих из тесно сплоченных членов популяции, поведение каждого члена больше зависит от реакций соседей, чем от воздействия внешней среды. Соотношение между составляющими входного воздействия зависит от позиции члена популяции внутри организма. Для периферийных членов преобладающим является влияние внешней среды, тогда как для тех, кто находится внутри организма, это влияние может быть ничтожным. Внешние воздействия поступают к ним в виде реакций пограничных членов популяции. Для адекватной интерпретация этих реакций требовалась функциональная специали-зация членов популяции, образующих организм. Такую специализацию можно наблюдать в строении многоклеточных организмов. Непосредственно контактирующие с внешней средой клетки выполняют функции рецепторов и эффекторов. Функцией рецепторов является формирование внутреннего представления действующих извне стимулов для остальных клеток, специализи-рующихся на выполнении других функций. Функция эффекторов состоит в формировании его общей реакции организма. Поскольку все клетки представляют одну популяцию и наследуют генетический код единственной зародышевой клетки, то их специализация может происходить лишь в ходе индивидуального развития организма. Такая специализация практически не затрагивает ядро клетки и происходит за счет изменения свойств его окружения.

Переход от одноклеточной к многоклеточной организации организмов происходил постепенно, и его следы можно наблюдать сегодня на примере жизненного цикла амебы, приведенном на рис 2.

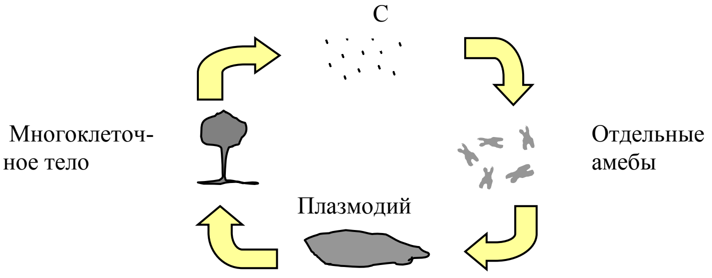

Рис. 2 Стадии жизненного цикла амебы .

При благоприятных условиях амебы ведут себя как члены дисперсной системы. При пересыхании водоема они перестают размножаться и слипаются в плазмодий – желеобразное образование, в центре которого шансы на выживание значительно выше, чем на периферии. При дальнейшей потере влаги амебы превращаются в споры, сохраняющие живыми лишь ядра. Споры легко переносятся ветром и попадая в окружающие водоемы дают начало развитию нових ее колоний.

Консолидированные макросистемы

Консолидированная макросистема, в отличие от простейших или дисперсных развивающехся систем, являющихся однородными популяция-ми, представляет единственную популяцию, жизнь которой начинается с зародышевой клетки и заканчивается при исчерпании возможности ее дальнейшего роста. Вначале развития организма увеличивается численность популяции и происходит специализация ее членов в соответствии с их расположением внутри организма. В этой фазе развития организм требует особой защиты от окружения, которое может влиять на формирование популяции и специализацию ее членов. Поэтому на начальном этапе его развитие происходит в искусственном окружении. На высоких уровнях эволюции таким окружением является утроба матери или оболочка яйца, а после появления на свет – сообщество, т.е. множество окружающих организмов, поддерживающих развитие новых членов до достижения ими стадии зрелости, когда они смогут производить зародышевые элементарные системы, сохраняющие генотип данного вида.

Коллективное существование макросистем в форме сообществ, состоящих из организмов, находящихся в различных стадиях развития, требовало развития средств коммуникации между членами сообщества, создавало условия конкуренции, в которых преимущество получали члены сообщества, способные лучше и быстрее реагировать на окружающую обстановку. Это привело к появлению нервной системы, что стало поворотным пунктом эволюции.

До появления нервной системы каждый организм представлял детерминированную систему, поведение которой могло изменяться лишь путем. естественного отбора экземпляров с необходимыми свойствами. С появлением нервной системы организмы приобрели способность моделировать различные варианты поведения и проверять их, пользуясь моделью внешнего мира, запечатленной в их памяти. Имея нервную систему, каждый организм мог оперативно изменять свое поведение, реагируя на изменения окружения. Подобные изменения поведения при отсутствии нервной системы требовали многих поколений эволюции.

Появление нервной системы не только ускорило эволюционный процесс, но и сделало его намного более экономным, поскольку отпала необходимость в громадном увеличении численности популяций. Соответственно сократилась нагрузка на окру-жающую среду, что высвободило ее ресурсы для ускорения эволюции. Высокоразвитые организмы получили возможность активно использовать окружающую среду для улучшения условий инкапсуляции. Преобразование локального окру-жения способствовало появлению сознательного труда, формированию интеллекта. Дальнейшее все ускоряющееся развитие организмов привело к образованию цивилизации, формированию инду-стриального и постиндустриального общества.

В эпоху цивилизации взаимодействие органиэ-мов с окружением представляет, в котором объекты окружения приобретают свойства самостоятельных развивающихся систем, а сообщество - среды, поддерживающей их существование. Образуется мир виртуальной реальности, наполненный вир- туальными развивающимися системами, которых готовы или вынуждены поддерживать члены сообщества. Виртуальными системами могут быть разные объекты: технологии, виды деятельности, идеи и верования, социальные движения, и т.п. Вовлекая сообщество в свою поддержку, они приобретают свойства самостоятельных развивающихся систем, существующих в благоприятном окружении создаваемом вниманием и усилиями его членов. Убедительными примерами виртуальных систем может служить развитие технологий, вооружений, машин, компьютеров и т.п. Разработчики и производители подобных объектов образуют, по сути, генотип сложного развивающегося организма. Занятые совершен-ствованием своего детища, созданием новых, более эффективных его поколений, они образуют ядро большой системы, включающей также подсистемы кооперации, торговли и рекламы, которые заняты преобразованием сообщества в среду, благоприятную для процветания этой системы. Подобной схеме отвечает развитие любой крупной системы от промышленной фирмы или научной лаборатории до политического движения или партии. В последнем случае генотип системы определяется амбициями лидеров, скрытыми за оболочкой лозунгов, привлекательных для остального сообщества.

Если прослеживать развитие исторических событий, технологических проектов, научных теорий или политических интриг, то везде можно обнаружить существование популяций, индивидами которых являются их участники или последователи. В развитии таких популяций существуют периоды роста, зрелости, деградации или перерождения, которые легко прослеживаются на графиках показателей развития, которые выглядят одинаково, идет ли речь о популяции динозавров [14], доходах корпорации [15], количестве публикаций или числе сторонников [16,17].

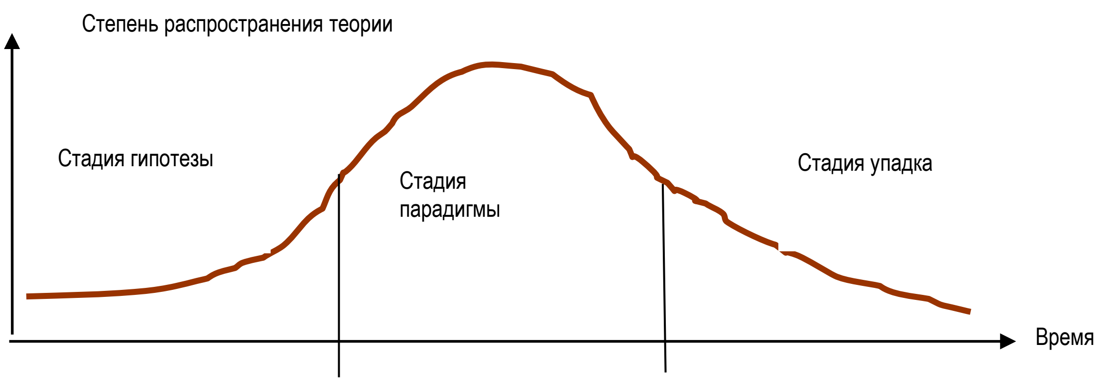

Рис. 3. Жизненный цикл научной теории.

При всей сложности и многообразии высокоразвитых консолидированных розвивающихся систем, все они могут быть представлены моделью «черного ящика», с доступными для внешнего наблюдения входом и выходом и ненаблюдаемым внутренним состоянием. Множество внутренних состояний такой системы отражает состояния всех ее компонент, а ее поведение – всю предшествующую эволюцию данного вида. Необозримость этого множества создает часто непреодолимые трудности для описания или моделировании развивающихся систем. Такие системы невозможно представить в детерминированном виде, а упрощенные модели, опирающиеся на наблюдаемые или измеримые их свойства, могут далеко уводить от понимания природы процесса развития. Подобные феноменологические модели развития изучаются в синергетике и теории катастроф. Альтернативный подход к изучению процессов развития на основе методов стохастической динамики впервые был применен в [12], при разработке стохастической модели обучаемости. Этот же поход использован при разработке модели стохастической динами-ческой системы [13].

Стохастические динамические системы

Представим поведение динамической системы, описываемой уравнением вход/выход (1), в форме условного распределения

$$\Delta(Y/X,A)=\delta\big(Y-F(X,A)\big). \qquad (7)$$

Данная форма позволяет описать поведение динамической системы при неизвестной функции $F(X,A)$, например, когда поведение системы задано последовательностью наблюдаемых значений стимулов X и реакций Y. Если состояние системы неизвестно, но задано распределение вероятностей состояний в момент наблюдения $P_t(A)$, то ее текущее поведение можно выразить в форме условного распределения:

$$P_t(Y/X) = P_t(A)\Delta(Y/X,A), \qquad (8)$$

где $\Delta(Y/X,A)$ - не зависящая от времени величина, представляющая поведение экземпляра (индивида) динамической системы, находящегося в состоянии A. Данное выражение представляет стохастический вариант уравнения вход/выход (1).

Поведение такой системы можно выразить через изменение текущего распределения вероятностей ее состояний. Стохастический аналог уравнение состояния системы (2) имеет вид:

$$P_t(A) = P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t). \qquad (9)$$

Здесь $Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t)$ - стохастический оператор развития, описывающий изменение вероятностей состояния индивидов динамической системы при поступлении на вход реализации $X_{t-\tau}^t$.

Выражения (7-9) описывают стохастическую динамическую систему (СДС), которую можно представить как множество независимых систем - индивидов, отвечающих генотипу $\Delta(Y/X,A)$.

Такая система похожа на растущую популяцию, а изменение распределения вероятностей состояний напоминает изменение численности ее членов. Однако это лишь аналогия поскольку индивидами СДС являются ее «замороженные» экземпляры, отличающиеся значением состояния.

Рис.4. Стохастическая динамическая система

Легко показать, что СДС представляет обобщение детерминированной системы. Для этого достаточно представить уравнения (8,9) дельта-функциями:

$$\Delta(Y/X,A) = \delta\big(Y - F(X,A)\big)$$
$$P_t(A) = \delta\big(A_t - \Phi(A_{t-\tau} X_{t-\tau}^t)\big). \qquad (10)$$

Очевидно, что полученные соотношения идентичы формулам (1, 2).

Если значения оператора развития не зависят от времени, то марковский процесс, описываемый уравнением (9) становится стационарным, и для него может существовать финальное распределение $P_\infty(A)$. Рассмотрим случай, когда оператор развития допускает представление

$$Q(A_{t-1}, A_t, X_{t-1}^t) = \alpha E + (1-\alpha)\Lambda, \qquad (11)$$

где : E – единичный оператор $\Re$ x $\Re$, α – константа 0< α<1, Λ – стохастическая матрица:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_1 & \dots & \lambda_1 \\ \lambda_2 & \lambda_2 & \dots & \lambda_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_R & \lambda_R & \dots & \lambda_R \end{bmatrix},$$

$$\sum_{i=1}^{\Re} \lambda_i = 1.$$

В этом случае формула (7) приобретает вид:

$$P_{t_T}(A) = \alpha^T P_{t_0}(A) + (1-\alpha^T)\lambda = \xrightarrow[t_T \to \infty]{} \lambda, \qquad (12)$$

где λ - вектор-столбец матрицы Λ.

Полученное выражение описывает стохастическую модель обучаемости, применяемую при изучении динамики выработки условного рефлекса у подопытных животных [8].

Уравнения (7-8) отражают точку зрения внешнего наблюдателя, рассматривающего реализацию $X_{t-\tau}^{t}$ как причину изменения распределения $P_t(A)$. С точки зрения самой СДС окружающая среда является внешней системой, реагирующей на реакции СДС. Поведение внешней среды можно представить уравнениями

$$P_t(X/Y) = P_t(B)\nabla(X/Y,B); \qquad (13)$$

$$P_t(B) = P_{t-\tau}(B)R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t}), \qquad (14)$$

где: $\nabla(X/Y,B)$ - генотип внешней среды;

$P_t(B)$, - текущее распределение состояний индивидов внешней среды;

$R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t})$ - оператор развития для внешней среды.

Уравнения (13-14) представляют стохастическую модель, которую можно выбрать так, чтобы множества состояний индивидов СДС и ее окружения совпадали $A \equiv B \in \Re$. Такую модель будем называть собственной моделью внешней среды. Для собственной модели существует соотношение, аналогичное условию согласованнос-ти (4) для детерминированной системы:

$$Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t}) = R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t}). \qquad (15)$$

Смысл данного соотношения состоит в том, что различие в поведении СДС и ее окружения выражается как несоответствие собственной модели реальной внешней среде. Возникающее вследствие этого расхождение между прогнозируемым на основе реализации $Y_{t-\tau}^{t}$, и реальным значениями входа СДС может служить сигналом для соответствующего изменения состава популяции.

Инфинитезимальный оператор

Полагая, что распределение вероятностей состояний $P_t(A)$ является непрерывной функцией времени, найдем производную:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(A)\right] = P_{t-\tau}(A)\frac{\partial}{\partial t}Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t}). \qquad (16)$$

Если на интервале времени $(t-\tau,t)$ эта производная существует, то можно найти ее предел:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(A)\right] \xrightarrow[\tau\to 0]{} P_t(A)H(A_t,X_t) \qquad (17)$$

Здесь $H(A_t,X_t)$ представляет инфинитезимальный оператор СДС, выражающий скорость изменения вероятности пребывания индивида системы в данном состоянии при значении входа X_t. Отрицательное значение $H(A_t,X_t)$ означает рост вероятности гибели индивида, а позитивное – вероятности размноже-ния, т.е. увеличения числа индивидов в состоянии A_t. Если $P_t(A) \neq 0$, (это справедливо, если в популяции представлены все возможные состояния $A_t \in \Re$), дифференциальное уравнение (14) имеет решение:

$$P_t(A) = P_{t_0}(A)\exp\left[\int_{t_0}^{t} H(A_\theta,X_\theta)\partial\theta\right]. \qquad (18)$$

Интеграл в показателе экспоненты описывает процесс накопления изменений поведения СДС в ходе ее эволюции. Аддитивный характер изменений и их зависимость от текущих значений входа СДС X_t, позволяет интерпретировать такие изменения, как накопление информации о поведении окружающей среды. Действительно, количество информации, получаемой СДС, при поступлении на ее вход значения X_t определяется выражением:

$$\begin{aligned} h(A_t,X_t) = & \xrightarrow[\tau\to 0]{} \sum_{\Re}\{P_t(A)\log[P_t(A)] - \\ & - P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t})\log[P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t})]\} = \\ & = -\sum_{\Re}P(A_t)H(A_t,X_t) \end{aligned} \qquad (19)$$

Соотношения, аналогичные (16-18) можно получить и для внешней среды:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(B)\right] = P_t(B)G(B_t,Y_t)$$

$$P_t(B) = P_{t_0}(B)\exp[\left[\int_{t_0}^{t} G(B_\theta,Y_\theta)\partial\theta\right] \qquad (20)$$

Здесь величина оператора $G(B_t,Y_t)$ характеризует влияние реакции индивида популяции на изменение распределения состояний внешней среды. Для собственной модели внешней среды значения инфини-тезимальных операторов СДС и ее окружения совпадают:

$$H(A_t,X_t) = G(A_t,Y_t). \qquad (21)$$

Такая связь между текущими значениями инфинитезимального оператора может использоваться для внешнего управления поведением СДС. Для этого значения $G(A_t,Y_t)$ должны поступать в нее извне, например, в форме дополнительной компоненты входа X_t. Такое управление соответствует обучению с подкреплением.

Заключение

Предложенная нами модель развивающейся системы как растущей популяции позволяет объединить детерминистский и стохастический подходы к изучению развития и выявить новые аспекты этого явления, имеющие как теоретическое так и непосредставенно практическое значение. Прежде всего следует отметить, что сами мы являемся продуктом развития, а наше мышление представляет реализованный нервной системой процесс эволюции образов внешнего мира. Создаваемые нами модели и методы также эволюционируют и не всегда точно отражают свойства реальных объектов. Опыт Чернобыля показывет, что такая неточность может иметь роковые последствия. Экономические, финансовые и социальные кризисы, преследующие человечество в эпоху массового применения научных методов и компъютерных технологий, также связаны с несоответствием применяемых методов управления характеру управляемых объектов, являющихся развивающимися системами.

Разработка общей теории развивающихся систем пока находится в начальной стадии. Достаточно изучены модели роста популяций, использующие математический аппарат ливневых процессов, разработаны стохастические модели обучения. Дальнейшей разработки требует теория инфинитезимального оператора, отражающего причинно-следственные связи и источники развития. Этот оператор наиболее компактно представляет процесс развития, что позволяет использовать его для создания эффективного стандарта описания развивающихся систем и процессов.

Выявленная нами связь между значением этого оператора и количеством получаемой системой информации (формула (19)) позволяет по-новому интерпретировать само понятие информации. Учитывая, что понятие развития в неживой природе связано с неравновесными процессами, можно ожидать, что новую интерпретацию получит также и понятие энергии.

Литература

1. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М. Мир. 1990. -275с.
2. Александров В. В. Развивающиеся системы в науке, технике, обществе и культуре. -СПб. СПбГТУ. 2000.- 244с.
3. Арнольд В.И. Теория катастроф. -М. Едиториал УРСС. 2009.-136с.
4. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. –М. Наука. 1987.-304с.
5. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. Математические основы. – М. Мир. 1978. – 311с.
6. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М. Наука. 1968. –399с.
7. Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. -М. Наука. !976. – 317с.
8. Різник О.М. Загальна модель розвитку. // Математичні машини і системи. -2005. -№ 1. –С. 84-98.
9. Резник А.М. О природе интеллекта // Математические машины и системы. -2008. -№1. – С 23-45
10. Хелстром К. Квантовая теория проверки гипотез и оценивания. – М. Мир. 1979. – 344с.
11. Vapnik V.N. Statistical learning theory. - John Willey & sons inc. 1998, - 736p.
12. Буш Р., Мостеллер Ф. Стохастические модели обучаемости. – М. ГИФМЛ. 1962. – 483с.
13. Резник А.М. Многорядные динамические перцептроны / в кн. Перцептрон- система распознавания образов, ред. А.Г. Ивахненко. –Киев. Наукова Думка. 1975.- с. 243-292.
14. Грант В. Эволюция организмов. –М. Мир. 1980.-407с.
15. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. – М. Прогресс. 1974.- 419с.
16. Кун Т. Структура научных революций. -М. Прогресс. 1975.- 246с.
17. Михайлов А.И., Черный А.И., Гиляревский Р.С. Научные коммуникации и информатика. – М. Наука. 1976 – 435с.

Сведения об авторе

Резник Александр Михайлович - доктор технических наук, зав. отделом нейротехнологий Института математических машин и систем НАН Украины, область интересов – искусственный интеллект, нероннные сети, синергетика.
E-mail: neuro@immsp.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 12.04.2011г.