

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДА К ФРАКТАЛУ

И. С. Ступин, Ю. А. Багликова (Москва)

Введение

Имитационное моделирование как один из самых эффективных методов исследования, оценки характеристик и способа прогнозирования поведения различных систем обрело сейчас широкое распространение. Сейчас никто не ставит под сомнение целесообразность использования моделирующих средств при разработке технических систем, которую подтверждает накопившийся многолетний опыт получения, в первую очередь, экономической выгоды от использования данного обеспечения. Одной из областей, где технологиям имитационного моделирования еще предстоит совершить немало прорывов, является прогнозирование нештатных ситуаций. В данной работе предлагается взглянуть на решение этого вопроса с точки зрения теории фракталов. «Фрактальную геометрию природы» обнаружил Бенуа Мандельброт, стараясь описать шумы в электронных схемах. Дальнейшее изучение «фрактальной стороны жизни» привело к тому, что к ней стали относить многие деструктивные явления, такие, как трещины в горных породах или разрыв пласта при нефтедобыче, характер распространения коррозии по материалу. Фрактальный анализ и построение имитационных моделей перехода от детерминированного хаоса к фракталам поможет устранить некую степень неопределенности в вопросах прогнозирования нештатных ситуаций, в том числе в нефтегазовых процессах. Для построения имитационных моделей необходимо выбрать наиболее подходящую среду и технологию разработки. Для этого рассмотрим, какие инструменты и продукты имитационного моделирования актуальны на данный момент, каковы их основные возможности и назначение.

Обзор средств и технологий имитационного моделирования

Благодаря своей простоте и изящности привлекательна сама идея имитационного моделирования, и интересуются ей не только исследователи, но и руководители. Вместе с расширением областей, поддающихся компьютерному моделированию, появляются все новые и новые специалисты, работающие в данной сфере. Сейчас имеет место широкий разброс средств и технологий ИМ, поэтому есть некоторые трудности в выборе подходящей среды для того или иного предмета моделирования. В связи с этим хотелось бы представить некую краткую и доступную классификацию инструментов и сред ИМ, понятную даже человеку, далекому от этого метода исследования.

Критерием классификации выступает базовая концепция формализации в той или иной современной системе моделирования, иначе говоря, технология построения и процесса моделирования, характер отображения модели. На текущий момент сформировались пять основных концепций, они обозначены в таблице 1.

Концепция	Сущность	Типичная модель
Дискретно-событийное моделирование (Process-centric, Discrete Event)	Системы моделирования, использующие блоки-события, которые происходят с поступившими на вход некоего процесса заявками (транзактами).	Системы массового обслуживания

Системная динамика (System Dynamics)	Построение диаграммы потоков и накопителей, где внешние потоковые переменные, заданные константами или функциями, влияют на динамику описываемой системы обратной связи.	Распространение нового продукта по Бассу [1]
Сетевые парадигмы (Network paradigms)	Построение графа, может быть ориентированным, взвешенным или иметь заданную на дугах функцию. Дуги соответствуют операциям (работам), вершины – событиям.	Сетевые модели планирования и управления
Моделирование динамических систем (Dynamical systems)	Прародитель системной динамики. Заключается в построении блок-диаграммы в виде направленного графа, где в тела блоков записываются дифференциальные уравнения и формулы.	Динамическая система Лоренца
Агентное моделирование (Agent Based)	Системы моделирования, описывающие поведение и взаимодействие некоторых активных объектов, называемых агентами. Поведение отдельно агентов в совокупности определяет глобальное поведение системы.	Модель эволюции

Таблица 1. Основные концепции имитационного моделирования

Начиная с 50-х годов XX-го века, задачи компьютерного моделирования разрабатывались на основе общеизвестных универсальных языков. Однако со временем этих средств стало недостаточно для реализации полноценных моделей, что привело к созданию языков имитационного моделирования. Дальнейшая эволюция средств имитационного моделирования была обусловлена развитием персональных компьютеров и средств графического интерфейса [2]. Таким образом, существующее на данный момент программное обеспечение для имитационного моделирования – это комплекс средств, созданных на базе и реализующих тот или иной язык программирования, и, как правило, имеющих интуитивно понятную графическую оболочку.

Диапазон областей, к которым применимо имитационное моделирование, достаточно широк. На фоне этого появилось немалое количество компьютерного обеспечения, приспособленного для решения задач определенного рода. В таблице 2 даны наиболее популярные инструменты и среды ИМ, классифицированные по реализациям названных концепций моделирования [3].

Дискретно-событийное моделирование	Системная динамика	Сетевые парадигмы	Моделирование динамических систем	Агентное моделирование
GPSS World, AnyLogic	PowerSim, AnyLogic	Microsoft Project, Sybase PowerDesigner	MATLAB Simulink, AnyLogic	AnyLogic

Графическая оболочка, дискретное и непрерывное моделирование, для AnyLogic – расширение функционала при помощи Java	Графическая оболочка, обработка сценариев «что-если», интеграция с MS Excel	Графическая оболочка, направленность на управление проектами, генерация отчетов	Графическая оболочка, создание гибридных моделей, для Simulink – обширная библиотека блоков	Графическая оболочка, широкие возможности по заданию поведения агента, диаграммы состояний
---	---	---	---	--

Таблица 2. Наиболее часто используемые среды ИМ

Для построения имитационной модели перехода к фракталу была выбрана агентная технология – это объясняется свойствами фракталов. Агентная модель позволяет получить качественную картину эволюционировавшего множества состояний системы, что и является целью задачи. В качестве средства воплощения данной модели выступил профессиональный инструмент моделирования AnyLogic – по мнению авторов, наиболее подходящий и универсальный пакет, в котором сочетается функциональность ИМ, разнообразность и в то же время простота процесса создания модели, а также наглядность и легкость модификации.

Теория фракталов и странные аттракторы

Одним из наиболее волнующих результатов последних исследований по динамике является понятие *странного аттрактора*. Это понятие появилось в связи с работой Лоренца по атмосферным явлениям, а возникновение хаоса при решении простого детерминистического дифференциального уравнения было привлечено для объяснения гидродинамической турбулентности [4].

Аттрактор (англ. to attract — привлекать, притягивать) - устойчивое состояние (структура) системы, которое как бы «притягивает» к себе все множество "траекторий" системы, определяемых различными начальными условиями (если система попадает в конус, или сферу, аттрактора, то она неизбежно эволюционирует к этому устойчивому состоянию (структуре)). Яркими представителями простых аттракторов принято считать неподвижную точку, предельный цикл и тор.

Странный аттрактор - один из видов аттракторов, фазовый портрет которого представляет собой некоторую ограниченную область, по которой происходят случайные блуждания. Следуя И. Пригожину, странный аттрактор можно назвать <хаосом>.

Странный аттрактор позволяет трактовать переход практически любой рабочей системы в аварийное состояние с точки зрения синергетического анализа [5]. В качестве примера можно взять трубопровод, подверженный коррозии, когда разрушение материала происходит в результате статического взаимодействия его с жидкой или с газообразной средой. Одномоментное действие множества факторов, приводящих к возникновению коррозии, можно назвать *точкой бифуркации* – система скачкообразно переходит из одного - в одно из двух вероятностных состояний: «здоровая» и «зараженная» коррозией. Состояние трубопровода с возникшей коррозией является странным аттрактором, т.к. коррозия распространяется по материалу, пока тот не перейдет в аварийное состояние.

Странный аттрактор геометрически представляет собой фрактал [6].

Фрактал (лат. fractus — дроблёный, сломанный, разбитый) — математическое множество, обладающее свойством самоподобия, то есть однородности

в различных шкалах измерения. В математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность (в смысле Минковского или Хаусдорфа).

Модель детерминированного хаоса и странного аттрактора позволяет оценить возникновение различных аварийных и внештатных ситуаций в различных сферах. Особенно это важно, в связи с развитием такой междисциплинарной науки, как синергетика.

Имитация фрактала средствами AnyLogic

Современное проектирование позволяет создавать различные, гибкие модели фракталов, лишь изменяя состояния агентов и правила переходов.

Большое значение в связи с этим приобретает комплекс инструментальной среды AnyLogic, который позволяет видеть и понимать эволюцию создаваемых моделей и принимать важные решения о предотвращении различных неблагоприятных ситуаций – аттракторов.

Исходя из принципа самоподобия фрактальных структур, агентный подход является оптимальным для описания поведения «отправной точки», начального элемента фрактала, и глобального воздействия этого поведения на образование структуры фрактала.

Математические модели типа «клеточных автоматов» в последнее время широко применяются для моделирования систем типа «реакция-диффузия». Кроме того, модели клеточных автоматов применяются при моделировании процессов в нанотехнологиях, при моделировании дорожного движения. Математические модели теории перколяции («просачивания») также можно отнести к моделям типа клеточных автоматов.

Клеточный автомат — дискретная модель. Включает регулярную решётку ячеек, каждая из которых может находиться в одном из конечного множества состояний, таких как 1 и 0. Решетка может быть любой размерности. Для каждой ячейки определено множество ячеек, называемых окрестностью [6].

Построение мультиагентной модели простейшего клеточного автомата «Игра «Жизнь» позволит нам увидеть процесс формирования фрактальной структуры. Первое, что необходимо сделать – это создать новый тип агента, описание которого будет содержать вспомогательные переменные и функции. Сначала задается действие агента при запуске: определение массива агентов-соседей. После следует задать действие агента перед выполнением шага (рекурсивной итерации) – определение количества живых соседей. В данном случае правило перехода такое, что если вокруг выбранной клетки есть хотя бы одна клетка с состоянием «живая», то выбранная клетка переходит в состояние «живая».

В зависимости от времени жизни, клетка окрашивается в тот или иной цвет (самый темный цвет соответствует самому продолжительному периоду жизни). Время жизни определяется как разность текущего системного времени и системного времени в момент «оживления» клетки.

Также для облегчения взаимодействия с моделью реализована возможность «оживлять» клетки при помощи нажатия на соответствующую ячейку поля.

Далее создается массив-популяция агентов заданной численности. Инструментами AnyLogic настраивается размерность пространства и тип соседства (например, Муrowo – 8 соседей). Последним задается длительность шага по времени, такая, чтобы можно было наблюдать эволюцию структуры фрактала.

Построение модели на данном этапе завершается. Далее можно проводить эксперименты. При трехкратном щелчке на разных областях поля моделирования появляются три группы связанных клеток (рис. 1). Спустя n -е количество шагов моделирования картина существенно видоизменяется, являя аттрактор (рис. 2).

Иной пример имитационной модели фрактала – циклический клеточный автомат Гриффита. Циклические клеточные автоматы были придуманы Дэвидом Гриффитом. Клетка может находиться в n состояниях, которые будем нумеровать числами $0, 1, \dots, n-1$. Будем говорить, что состояние t является *следующим* за состоянием k , если $t + 1 = k \pmod{n}$. Клетка из состояния t переходит в следующее состояние k , только если одна из соседних клеток имеет состояние k .

Опустим детали задания модели, продемонстрируем лишь результаты моделирования. Как видно из рис. 3, 4 и 5, начиная работу со случайным образом выбранным клеточным пространством, такой автомат постепенно преобразует поле клеток во вращающиеся ромбовидные спирали. Мы можем увидеть, как работает правило поведения агента, насколько нам это позволяет имеющаяся версия программы AnyLogic.

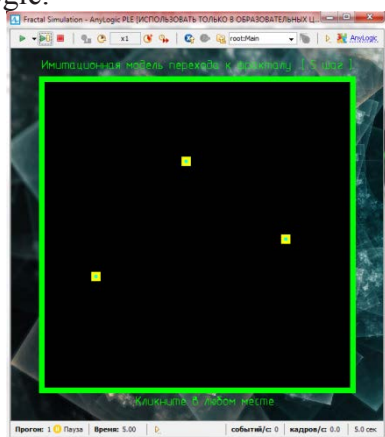


Рис. 1. Начальная популяция

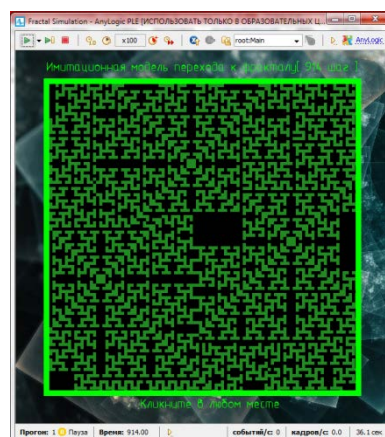


Рис. 2. Конечная популяция

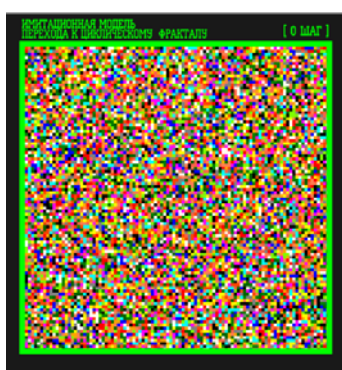


Рис. 3. Шаг 0



Рис. 4. Шаг 350



Рис. 5. Шаг 500

Выводы

Разработка модели показала, что модель детерминированного хаоса и странного аттрактора позволяет оценить возникновение различных аварийных и внештатных ситуаций в различных сферах. Это говорит о расширении области применения

имитационного моделирования, и о возможности дальнейших научных изысканий в области симбиоза детерминированного хаоса с компьютерным моделированием.

Литература

1. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М. В. Киселёва. Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2009.
2. Нечаевский А.В. История развития компьютерного имитационного моделирования. - Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании», вып. №2, 2013.
3. Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференций «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)). – Труды СПИИРАН, вып. №2, 2013.
4. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
5. Григорьев Л.И., Кузьмицкий И.Ф., Санжаров В.В. Системный и синергетический анализ управления непрерывными технологическими процессами в нештатных ситуациях. Труды ВСПУ, ИПУ РАН, Москва, 16-19 июня 2014г.
6. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.