

УДК 378.574

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ\*

### METHODOLOGICAL ASPECTS OF SIMULATION OF ECOLOGICAL SYSTEMS

Л. В. Петрова<sup>1</sup>, А. В. Баранов<sup>2</sup>, Е. И. Царегородцев<sup>2</sup>, Д. А. Корепанов<sup>1</sup>

L. V. Petrova<sup>1</sup>, A. V. Baranov<sup>2</sup>, E. I. Tsaregorodtsev<sup>2</sup>, D. A. Korepanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,  
г. Йошкар-Ола

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола

**Аннотация.** В статье рассмотрены методологические аспекты имитационного моделирования экологических систем. Имитационное моделирование необходимо для управления устойчивостью таких систем. Управление устойчивостью экологических систем авторы, в свою очередь, связывают с развитием современных информационных технологий – имитационным моделированием с использованием систем Pilgrim и MathCAD. Рассматриваются возможности технологии имитационного моделирования при инновационных решениях задач, связанных с развитием экологических систем.

**Abstract.** The article reviews the methodological aspects of simulation of ecological systems. Simulation is necessary for stability management of these systems. The authors associate the stability management of ecological systems with the development of modern information technologies such as simulation on the basis of the systems Pilgrim and MathCAD. The possibilities of the technology of simulation in innovative solution of tasks of developing ecological systems are considered.

**Ключевые слова:** экологические системы, имитационное моделирование, концепция устойчивого развития экологических систем, Pilgrim, MathCAD.

**Keywords:** ecological systems, simulation, stability development concept of ecological systems, Pilgrim, MathCAD.

**Актуальность исследуемой проблемы.** Процессы, происходящие в эколого-экономических системах, имеют высокую степень неопределенности. Поэтому считаем, что исследование поведения таких систем целесообразно с использованием имитационного моделирования.

Имитационное моделирование экологических систем является в настоящее время быстро развивающимся направлением в экологии. Возможности этого метода позволяют учитывать и рисковые события. Само определение имитационного моделирования и имитационной модели дано в книге А. А. Емельянова [5].

Перечислим несколько направлений имитационного моделирования, которые могут быть интересны экологам:

- 1) построение экологических моделей и экологическое прогнозирование;
- 2) построение биофизических моделей;
- 3) развитие методов обработки экспериментальных данных применительно к различным типам экологических и биологических задач.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ, проект №12-02-00023а

Решение задач рационального использования природных ресурсов приводит к необходимости разработки методов управления динамическими экологическими системами (ЭС). При этом специфика ЭС обуславливает постановку задач управления.

Целью настоящей работы является исследование экологических систем с использованием имитационного моделирования.

**Материал и методика исследований.** Для проведения исследований использовались данные мониторинговых исследований состояния природной среды Волго-Вятского экономического района.

В основе экологического прогнозирования может быть два методологических подхода, связанных либо с анализом поведения во времени динамической модели исследуемой системы, либо с экстраполяцией временных рядов после статистической обработки. Первый подход представляется наиболее интересным, так как позволяет выявить «уязвимые» элементы системы.

Для оценки устойчивости экологических систем применялось моделирование на основе использования методологии системного анализа и применения информационных технологий к расчету параметров ЭС с использованием системы Pilgrim (для получения имитационной динамической модели природно-производственной системы) и системы MathCAD (для форрестеровских уравнений зависимости).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Центр тяжести исследования в данной работе сфокусирован не на сопоставлении имеющихся расчетных методик, в том числе и долговременных экологических, а на дальнейшей разработке методологических подходов к моделированию ЭС и повышению точности и надежности расчетов посредством применения метода имитационного моделирования.

В связи с этим будем считать, что именно управление устойчивостью является действенным инструментом для сохранения природной среды. Устойчивость является целевой характеристикой управляемой экологической системы. Вопросам управления устойчивостью ЭС при совершенствовании методологических подходов оценки развития ЭС и будет уделено основное внимание в данной работе.

В работе [2] выделяются грубые системы – понятие, введенное впервые А. А. Андроновым и Л. С. Понтрягиным.

Свойство динамической системы быть грубой представлялось особенно важным в случаях систем, возникающих в связи с приложением, относящимся к конкретным физическим проблемам.

Вопросы качественной структуры динамических систем рассматриваются в качественной теории (КТ) [1], так сказать, статически: предполагается, что исследуемая система не меняется. В отличие от этого основные задачи, рассматриваемые в [2], относятся к вопросу о том, как меняется топологическая структура динамической системы при изменении самой системы.

Несомненно, экологические системы относятся к классу грубых систем, так как они имеют определенный запас устойчивости при изменении параметров системы. И именно устойчивость системы является объектом управления. Соответственно, эффективное управление устойчивостью системы требует построения динамических моделей для прогнозирования развития этой системы.

Имитационное моделирование (ИМ) сочетает в себе описание модели и специального программного продукта, позволяющего многократно проводить исследования процессов, происходящих в ЭС. Посредством ИМ можно ставить управляемые эксперименты. Результат имитационного моделирования – статистический комплекс исследуемых параметров.

Предметная область метода имитационного моделирования практически безгранична. Развитие самого метода ИМ происходит в рамках развития и совершенствования информационных технологий управления, в том числе и в такой области, как природопользование.

В связи с этим именно управление устойчивостью, на наш взгляд, является действенным инструментом для сохранения природной среды.

Экологические системы относятся к «большим системам», и интерес к их исследованию не уменьшается. Вопросы, связанные с моделированием ЭС, поведение которых, кроме всего прочего, связано с высокой степенью неопределенности, рисками, – одни из самых сложных и интересных в научном плане. В связи со сложностью рассматриваемой темы, учитывая главным образом высокую степень неопределенности при моделировании ЭС, будем считать правомерным целесообразность использования имитационного динамического моделирования.

В работе [4] исследуются проблемы, связанные с управлением развитием ЭС. Основное внимание при этом уделяется вопросам устойчивости ЭС в процессе эволюции научного развития. Делаются попытки математического определения критериев устойчивости. Рассматривается аппарат теории форрестеровских уравнений динамики как наиболее адекватный метод исследования ЭС.

Основное внимание в работе уделяется вопросам использования методологии системного анализа и применения информационных технологий к расчету параметров ЭС с использованием CASE-технологии конструирования моделей «без программирования» Pilgrim (с применением Visual Studio), основным достоинством которой является оценка рисков инвестиционных проектов [7], и системы MathCAD (для форрестеровских уравнений зависимости [11]).

В работе [4] представлены расчеты ЭС («Национальный Парк» на примере Волго-Вятского региона) с использованием системы MathCAD. Расчеты по работе «На рейде приплава» выполнены с применением CASE-технологии конструирования моделей «без программирования» Pilgrim.

Достоинствами системы программного обеспечения Pilgrim являются [5]:

- компактность описания модели на языке программирования типа Pilgrim по сравнению с аналогичной алгоритмической моделью на Visual Basic;
- визуальное конструирование модели во время проведения структурного анализа;
- работа различных версий этой системы под управлением операционных систем семейств Unix и Windows при наличии компилятора C++;
- высокое быстродействие моделей за счет компиляции и возможность встраивания объектного кода в системы поддержки принятия решений в различных временных масштабах.

Можно утверждать, что использование современных программных средств решения имитационных задач (в частности, пакетов MathCAD, Pilgrim и других) позволяет обеспечить решение с необходимой и достаточной степенью точности.

Для принятия решений, которые важны для современной науки, необходим верный прогноз развития системы, который, в свою очередь, подразумевает использование адекватной модели.

Естественное развитие экологических процессов происходит медленно; полной базовой информации, необходимой для построения моделей различных систем, как правило, нет, и ее приходится выявлять из разнообразия прочей информации, сбор которой происходил хоть и в сопутствующих областях, но с совершенно другими целями.

Исходя из вышперечисленного, построение адекватных экологических моделей и, тем более, прогнозов на их основе находится в гораздо большей зависимости от длительности решения задачи. Поэтому в задачах экологического моделирования и прогнозирования часто обращаются к экспертным оценкам, которые могут носить субъективный характер.

Однако возрастает потребность в надежных экологических прогнозах. При этом возникает задача оценки адекватности этих прогнозов реальным ЭС.

Считаем, что модель управления ЭС должна состоять из следующих подсистем:

- природной;
- экономической;
- социально-демографической.

Природная подсистема должна описывать физические и экологические процессы, способствующие загрязнению природных ресурсов или, наоборот, разложению накопленного загрязнения.

Здесь, очевидно, уместно противопоставить возможности MathCAD и Pilgrim при использовании методологии системного анализа.

MathCAD используется для проведения вычислений после определения целевой функции ЭС, определения системы ограничений, построения страт и эшелонов [8], [9, 10]; тогда как система имитационного динамического моделирования (ИМ) Pilgrim считается одним из наиболее удобных средств создания имитационных динамических моделей, так как позволяет работать:

- одновременно с параллельными процессами в разных плоскостях;
- с системой массового обслуживания (СМО);
- с теорией рисков [6].

Кроме того, система Pilgrim:

- поддерживает временную и пространственную имитацию объектов;
- позволяет создавать дискретно-непрерывные модели;
- дает возможность использовать (при обработке информации) теорию вероятности и математической статистики;
- позволяет вставлять в текст модели программные блоки на языке C++.

Модели в системе Pilgrim описываются в графическом конструкторе Gem (Generatormodels).

При построении модели с использованием системы Pilgrim была применена методология системного анализа с последующей компиляцией полученной модели.

Именно система Pilgrim позволяет исследовать устойчивость эколого-экономической системы за счет оценки рисков событий. Если обозначить через  $g_r$  количество витков годографа при реализации модели управления ЭС, тогда величина  $R$ , определяемая как

$$R = 1 - \frac{g_r}{n},$$

может характеризовать вероятность наступления рискованного события на основе имеющихся мониторинговых данных.

Критерий Найквиста – Михайлова достаточно успешно реализуется с помощью вышеприведенного аппарата, изложенного в [3], применительно к методике определения устойчивости замкнутой системы управления.

Об оценке эффективности управления того или иного этапа технологического процесса можно судить по проценту загрузки конкретного узла графа модели, реализованной в системе Pilgrim.

В работе [4] рассматривается пример использования системы Pilgrim для имитационного динамического моделирования процессов выгрузки лесоматериалов с воды на рейдах приплава лесопромышленных предприятий.

Водный транспорт леса (ВТЛ) чрезвычайно востребован, а в отдаленных лесных регионах при наличии водных путей – единственно возможен. Сегодня до 10 % древесного сырья поставляется потребителям водным путем. ВТЛ является одной из важных составляющих в экономике лесного комплекса России.

Целью исследований явилось совершенствование процессов выгрузки лесоматериалов с воды на лесопромышленных предприятиях с рейдами приплава методом имитационного динамического моделирования. Использовались методы объектно ориентированного программирования, имитационного динамического моделирования в системе Pilgrim.

Получены результаты экспериментальных исследований равнинных грузоподъемных машин на выгрузке лесных грузов с воды лесопромышленных предприятий, отличающиеся широким диапазоном исследуемых факторов и учетом специфических условий их эксплуатации на рейдах приплавов.

В качестве критерия оптимизации приняты показатели абсолютной производительности грузоподъемного оборудования и относительной эффективности системы.

**Резюме.** Можно сделать вывод, что программа Pilgrim позволяет имитировать различные варианты ЭС (при наличии мониторинговых статистических данных). Осуществляя верификацию полученной имитационной модели, можно получить результаты оптимизации. Разработанные имитационные динамические модели лесоперевалочных процессов на рейдах приплава могут быть использованы на лесопромышленных предприятиях, в научно-исследовательских институтах, занимающихся разработкой грузоподъемных машин и оборудования для лесной промышленности, что в конечном итоге позволит более эффективно оценивать состояние новых разработок водного транспорта леса и, главное, успешно и своевременно решать экологические проблемы водных магистралей, по которым сплавляется лес. Если рассматривать проблему более глобально, то применение имитационных динамических моделей экологических систем позволяет оценить последствия тех или иных управленческих решений на региональном уровне, а также выбрать тот сценарий, который будет более эффективным с точки зрения баланса между сохранением состояния природной среды на нормативном уровне и получения экономического эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов, А. А. Качественная теория динамических систем второго порядка / А. А. Андронов. – М. : Наука, 1967. – 487 с.
2. Андронов, А. А. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / А. А. Андронов. – М. : Наука, 1966. – 568 с.
3. Анфилатов, В. С. Системный анализ в управлении : учеб. пособие / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин ; под ред. А. А. Емельянова. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 368 с.
4. Баранов, А. В. Управление устойчивостью эколого-экономических систем региона / А. В. Баранов, Л. В. Петрова. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 184 с.
5. Емельянов, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов : учеб. пособие / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Р. В. Дума. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 250 с.
6. Емельянов, А. А. Планирование экстремальных экспериментов с имитационными моделями / А. А. Емельянов // Прикладная информатика. – 2013. – № 3. – С. 76–90.
7. Емельянов, А. А. Технология программного моделирования и управления моделями в системе Astor Pilgrim / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Н. З. Емельянова, Н. Н. Прохимнов // Прикладная информатика. – 2013. – № 5. – С. 64–95.
8. Плис, А. И. Математический практикум для экономистов и инженеров : учеб. пособие / А. И. Плис, Н. А. Сливина. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 656 с.
9. Поздеев, А. Г. Моделирование систем : учеб. пособие / А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова. – Сыктывкар : СЛИ, 2010. – 256 с.
10. Поздеев, А. Г. Системный эколого-экономический анализ состояния водных ресурсов / А. Г. Поздеев, Е. Ю. Разумов, Ю. А. Поздеева, Е. В. Моспанова, А. В. Башкиров. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2002. – 47 с.
11. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М. : Наука, 1978. – 168 с.