

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ПЕДАГОГІКИ

УДК 378 : 530. 192

Шурыгин Е.Г., Шурыгина Л.С.

ОБ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В статье предложены рекомендации по изучению базовых моделей синергетики (генерация когерентного излучения лазера, «хищник-жертва») с использованием анализа механизмов обратных связей. Это дает возможность исследовать устойчивость стационарных режимов функционирования систем и характер этих режимов на базе школьного курса математики.

Ключевые слова принцип Ле-Шателье-Брауна, положительная и отрицательная обратная связь, сложные системы, синергетика

Постановка проблемы. Генеральной Ассамблеей ООН десятилетие 2005-2014 гг. объявлено декадой образования для устойчивого развития. ОУР – это процесс и результат формирования таких человеческих качеств, которые обеспечат коэволюцию человека, общества и природы. Мы живем в эпоху так называемого демографического перехода, во «время нестационарного развития и распада установившегося за миллионы лет истории человечества самоподобного механизма роста» [3]. Характерная черта современной жизни – нестабильность. Поэтому проблема устойчивого развития крайне актуальна. Одна из принятых рекомендаций при обсуждении этих проблем – наращивание междисциплинарной составляющей в высших учебных заведениях и школах. Все более существенными становятся глобальные проблемы, а они не могут быть разделены на части. «Познание мира как мира целостного становится одновременно интеллектуальной и жизненной необходимостью» [6] – утверждает Э. Морен, президент Ассоциации сложного мышления во Франции, в докладе, представленном ЮНЕСКО.

Академик Моисеев Н.Н. в своей последней книге пишет, что «образование должно далеко выходить за рамки узкого профессионализма. Современный человек должен видеть мир в его целостности. Только представление об общей логике развития этого мира, в котором мы живем, поможет нам избежать катастрофических последствий кризиса, который неумолимо надвигается. А может быть и избежать этого кризиса» [5]. Выяснением общей логики развития нашего мира занимается междисциплинарное направление изучения сложных систем различной природы – синергетика. Это направление интенсивно развивается. Выходит большое количество книг, предназначенных, в основном, для

специалистов. Учебной литературы очень мало и она рассчитана либо на читателей со специальной физико-математической подготовкой, либо имеет популярный характер.

Поэтому возникает проблема создания учебных материалов для средней и высшей школы, совмещающих доступность изложения с современным научным уровнем. Мы считаем, что анализ действующих в сложной системе механизмов обратной связи будет способствовать, во-первых, более глубокому пониманию процессов самоорганизации, и, во-вторых, позволит анализировать устойчивость стационарных режимов функционирования и их характер на базе школьного курса математики.

Анализ последних исследований. Значение синергетики для совершенствования, реформирования системы образования анализируется многими исследователями (см., например, [8]). «Сегодня синергетика, преодолевая междисциплинарный статус, быстро превращается в ответственного носителя новой парадигмы стиля мышления. Новая методология воплощается в технике, искусстве, экономике и, безусловно, должна проникать в образование», – считает В.Г. Кремень [4]. Таким образом, включение синергетики в содержательную компоненту естественнонаучного образования не только сближает его с современным состоянием науки, но и будет способствовать формированию современного «сложносистемного» мышления.

Цель статьи – доказать эффективность качественного и количественного анализа механизмов обратных связей при изучении процессов развития сложных систем.

Изложение основного материала исследования. Синергетика дает новое понимание процессов развития сложных систем. Сложные системы живой и неживой природы развиваются немонотонно, проходя при этом через кризисные состояния, бифуркации, которые сменяются периодами запрограммированного развития. Переход происходит, когда существующая структура теряет устойчивость, становится неустойчивой. Механизмы таких переходов в качественно новые состояния аналогичны для систем различной природы.

Академик Моисеев Н.Н. подчеркивает важность понимания того, что развитие, эволюция организационных структур любой природы определяется противоречивыми тенденциями, прежде всего двумя типами обратной связи. Этим термином в настоящее время принято называть действие результатов какого-то процесса на интенсивность его протекания в этой же системе, т.е. самовоздействие. Обратная связь означает сложную форму причинной зависимости, когда результат предыдущего действия оказывает влияние на дальнейший ход процесса. Если при таком самовоздействии интенсивность процессов в системе уменьшается, то обратная связь называется отрицательной, если возрастает – положительной. Отрицательная обратная связь уменьшает отклонение

системы от установившегося режима функционирования. Она ответственна за устойчивость системы, устранение отклонений, подавление возмущений. Поэтому анализ действующих в системе механизмов обратной связи дает возможность определять устойчивость или неустойчивость ее режима функционирования.

Обратная связь может иметь локальный характер, т.е. осуществляться между величинами в одной и той же точке пространства. Если математическая модель (динамическая система), описывающая эволюцию системы со временем, задана дифференциальным уравнением

$$\frac{dx_i}{dt} = f(x_i)$$

то обратная связь осуществляется через установление зависимости скоростей изменения переменных $\frac{dx_i}{dt}$ от значений самих переменных x_i , характеризующих состояние системы в данный момент времени. Переменная x_i оказывает воздействие на $\frac{dx_i}{dt}$, последняя, в свою очередь, определяет изменение x_i , замыкая петлю обратной связи. Таким образом, переменная x_i влияет на саму себя.

Рассмотрим, например, динамическую систему

$$\frac{dx}{dt} = a - bx \quad (1)$$

Здесь x – переменная, характеризующая состояние системы, a и b – параметры, характеризующие влияние внешней среды и свойства системы.

В стационарном состоянии системы $f(x) = \frac{dx}{dt} = 0$ переменная x

принимает значение $x_0 = \frac{a}{b}$.

Выясним является ли это стационарное состояние устойчивым. Фундаментальные критерии устойчивости решений дифференциальных уравнений были сформулированы известным математиком А.М. Ляпуновым. В словесной формулировке: «Решение (или движение) устойчиво, если все решения (или движения), находящиеся в начальный момент в непосредственной близости от него, продолжают и далее оставаться в его окрестности; решение (или движение) асимптотически устойчиво, если все смежные решения (или движения) асимптотически приближаются к нему». (Цитируется по [9, с. 64])

Пусть переменная x немного отклонилась от стационарного значения (флуктуации, внешние воздействия). Если $x < x_0$, то из соотношения (1)

следует, что $\frac{dx}{dt} > 0$. Это означает, что свойства данной системы таковы, что значение x будет увеличиваться до x_0 . При этом $\frac{df}{dx} = -b < 0$. Если же $x > x_0$, то $\frac{dx}{dt} < 0$, т.е. в системе начнутся процессы, в которых переменная x уменьшается до x_0 . В этом случае также $\frac{df}{dx} = -b < 0$. При любых малых отклонениях от стационарного состояния изменение x компенсируется изменением $\frac{dx}{dt}$, $\frac{df}{dx} < 0$. Это – отрицательная обратная связь. Механизм ее работает так, что в ответ на внешнее возмущение или флуктуации она компенсирует, уменьшает влияние этого возмущения, сохраняя устойчивость системы.

В рассмотренном примере обратная связь – линейная. В линейных системах характер обратной связи не может меняться. Поскольку в данной системе возможна только отрицательная обратная связь, она абсолютно устойчива. Развитие такой системы невозможно, это – тупиковая форма.

Чтобы было возможно саморазвитие, отклонение системы от стационарного состояния должно иметь возможность усиливаться, тем самым порождая еще большее отклонение. Такое самовоздействие – положительная обратная связь, $\frac{df}{dx} > 0$. Механизм положительной обратной связи работает в ядерных реакциях деления, в автокаталитических химических реакциях, при распространении огня во время пожара и т.д.

В качестве динамической системы, способной к саморазвитию, рассмотрим базовую модель синергетики – излучение лазера. Скорость изменения количества когерентных фотонов в полости резонатора определяется нелинейным дифференциальным уравнением

$$f \curvearrowright \frac{dx}{dt} = k_1 x - k_2 x^2. \quad (2)$$

Для вывода этого уравнения достаточно знаний школьного курса физики. (См., например, [7, с. 231-232].) Из вывода следует, что постоянная k_2 всегда положительная, $k_1 < 0$ при слабой накачке и $k_1 > 0$ – при сильной. В стационарном режиме функционирования $f \curvearrowright k_1 x - k_2 x^2 = 0$. Следовательно, возможны два стационарных режима:

$x_{01} = 0$ и $x_{02} = \frac{k_1}{k_2}$. При малой энергии накачки ($k_1 < 0$) возможно только первое состояние. (Количество фотонов не может быть отрицательным) Стационарное состояние x_{01} устойчиво благодаря механизму

отрицательной обратной связи:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_{01}} = k_1 - 2k_2 x_{01} = k_1 < 0$$

Как только k_1 превысит нулевой значение, первое состояние становится неустойчивым, поскольку в этом состоянии теперь более интенсивен механизм положительной обратной связи, $\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_{01}} = k_1 > 0$.

Однако, теперь возможен второй режим функционирования. Он устойчив, так как в этой ситуации более интенсивен механизм отрицательной обратной связи:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x_{02}} = k_1 - 2k_2 \frac{k_1}{k_2} = -k_1 < 0$$

Таким образом, при переходе параметра через пороговое значение $k_1 = 0$ от отрицательного к положительному, происходит явление самоорганизации, качественная перестройка режима функционирования от случайных цугов спонтанно излучающих атомов к когерентному излучению. Данный пример демонстрирует пороговый характер процессов в сложных нелинейных системах, возможность нескольких режимов функционирования, зависимость механизмов положительной и отрицательной обратной связи от управляющего параметра и состояния нелинейной системы.

Рассмотрим пример системы с двумя степенями свободы. Простейшей является модель Лотки-Вольтерра. В первых десятилетиях XX века американским биофизиком А. Лоткой была предложена модель автокаталитической химической реакции, в которой возможны химические колебания, т.е. колебания концентраций реагирующих веществ. Систему реакций и соответствующие кинетические уравнения можно найти в любой книге по синергетике. Кинетические уравнения имеют вид

$$\frac{dX}{dt} = AX - XY \quad (3)$$

$$\frac{dY}{dt} = XY - Y \quad (4)$$

Здесь A, X, Y – концентрации реагирующих веществ. Концентрация исходного вещества A поддерживается постоянной. Константы, характеризующие скорость реакций, положены равными единице.

Приведенные кинетические уравнения допускают два стационарных состояния: $X_{01} = 0, Y_{01} = 0$ и $X_{02} = 1, Y_{02} = A$.

Анализируя механизм обратной связи в системе, выясним являются ли

стационарные режимы функционирования устойчивыми и каков их характер. Пусть x и y – малые отклонения соответствующих концентраций от значений в стационарном режиме:

$$X \overset{\curvearrowright}{\approx} X_0 + x, \quad (5)$$

$$Y \overset{\curvearrowright}{\approx} Y_0 + y, \quad (6)$$

Подставляя значения (5) и (6) в уравнение (3) и (4), записываем их (уравнения) в линейном приближении. Для первого стационарного состояния имеем:

$$\frac{dx}{dt} = Ax \quad (7), \quad \frac{dy}{dx} = -y \quad (8)$$

Для второго:

$$\frac{dx}{dt} = -y \quad (9), \quad \frac{dy}{dt} = Ax \quad (10)$$

Из соотношения (7) следует, что отклонение x от первого стационарного состояния будет все время расти по причине наличия положительной обратной связи: $\frac{df}{dx} = A > 0 \left(f \overset{\curvearrowright}{\approx} \frac{dx}{dt} \right)$. Это состояние неустойчиво.

Чтобы выяснить поведение системы вблизи второго стационарного состояния, возьмем производную по времени от обеих частей соотношения (9):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{dy}{dt}.$$

Воспользовавшись уравнением (10) имеем

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -Ax.$$

Это – выражение для ускорения при наличии гармонических колебаний, которые изучаются в 11 классе. Действительно, из соотношения (10) следует, что отклонение x приводит к увеличению отклонения y . Это, в свою очередь, согласно (9), вызывает уменьшение отклонения x и т.д. Частота колебаний $\omega = \sqrt{A}$. Легко показать, что отклонение y от стационарного значения совершает гармонические колебания с такой же частотой, но со сдвигом по фазе. Возникновение колебаний в системе без внешнего периодического воздействия – явление самоорганизации во времени. Система повторяет свое состояние через определенный промежуток времени.

Аналогичная модель используется в экологии (модель Вольтерра, «хищник-жертва»). В этом случае X – численность, например, травоядных животных, которые питаются субстратом A , Y – численность хищников,

которые питаются травоядными. Существование колебаний численности популяций (например, зайцы и рыси, окуни и щуки) подтверждается многочисленными наблюдениями.

Из рассмотренных выше примеров ясно, что анализ механизмов обратных связей необходим для понимания процессов самоорганизации. Сложные, способные к самоорганизации системы, должны обладать набором механизмов, одни из которых играют роль отрицательных, другие – положительных обратных связей. Первые отвечают за стабильность, устойчивость, вторые – за развитие, рост сложности. Эти механизмы одновременно и дополняют друг друга и конкурируют друг с другом.

На существование механизмов обратных связей в природе впервые, вероятно, обратили внимание французский ученый А. Ле-Шателье (1884 г.) и немецкий ученый К. Браун (1887 г.). Принцип Ле-Шателье-Брауна можно сформулировать следующим образом: если на систему, находящуюся в равновесии, оказывать внешнее воздействие, то в системе будут протекать процессы, препятствующие этому воздействию. Формулируя этот принцип, его авторы пользовались аналогией с правилом Ленца в электродинамике.

Принцип Ле-Шателье-Брауна междисциплинарен, также как и понятие обратной связи. Например, коэффициент изотермической сжимаемости отрицателен. Это означает, что при увеличении внешнего давления на систему, ее объем уменьшается, а внутреннее давление, следовательно, увеличивается. Таким образом, система стремится компенсировать изменения, вызываемые внешним воздействием.

Если химическая реакция протекает с поглощением тепла, она называется эндотермической. Скорость такой реакции при повышении температуры увеличивается. Если реакция экзотермическая (протекает с выделением тепла), то скорость ее увеличивается при понижении температуры.

Применимость принципа Ле-Шателье-Брауна не ограничена физико-химическими системами. Известна, например, способность биосферы противостоять вредным воздействиям (в определенных пределах!). Замечено, что постоянные советы человеку в повелительном тоне, стремление детерминировать его поведение, обычно приводят к противоположным результатам.

Красивый пример предложен Н. Винером: «Люди стоят потому, что они непрерывно сопротивляются тенденции упасть вперед или назад и умеют произвольно компенсировать эти тенденции с помощью мускульных усилий, отклоняющих тело в обратном направлении. Равновесие человеческого тела, также как другие виды равновесия, наблюдаемые в живых организмах, не является статическим, а достигается за счет непрерывно протекающих процессов, активно препятствующих любой тенденции, направленной на то, чтобы его разрушить. Таким

образом, стоя на месте или передвигаясь, мы непрерывно сражаемся с силами земного притяжения ...» [2].

Принцип Ле-Шателье-Брауна обычно ассоциируется с отрицательной обратной связью. Однако, положительная обратная связь также может принимать участие в установлении устойчивого состояния.

Существует первый закон кибернетики, принцип необходимого разнообразия У.Р. Эшби. Смысл этого закона: значительное разнообразие воздействующих на систему возмущений требует адекватного им разнообразия ее возможных состояний. Т.е. устойчивость системы к внешним воздействиям и внутренним возмущениям может достигаться наличием у нее определенного набора способов поведения. Одна из существенных особенностей сложных систем – способность совершать переходы между различными режимами функционирования. Функциональная сложность – более существенная характеристика понятия «сложная система», чем сложность структурная. Таким образом, принцип необходимого разнообразия У.Р. Эшби является как бы «продолжением» принципа Ле-Шателье-Брауна, объясняя устойчивость сложных систем. Поиск устойчивости играет роль естественного отбора. Поэтому в процессе эволюции и формируются сложные системы. Динамические системы с обратной связью обладают способностью к адаптации, к изменению системы (в определенных пределах) в соответствии с внешним воздействием, сохраняя при этом устойчивость. За это ответственны механизмы как положительной, так и отрицательной обратной связи.

В последние десятилетия интерес к положительным обратным связям, благодаря синергетике, повысился. Было осознано, например, их значение для развития экономики. Традиционная экономическая наука пользовалась представлением об отрицательной обратной связи. Считалось, что отрицательная обратная связь всегда приводит к прогнозируемому равновесию между ценами и долями рыночного участия производителей, способствует стабилизации экономики. Но оказалось, что это слишком простая модель развития реальной экономики. Положительная обратная связь во многих случаях определяет выбор тех или иных технических решений или стандартов. Например, некоторые случайные события (неожиданные заказы на продукцию и т. п.) могут усиливаться положительной обратной связью и приносить победу в конкуренции одной из равноценных фирм. Механизм положительной обратной связи успешно работает в наукоемких или высокотехнологичных отраслях (в производстве компьютеров, программного обеспечения, ракет и т. д.). Эти отрасли требуют больших начальных капиталовложений на научные исследования, конструкторские работы. Но уже при налаженной реализации готовой продукции дальнейшее наращивание производства обходится дешевле. Экономика «в основе которой лежат механизмы положительной обратной связи, имеет свои аналоги в современной

нелинейной физике. Ферромагнитные материалы, полупроводниковые лазеры и другие физические системы, состоящие из «взаимоусиливающихся» элементов, обнаруживают те же свойства, что и экономические модели ... Они нацелены на один из возможных вариантов; небольшие возмущения в критические моменты времени определяют тот или иной результат ...» [1, с. 66].

Наличие аналогий между различными явлениями и процессами – проявление основных принципов природы в многообразии закономерностей частных наук. Если отдельные научные дисциплины рассматривают определенные виды движения, то в синергетике в центре внимания – процесс развития, качественные изменения. Она как бы надстраивается над различными науками, выделяя основные общие закономерности развития.

Выводы. При изучении процессов развития сложных систем, наряду с традиционным анализом устойчивости стационарных режимов функционирования и их характера, полезен подход, основанный на анализе механизмов обратной связи. Он дает возможность создания курса синергетики, совмещающим доступность изложения с современным научным уровнем, для слушателей имеющих подготовку по математике в рамках школьного курса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брайан Артур У. Механизмы положительной обратной связи в экономик. / Артур У. Брайан // В мире науки. – 1990. – №4. – С.60-66.
2. Винер Н. Я – математик / Н. Винер. – М. : Наука, 1964.
3. Капица С.П. Общая теория человечества: Сколько людей жили, живет и будет жить на Земле / С.П. Капица. – М. : Наука, 1999. – 189 с. – (Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения).
4. Кремень В. Синергетична модель розвитку освіти як відповідь на виклики сьогодення / В. Кремень // Рідна школа. – 2010. – №6 – С. 3-6.
5. Моисеев Н.Н. Универсум. Информация. Общество / Н.Н. Моисеев. – М. : Устойчивый мир, 2001. – 198 с.
6. Морен Э. Образование в будущем: семь неотложных задач / Эдгар Морен // Синергетическая парадигма. Синергетика образования. – М. : Прогресс-Традиция, 2007 – С. 24-96.
7. Шурыгин Е.Г. Идеи синергетики в содержании образования будущих учителей / Е.Г. Шурыгин, Л.С. Шурыгина, Н.В. Скворцова // Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін в вищій школі. – Зб. наук. праць – Кривий Ріг : Видавничий відділ НметАУ, 2012. – Вип. VII. – С. 229-236.
8. Шурыгина Л.С. Синергетика и образование / Л.С. Шурыгина, Е.Г. Шурыгин // Проблемы трудовой і професійної підготовки: наук.-метод. зб. – Слов'янськ: СДПУ, 2011. – Вип. 16. – С.3-10.

9. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах : Введение в теорию диссипативных структур. / В. Эбелинг – М. : Мир, 1979. – 279 с.

Шуригін Є.Г., Шуригіна Л.С. Про вивчення процесів розвитку складних систем.

У статті запропоновані рекомендації щодо вивчення деяких базових моделей синергетики з використанням аналізу механізмів зворотних зв'язків. Це дає можливість досліджувати стійкість стаціонарних режимів функціонування систем і характер цих режимів на базі шкільного курсу математики.

Ключові слова: складні системи, розвиток, синергетика, позитивний і негативний зворотній зв'язок, принцип Ле-Шательє-Брауна.

Shurigin E, Shurygina L. Study on the process of complex systems.

The paper provides recommendations on the study of some basic models of synergy with the analysis of feedback mechanisms. This makes it possible to study the stability of stationary regimes of the systems and the nature of these modes on the basis of school mathematics.

Keywords: complex systems development, synergy, positive and negative feedback, the Le Chatelier-Braun.