

СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИТ-СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**В.В. Киндинова, Е.О. Кринецкий, Е.В. Кузнецова (Москва)**

Системная динамика в наше время преподается во многих учебных заведениях студентам самых разных направлений обучения. Можно найти в интернете большое количество учебных пособий и методических разработок по этому предмету как в рамках обучения имитационному моделированию в целом, так и ориентированных только на системную динамику как на самостоятельный предмет отдельно от обучения другим подходам имитационного моделирования.

Актуальность преподавания системной динамики объясняется тем, что она является одним из наиболее мощных и популярных инструментов, используемых в настоящее время для анализа и проектирования сложных систем. Она используется для моделирования макроэкономических и социальных процессов, а также при исследовании климата и предсказании погоды, для управления ресурсами и исследования распространения болезней и т.п. Системная динамика пользуется популярностью у большого количества коммерческих, государственных и даже надгосударственных структур, как, например, «Римский клуб». Благодаря прогностическим возможностям системной динамики, в ближайшем будущем при переходе к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, при создании систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта ее востребованность будет только возрастать. Будет возрастать и потребность в специалистах, владеющих инструментами системной динамики. Из-за отмеченных выше тенденций развития общества и технологий в направлении компьютеризации и цифровизации на ИТ-направления большой конкурс, туда попадают наиболее подготовленные и продвинутые учащиеся. С большой долей вероятности сегодняшние студенты ИТ - направлений в недалеком будущем попадут в число специалистов, участвующих в принятии управленческих решений на высоком уровне. Поэтому качество обучения системной динамике студентов ИТ – направлений, воспитание у них ответственного отношения к результатам моделирования является актуальной задачей.

В работе анализируется опыт преподавания системной динамики при подготовке студентов, специализирующихся в области вычислительной математики и программирования, факультета прикладной математики и физики МАИ (после переименования – это Институт №8 «Информационные технологии и прикладная математика» МАИ). Системная динамика преподается на протяжении ряда лет для студентов старших курсов (в течение последних 3-х лет она преподавалась на 1-ом курсе магистратуры) в рамках дисциплины «Имитационное моделирование сложных систем». Системная динамика изучается на восьми двухчасовых лекциях и восьми четырехчасовых лабораторных работах. Всего на имитационное моделирование выделяется 16 двухчасовых лекций и 16 четырехчасовых лабораторных работ. Кроме того, обучение предполагает выполнение студентами курсового проекта, в рамках которого студентам предлагается разработать и исследовать имитационную модель по выбору по одной из тем одной из трех парадигм имитационного моделирования, включающих системную динамику, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование. Дисциплина изучается с использованием пакетов Ithink (поддерживает системно-динамический подход) и AnyLogic (поддерживает все парадигмы имитационного моделирования).

Традиционно сложилось, и это видно по распределению учебной нагрузки, что системной динамике в курсе уделяется серьезное внимание. Однако, как показывает опыт, самостоятельное построение действительно полезных системно-динамических

моделей вызывает у студентов трудности. В значительной степени проблему мы объясняем следующим.

В наше время, как отмечают психологи [7], вследствие реформ школьного образования, когда преподавание наук стало замещаться преподаванием практических навыков, наблюдается изменение типа мышления, типа интеллекта у молодежи. У современных студентов доминирует абстрактно-логическое мышление, которому свойственно обобщение по внешним формальным признакам, без учета внутренних причинно-следственных связей, результатом чего является неспособность выделить связи, выявить суть, понять тенденции. В этом случае заключения делаются довольно быстро на основе статистического анализа, образность, иллюстративность делает их понятными, но при этом заключения не верны. Пренебрежение поиском объективных причинно-следственных связей в окружающем мире порождает неспособность к прогностической деятельности.

Свою задачу мы видим в том, чтобы по возможности в процессе обучения студентов преодолеть это явление, пагубные последствия которого наблюдаются на каждом шагу в нашей повседневной жизни. В этом плане курс выстроен таким образом, чтобы продемонстрировать положение системной динамики в научном знании, показать математические основы и ограничения системной динамики.

На вводной лекции дисциплины обсуждается понятие моделирования вообще и дается определение понятия имитационного моделирования как «вычисления выходных характеристик развивающегося во времени процесса путем воспроизведения течения этого процесса на компьютере с помощью его математической модели; при этом получить требуемые результаты другими способами или невозможно, или крайне затруднительно» [6]. Отмечается, что имитационное моделирование есть результат развития математического моделирования в рассматриваемой области. Указывается, что важнейшим качеством имитационной модели является нахождение ее на границе возможностей математического моделирования [6]. В конце вводной лекции определяются основные парадигмы имитационного моделирования, и в частности, системная динамика.

Системная динамика определяется как подход имитационного моделирования с математической точки зрения наиболее близкий аналитическому подходу. Однако системно-динамические модели не способны формировать свое собственное решение в том виде, в каком это имеет место в аналитических моделях, а могут лишь служить в качестве средства для анализа поведения системы в условиях, которые определяются экспериментатором.

Определяются базовые понятия системной динамики: уровень (интегральная характеристика некоторого накопителя), поток (изменяет значение уровня), вентиль (регулирует поток).

Отмечается, что построение моделей системной динамики выполняется на самом верхнем уровне абстракции, когда исследователь абстрагируется от индивидуальных объектов системы и рассматривает только их агрегированные количественные характеристики. Взаимовлияния и взаимозависимости объектов в модели представляется в виде потоков этих характеристик. Подчеркивается, что системная динамика направлена на изучение не самих систем, а задач, связанных с этими системами; главными особенностями таких систем являются динамика (изменение во времени), петли обратной связи, задержки, нелинейность и переменчивость причин сложного поведения.

Со второй лекции начинается цикл из восьми лекций, посвященных системной динамике. Вторая лекция является экскурсом в математическую теорию динамических систем с целью определить основы системной динамики, используемую терминологию,

традиционные способы визуализации, сопоставить возможности аналитического и системно-динамического подходов. В этом плане[3]:

- определяется понятие динамической системы, рассматривается круг задач, связанных с исследованием динамической системы (задача Коши, задача исследования поведения системы в зависимости от параметра, задача поиска аттрактора – поведения на больших временах);
 - напоминаются методы численного решения задачи Коши;
 - исследуются аттракторы динамических систем, приводится их изображение на плоскости для случая двух уравнений, дается алгоритм нахождения неподвижной точки;
 - рассматриваются типы аттракторов, устойчивость аттракторов, методы определения типа;
 - обсуждается понятие бифуркации;
 - вводится понятие странного аттрактора, рассматривается аттрактор Лоренца.
- На третьей лекции изучается концепция системной динамики Форрестера [6].

Суть концепции Форрестера в следующем. Пусть моделируется некоторый процесс, развивающийся во времени. Пусть этот процесс описывается n характеристиками I_1, I_2, \dots, I_n , значения которых желательно прогнозировать.

Поскольку процесс развивается во времени, чтобы, располагая значениями характеристик I_1, I_2, \dots, I_n в момент времени t , узнать значения характеристик I_1, I_2, \dots, I_n в момент времени $t + \Delta t$, используем значения $\frac{dI_j}{dt}$, $j = 1, \dots, n$. Здесь производные $\frac{dI_j}{dt}$ – скорости изменения характеристик I_1, I_2, \dots, I_n в зависимости от их значения в момент t . Связи между характеристиками и их производными запишем в виде:

$$\frac{dI_j}{dt} = F_j(I_1, I_2, \dots, I_n), \quad j = 1, \dots, n$$

Поскольку вид функций $F_j(I_1, I_2, \dots, I_n)$, в общем случае не известен, Форрестер представил функции $F_j(I_1, I_2, \dots, I_n)$ в виде разложения в ряд по степеням I_k , и ограничился первыми линейными членами разложения. Неизвестные коэффициенты он предложил получать экспериментально. При таких допущениях исходная система принимает вид

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \alpha_{j,1} I_1 + \dots + \alpha_{j,n} I_n, \quad j = 1, \dots, n$$

Форрестер предложил называть характеристики I_1, I_2, \dots, I_n **уровнями**, скорости их изменения $\frac{dI_j}{dt}$, $j = 1, \dots, n$ – **потоками**, произведения $\alpha_{j,k} I_k$, $k = 1, \dots, n$ **темпами** j -ого потока.

Поскольку линейный вид неизвестных функций $F_j(I_1, I_2, \dots, I_n)$ дает очень грубую аппроксимацию, было предложено считать, что коэффициенты $\alpha_{j,k}$ зависят от уровней

$$\alpha_{j,k} = \alpha_{j,k}(I_1, I_2, \dots, I_n), \quad k = 1, \dots, n$$

Было предложено считать, что зависимость имеет специальный мультипликативный вид

$$\alpha_{j,k}(I_1, I_2, \dots, I_n) = \alpha_{j,k} \omega_{j,k,1}(I_1) \dots \omega_{j,k,n}(I_n), \quad k = 1, \dots, n$$

здесь $\alpha_{j,k}$ имеют те же значения, что в линейном разложении. Каждый множитель $\omega_{j,k,l}$, $l = 1, \dots, n$ зависит лишь от одного аргумента – «своего уровня» I_l , при этом базовым значением $\omega_{j,k,l}$ считается 1. Будем считать, что под действие аргумента $\omega_{j,k,l}$ может отклоняться от 1 в ту или другую сторону: если увеличение l -ого уровня вызывает уменьшение (j,k) -ого темпа, то $\omega_{j,k,l} < 1$, если наоборот, то $\omega_{j,k,l} > 1$. Положим величину увеличения или уменьшения пропорциональной отклонению $\omega_{j,k,l}$ от 1.

Окончательно модель приобретает вид:

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \sum_{k=1}^n a_{j,k} \prod_{l=1}^n \omega_{j,k,l} (I_l) I_k, \quad j = 1, \dots, n$$

Форрестер предложил изображать уровни прямоугольниками, темпы – вентилями, множители ω кружками, зависимость множителей от уровней – дугами от прямоугольников к кружкам. В таком случае полученную модель можно представить в виде графической или потоковой диаграммы. Положительную или отрицательную зависимость (обратную связь) можно помечать значками «+» или «-» над дугами.

Достоинство подхода Форрестера в том, что можно построить приемлемую модель достаточно сложного процесса в терминах уровней потоков, темпов, не прибегая к понятиям дифференциальных уравнений. Однако в силу названных выше ограничений необходимо осознавать, что модель может быть довольно грубой. Здесь же студенты знакомятся с моделями Форрестера «динамики предприятия» и «мировой динамики».

С целью выработки «системного мышления» четвертая лекция является экскурсом в теорию системного анализа [5]. В этом плане:

- рассматривается понятие системы и объясняется, что отклик системы на внешнее воздействие – это, прежде всего, свойство самой системы;
- обсуждаются характеристики системы: устойчивость, упругость, самоорганизация и иерархическое строение;
- исследуются причины нежелательного поведения системы, в числе которых нелинейность окружающего мира, сложность определения границ системы, закон лимитирующего фактора, запаздывания, ограниченная рациональность;
- рассматриваются системные «ловушки» (системные структуры, которые генерируют часто встречающиеся типы проблемного поведения) и возможности их преодоления;
- обсуждаются возможные ключевые точки воздействия на систему для изменения ее поведения с минимальными усилиями.

Пятая и шестая лекции посвящены методике системно-динамического моделирования: от качественного анализа сложных систем в виде казуальных диаграмм (Casual loop diagram) до построения моделей системной динамики [2].

В этом плане на лекциях излагаются:

- правила определения полярности связей, положительного и отрицательного контура;
- типы нелинейного поведения сложных систем (осцилляция, S-образный рост, S-образный рост с превышением, превышение и коллапс);
- поучительные примеры качественного анализа [2];
- перевод казуальной диаграммы в потоковую (правила размерностей потоковой диаграммы, правила установления взаимосвязей накопителей).

На седьмой лекции рассматриваются задачи построения базовых моделей (самоусиление – экспоненциальный рост, уравнивание), а также моделей динамики численности населения, динамики капитала, изменения запаса автомобилей на складе с учетом запаздываний [5].

На восьмой и девятой лекциях рассматриваются более сложные задачи построения и исследования моделей: динамики исчерпания невозобновимого ресурса на примере нефтяной отрасли, динамики исчерпания возобновимого ресурса на примере рыболовецкой отрасли [5], модель распространения инноваций [8], модель ЛТ [1].

При обучении большое внимание уделяется вопросам тестирования построенной модели и оценке ее достоверности [4]. Поскольку этот материал относится ко всем

парадигмам имитационного моделирования, он выносится на десятую лекцию курса. В плане оценки достоверности модели рассматриваются:

- проверка адекватности (модель в пределах рассматриваемой области приложений ведет себя с удовлетворительной точностью в соответствии с целями моделирования);
- верификация модели (проверка на соответствие алгоритма ее функционирования замыслу моделирования и своему назначению);
- оценка точности (оценка влияния стохастических элементов на функционирование модели сложной системы);
- оценка устойчивости результатов моделирования (характеризуется сходимостью контролируемого параметра моделирования к определенной величине при увеличении времени моделирования системы);
- анализ чувствительности имитационной модели (влияние колебаний значений входных переменных на выходные переменные – отклики модели).

Поскольку имитационные модели являются моделями прогонного типа, для них важны вопросы организации проведения вычислительных экспериментов. Вопросы тактического и стратегического планирования имитационного эксперимента в равной степени касаются всех парадигм имитационного моделирования. Они выносятся на завершающие одиннадцатую и двенадцатую лекции курса [4].

Лабораторные работы иллюстрируют, с одной стороны, теоретический материал, с другой – направлены на овладение инструментарием пакетов Ithink и AnyLogic. Они организованы таким образом, чтобы решение постепенно усложняющихся задач на построение и анализ потоковых диаграмм сопровождалось применением постепенно усложняющегося инструментария пакетов. Методическое пособие для проведения лабораторных работ содержит двенадцать динамических контуров [1]. Для каждого контура предлагаются по две метафоры вербального описания моделируемого процесса. Для каждого контура в пособии приведена казуальная диаграмма, поясняющая суть процесса. Каждый контур реализован в двух пакетах. В пособии представлены скриншоты обеих реализаций с графиками и таблицами результатов моделирования. В методическое пособие помимо базовых контуров *Самоусиление*, *Уравновешивание*, *Уравновешивание под воздействием лага реализации решений*, включены оригинальные контуры *Неограниченный конкурентный рост*, *Ограниченный конкурентный рост*, *Дрейфующая цель*, *Эскалация*, *Решение, обреченное на неудачу*, *Рост при слабом инвестировании*, *Смещение бремени нагрузки*, *Конкурентное использование ограниченного ресурса*, *Соперничество случайных конкурентов*.

При выполнении лабораторных работ перед студентами ставится задача по представленным в пособии изображениям изучить инструментарий, построить модели и добиться их поведения соответственно приведенным графикам и таблицам. Во время защиты лабораторных работ студентам предлагается предложить свою метафору для любой из выполненных моделей.

Курсовой проект по выбранной теме, если студент выбрал тему из раздела системной динамики, предполагает выполнить всю задачу на построение системно-динамической имитационной модели, включая этапы:

- формулировка проблемы и определение целей имитационного исследования (содержательное описание объекта моделирования);
- построение казуальной диаграммы модели;
- построение потоковой диаграммы, идентификация модели;
- тестирование разработанной модели: верификация модели, оценка адекватности, исследование свойств имитационной модели;

- планирование и проведение имитационного эксперимента;
- анализ результатов моделирования; интерпретация результатов моделирования и их использование с целью принятия решений.

В завершение курса, студенты сдают экзамен и защищают курсовой проект.

В курсе заведомо не преподаются подробности инструментария. Студенты IT-направлений замечательно справляются с этой задачей самостоятельно. Отличительной чертой курса является насыщенный, синтетический характер изучаемого материала. В курсе делается попытка выработать у студентов научный подход при применении системной динамики, попытка избавить студентов от религиозного отношения к моделям и результатам моделирования. Надеемся, что успешное изучение курса увеличит шансы наших студентов быть востребованными в долгосрочной перспективе.

Литература

1. **Казаков С.А., Шебеко Ю.А.** Практикум по основам моделирования бизнес-процессов: Учебное пособие / Под ред. Ю.А. Шебеко. М.: Изд-во МАИ, 2002.
2. **Каталевский Д.Ю.** Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учеб. пособие. М.: МГУ, 2011.
3. **Кирьянов Д.В., Кирьянова Е.Н.** Вычислительная физика – М.: Полибук Мультимедиа, 2006.
4. **Лычкина Н.Н.** Имитационное моделирование экономических процессов: Учебное пособие для слушателей eMBA – М: Инфра-М, 2012.
5. **Медоуз Д.Х.** Азбука системного мышления/ пер. с англ.; под ред. Н.П.Тарасовой, М.: БИНОМ, 2010.
6. **Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И.** Имитационное моделирование: учебное пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2008.
7. **Ясюкова Л.А.** Изменение структуры интеллекта подростков с 1990 по 2020 годы, доклад на 14 Санкт-Петербургском саммите психологов, [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=hLMdmsp3xaA> (16.09.2020).
8. **Sterman John D.** Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World. (Boston: Irwin McGraw Hill, 2000).