

## ИНФОРМАТИКА

УДК 621.396.218

### ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ «ГОРОД»

*канд. техн. наук, доц. А.Ф. ОСЬКИН*  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматривается подход к моделированию сложных систем, известный как системная динамика. Этапы построения модели прослеживаются на примере модели экосистемы «Город». Приводятся описание модели и результаты моделирования.*

Введение. Основоположителем теории системной динамики является Джей Форрестер [1]. Сравнивая два подхода к построению моделей сложных систем - теорию операций и системную динамику, Форрестер отмечал, что, в отличие от теории операций, системная динамика подчеркивает нелинейный характер моделируемой системы и огромную роль петель обратной связи. Это позволяет более точно и полно отображать картину реального мира в моделях системной динамики.

В соответствии с теорией системной динамики модели реальных систем строятся из множества переменных, взаимодействующих друг с другом через петли обратной связи. Взаимодействия между этими петлями и определяют поведение системы в целом.

При этом для всех петель и взаимодействий между ними задаются их количественные и качественные характеристики и определяются точки управления, в которых можно вмешиваться в процесс, изменяя поведение системы.

Сенге [2] особо подчеркивал контринтуитивный характер деятельности системы. Именно с помощью методологии системной динамики он сумел достаточно просто показать, почему, например, справедливы утверждения: «Любое улучшение сначала приносит вред, прежде чем начать приносить пользу» и «Лекарство может принести больше вреда, чем сама болезнь».

Технология компьютерного моделирования с использованием теории системной динамики. Как и любая технология компьютерного моделирования, технология компьютерного моделирования с использованием теории системной динамики состоит из следующих действий [3]:

- определение целей моделирования;
- разработка концептуальной модели;
- формализация модели;
- программная реализация модели;
- планирование модельных экспериментов;
- реализация плана эксперимента;
- анализ и интерпретация результатов моделирования.

Наиболее ответственным этапом является этап разработки концептуальной модели. На этом этапе исследователь описывает модель и определяет характеристики взаимодействия между ее элементами. Здесь все зависит от ума, опыта и научной интуиции модельера. Далее, в ходе компьютерной симуляции, исследователь определяет, насколько верна его модель и проверяет свои гипотезы о поведении системы.




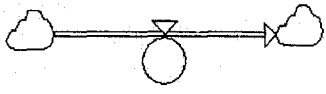
Результаты компьютерного моделирования используются в качестве основы для дальнейших исследований и разработок. На основе анализа модели, в частности, может быть принято решение о построении натурального образца системы и проведении дорогостоящих натуральных испытаний.

Основным инструментом системной динамики является потоковая диаграмма.

Потоковая диаграмма отображает связи между элементами моделируемой системы, а также их качественные и количественные характеристики. Строится потоковая диаграмма на основе диаграммы каузальных петель, представляющей собой подписанный диграф, иллюстрирующий петли положительной и отрицательной обратной связи.

Условные обозначения элементов потоковой диаграммы в нотации моделирующей среды Powersim Express 2005 приведены в таблице.

Условные обозначения элементов потоковой диаграммы

Название элемента	Условное обозначение элемента на потоковой диаграмме	Характеристика элемента
Уровень (Level)	 Level_1	Базовый тип переменных модели. Используется для отображения состояния переменных системы. Функция элемента – аккумуляция потоков, с которыми этот элемент соединен на потоковой диаграмме
Переменная (Auxiliary)	 Auxiliary_1	Простая переменная, изменяющаяся на каждом шаге моделирования
Константа (Constant)	 Constant_1	Константа, не изменяющаяся в процессе моделирования
Поток (Flow)	 Rate_1	Базовый тип переменных модели. Используется для отображения потоков, накапливающихся в элементах типа «Уровень»

Для иллюстрации технологии моделирования рассмотрим полный цикл построения модели на примере моделирования экологической ситуации в городе.

**Динамическая модель экосистемы «Город».** Первую динамическую модель города Джей Форрестер [4] построил в 1969 году. Модель Форрестера позволяла проследить изменение численности населения в городе, в зависимости от интенсивности городского строительства и налоговой политики, проводимой городскими властями. Модель Urban1 никак не учитывала экологическую обстановку в городе, к тому же и более поздние модели ставили экологию города далеко не на первое место. Настоящая работа призвана восполнить этот пробел в динамическом моделировании городских процессов.

Наша модель опирается на подходы Форрестера, но учитывает экологические процессы и их влияние на качество жизни городского населения. Моделировался абстрактный город с населением 1 000 000 человек. Такой подход (построение базовой модели абстрактного города) был предложен в работах российских экологов Б.Б. Прохорова, В.П. Казначеева и В.С. Вишаренко [5]. Опираясь на предложенную ими балансную модель, мы построили динамическую модель экосистемы «Город». В модели учитывались как поступления веществ в город, так и выбросы, и отходы самого города.

**Цели моделирования.** Целью построения данной модели являлся анализ возможных сценариев развития экологической ситуации в городе. Кроме того, при построении модели мы отлаживали методику и технику моделирования с использованием системной динамики.

Как уже указывалось выше, в качестве среды, в которой строятся модели, нами был выбран пакет для динамического моделирования Powersim Studio 2005. В связи этим выбором появилась и дополнительная цель моделирования - апробация возможностей пакета на данной модели.

**Разработка концептуальной модели.** При построении модели мы взяли за основу известную модель Urban1, созданную Д. Форрестером.

Модель Форрестера состоит из двух секций:

- секции «Population», моделирующей движение численности населения в городе;
- секции «Housing», моделирующей жилищное строительство.

При построении своей модели Форрестер исходил из предположения, что чем больше строится в городе жилья, и чем доступней это жилье, тем привлекательней город для проживания в нем.

Мы практически полностью сохранили секцию «Population» модели Форрестера, произведя следующие изменения:

- ввели две новые переменные - «Pollution» («Выбросы») и «Pollution Concentration» («Концентрация выбросов»);
- одну константу - «Maximum Permissible Concentration (MPC)» - «Предельно допустимая концентрация (ПДК)»;
- одну функцию - «Attraction Due to Housing» - функция привлекательности города для заселения.

Функция привлекательности города для заселения - некоторая эмпирическая функция, имеющая вид, представленный на рис. 1. Аргументом для нее служит переменная «Pollution Concentration», которая рассчитывается на каждом шаге моделирования как отношение количества выбросов, приходящихся на одного жителя города, к ПДК.

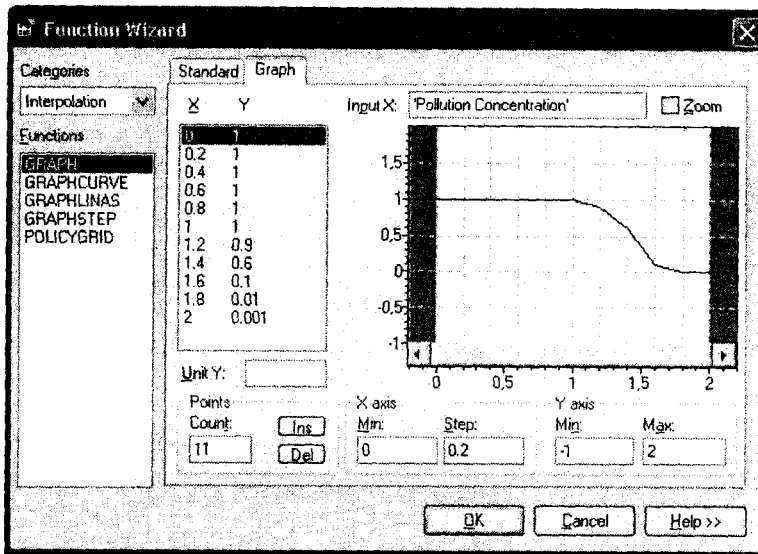


Рис. 1. Функция привлекательности города

Как видно из рисунка, привлекательность остается неизменной и равной единице при концентрации выбросов, меньшей, чем ПДК, и довольно резко падает при превышении ПДК. Вид секции «Population» приведен на рис. 2.

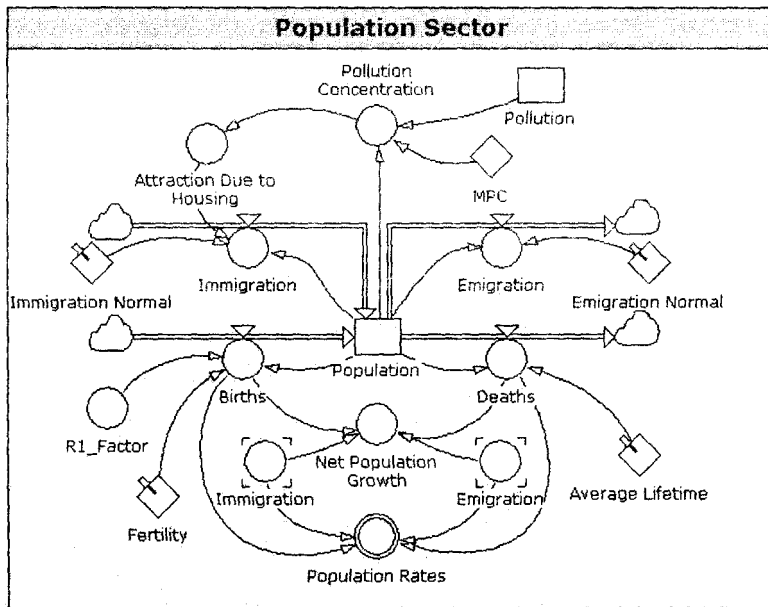


Рис. 2. Секция движения численности населения

Вторая половина модели - секция «Pollution» - моделирует выбросы, поступающие в город. Считаем, что с достаточной для пробного моделирования точностью процесс изменения количества выбросов может быть описан уравнением Ферхюльста:

$$\frac{dx(t)}{dt} = x(t) \cdot (\alpha - \beta \cdot x(t)).$$

Решение этого уравнения есть логистическая кривая, поведение которой зависит от соотношения параметров. Может иметь место как рост, так и снижение  $x(t)$  во времени. Вид секции «Pollution» приведен на рис. 3.

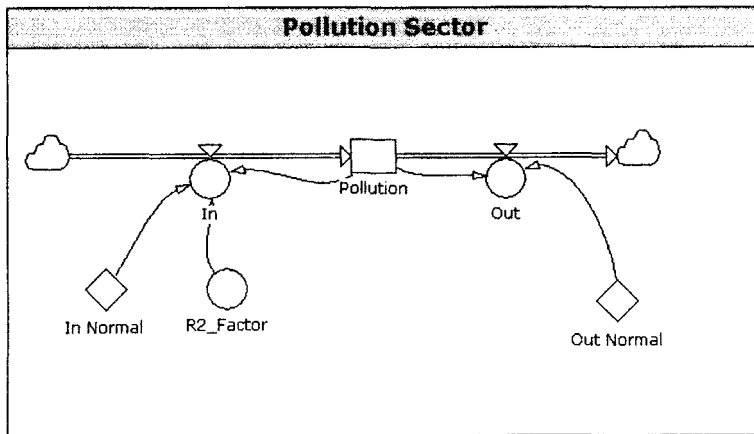


Рис. 3. Секция загрязнений

**Анализ результатов моделирования.** Как показали проведенные машинные эксперименты, возможны четыре сценария поведения системы:

- население с течением времени может полностью покинуть город (рис. 4);
- численность населения города может стабилизироваться на некоторой величине (рис. 5);
- численность населения города может испытывать периодические колебания (рис. 6);
- численность популяции меняется хаотически (рис. 7).

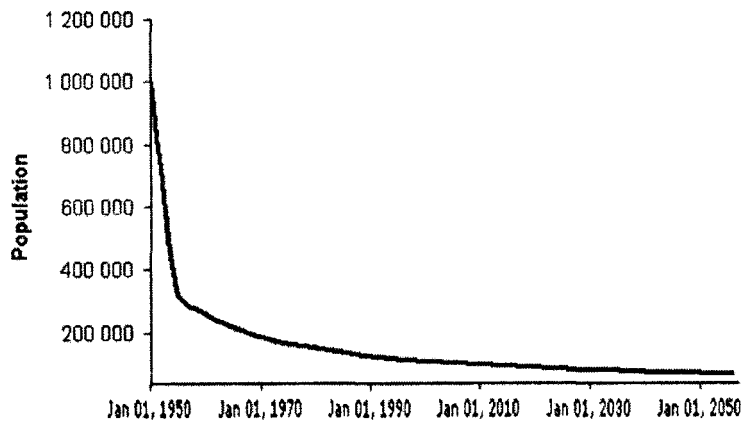


Рис. 4. Гибель города

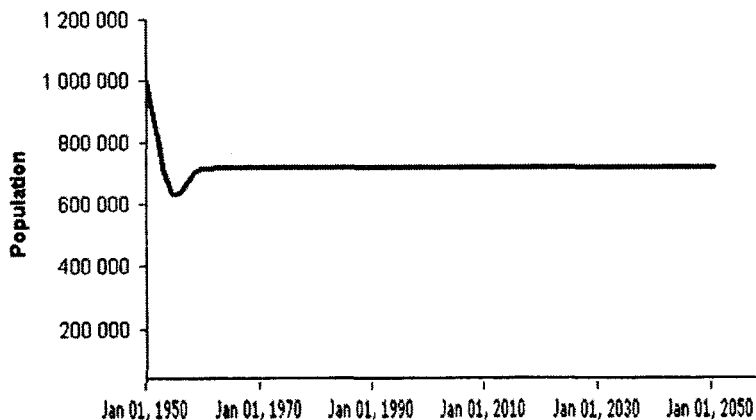


Рис. 5. Стабилизация численности населения

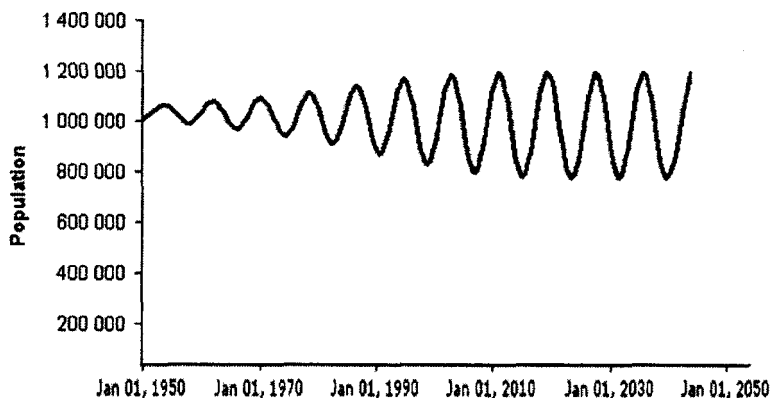


Рис. 6. Колебания численности населения

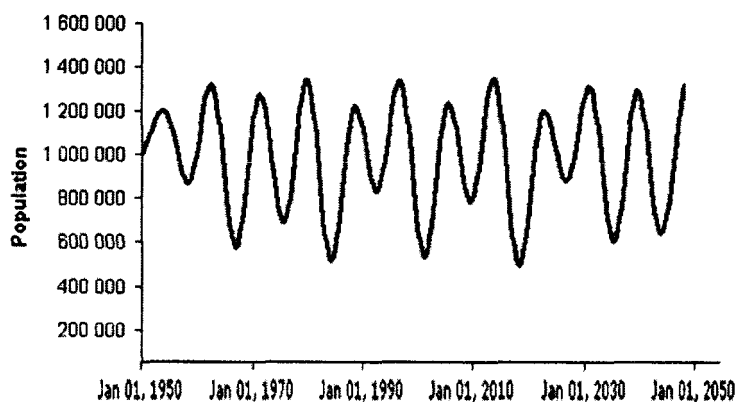


Рис. 7. Хаотические колебания численности населения

### Выводы

1. Несмотря на простоту, модель демонстрирует сложное, контринтуитивное поведение, адекватное процессам, имеющим место в реальной жизни.

2. Модель может быть использована для прогнозирования экологической ситуации в реальном городе, однако для этого необходимы ее дополнительные настройки с учетом конкретной статистики выбросов в городе. Кроме того, в модели реального города необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на привлекательность города для заселения - стоимость проживания, доступность жилья и т.д.

3. Системная динамика является эффективным методом исследования сложных систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Forrester Jay W. Industrial Dynamics. - Waltham, MA: Pegasus Communications, 1961. - 464 p.
2. Сенге П. Пятая дисциплина: искусство и практика самообучающейся организации. - М.: Олимп - Бизнес, 1999. - 408 с.
3. Дьяконов В.П. VisSim + Mathcad + MATLAB Визуальное математическое моделирование. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 383 с.
4. Forrester, Jay W. Urban Dynamics. - Waltham, MA: Pegasus Communications, 1969. - 285 p.
5. Казначеев В.П., Прохоров Б.Б., Вишаренко В.С. Экология человека и экология города: комплексный подход // Экология человека в больших городах. - Л., 1988.