

# **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

**А. Л. Бердникова, Ю. С. Манжос**

*Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина*

Научный руководитель И. В. Шостак

Развитие современного общества обеспечивается гармоничным взаимодействием сложных систем (СС), функционирование которых требует управления большим количеством параметров, определяющих состояние системы. Оптимальное управление сложными, например, социально-экономическими, техническими, экологическими сис-

темами часто невозможно без прогнозирования дальнейшей эволюции СС. Удобно прогнозировать состояние СС с помощью численной модели (ЧМ), в большинстве случаев – системы дифференциальных уравнений вместе с начальными значениями вектора состояния. Недостаток такой модели заключается не только в необходимости последующего уточнения констант интегрирования, но и в возможной некорректности самой модели, использованной для прогнозирования развития ситуации. Одно из решений основано на диверсификации модели, т. е. использовании нескольких моделей, построенных с использованием различных принципов.

Известно, что анализ физических размерностей (АФР) позволяет не только создавать аналитические модели (АМ) различных физических процессов и явлений, но и верифицировать численные модели [1]. Совместное использование АМ и верифицированной ЧМ не только повысит достоверность прогноза, но и снизит риски принятия некорректных решений при управлении сложными системами. Это требует разработки информационной технологии (ИТ), рассмотрению которой и посвящена данная работа.

Существующие системы единиц (СЕ) основаны на использовании множества некоторых физических величин, отражающих наиболее общие свойства материи. Например, система СГС использует базис « $M$  – масса (г),  $L$  – длина (см),  $T$  – время (с)», а МКГСС – базис « $F$  – сила (килограмм-сила),  $L$  – длина (метр),  $T$  – время (с)». Международная система СИ имеет базис « $M$  – масса (кг),  $L$  – длина (метр),  $T$  – время (с),  $I$  – сила тока (Ампер),  $\theta$  – температура (Кельвин),  $N$  – количество вещества (моль),  $J$  – сила света (кандела), угол (радиан), телесный угол (стерадиан). Кроме общепринятых СЕ известны также внесистемные единицы, например, русская система мер, которая была в 1924 г. заменена метрической, и включает аршин, золотник, сажень, пуд и т. п. Английская СЕ: миля, галлон, дюйм, ярд и т. п. Наличие различных систем и внесистемных единиц ставит задачу перевода единиц и обуславливает необходимость контроля согласованности величин, использованных при построении модели.

В каждой из СЕ вся совокупность физических величин разделена на два класса: основных и производных единиц. Основные величины представляют собой базис СЕ, а физическая размерность производных величин выражается через них. При этом размерность производных величин – произведение степеней основных единиц. В СИ сила тока – основная единица, а в СГС – имеет размерностью  $L^{3/2} T^{-2} M^{1/2}$ . В то же время для температуры в теоретических исследованиях часто используют размерность, совпадающую с размерностью энергии  $L^2 T^{-2} M$ . Таким образом использование СЕ определяется целями моделирования. Очевидно, что для моделирования социально-экономических систем целесообразно в базис СЕ включить не только денежную единицу, но и «человека», что позволит верифицировать финансово-экономические математические модели. Далее, не зависимо от областимоделирования, величины будем называть физическими, а их размерность – физической размерностью.

В общем случае применение СЕ накладывает на математические выражения ограничения, проверка соблюдения которых позволит верифицировать модель:

- 1) складывать, вычитать, присваивать и сравнивать можно только величины одинаковой размерности;
- 2) перемножать и делить можно величины любой размерности;
- 3) при возведении физической величины в некоторую степень результирующая размерность получается умножением исходной на показатель степени;
- 4) размерность производной равна отношению размерностей дифференцируемой величины и величины, по которой производится дифференцирование;

5) размерность интеграла равна произведению размерностей подынтегральной функции и на размерность дифференциала;

6) если неизвестная размерность выражается функциональной зависимостью, то эта размерность должна определяться размерностями известных величин и операциями, определяющими аналитическую зависимость;

7) аргумент трансцендентной функции должен быть безразмерным;

8) все математические выражения, описывающие одну модель, должны использовать либо стандартную, либо определенную пользователем систему единиц.

Анализ показывает, что все физические размерности вместе с операцией сложения образуют коммутативную аддитивную группу [2]. Элементы множества носителя алгебраической структуры принадлежат декартовому произведению, образованному множествами значений показателей степени основных единиц. Таким образом, размерность представляет собой упорядоченное множество рациональных чисел, каждое из которых соответствует значению показателя степени одной из базовых величин. А само множество имеет бесконечное количество элементов. Расположение элементов в «механическом» базисе-подмножестве СИ показано на рис. 1

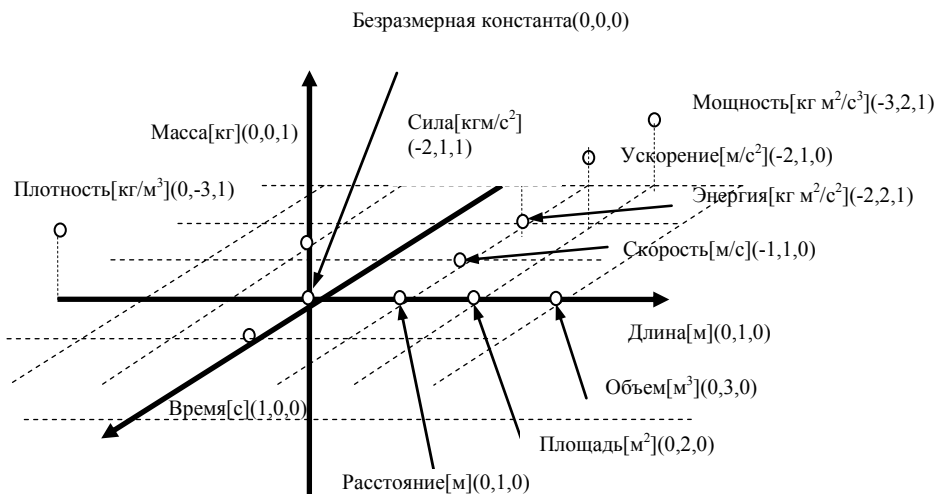


Рис. 1. Структура пространства физических размерностей

Пространство физических размерностей имеет евклидову метрику и является обычным векторным пространством [3]. Использование свойств алгебраической структуры, построенной на множестве физических размерностей, операции сложения и умножения на скаляр, легло в основу разработанных методов, а на их основе информационной технологии верификации математических моделей (ММ) сложных систем.

Математическая модель рассматривается как черный ящик, на вход которого поступает вектор параметров, а выход представляет множество результатов. Знание размерностей параметров и результатов позволяет с использованием П-теоремы и ограничений (1–8) не только решить вопрос о корректности численной модели, но и сгенерировать, пользуясь математическим аппаратом АФР, аналитическую модель. Функциональная декомпозиция ИТ показана на рис. 2.

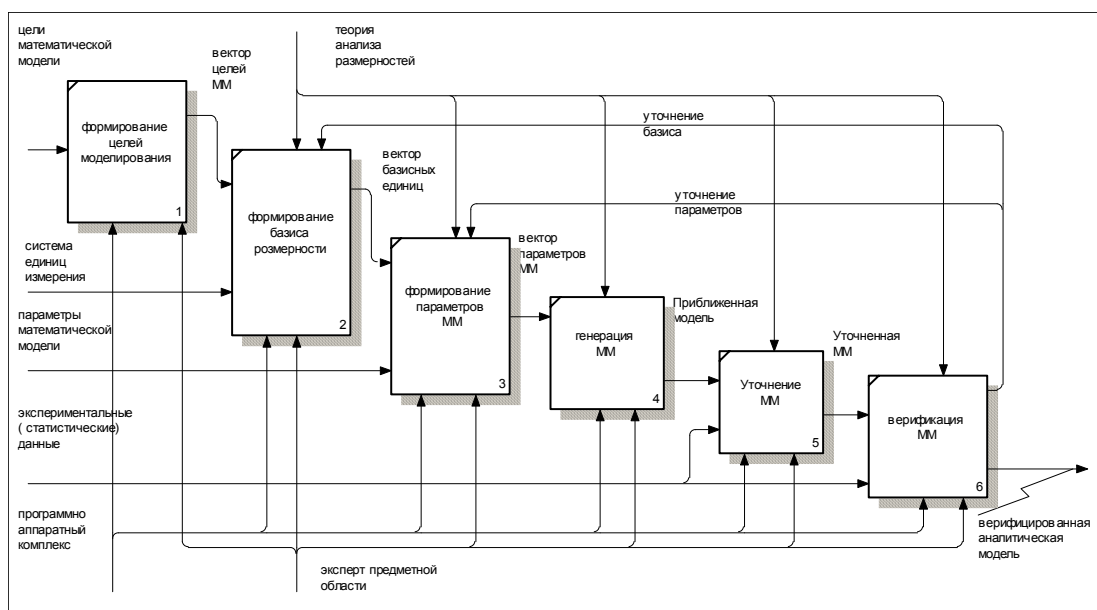


Рис. 2. Функциональная декомпозиция информационной технологии

На первом этапе формируются цели моделирования, множества параметров и результатов. Выбирается наиболее подходящая или создается своя собственная система единиц. Это позволяет сформировать базис размерностей. Далее на основе АФР и базиса размерностей верифицируется вектор параметров модели. Это позволяет применить П-теорему [1] и сгенерировать первое приближение АМ, т. е. сформировать аналитические выражения, описывающие зависимости каждого из результатов АМ от подмножеств входных параметров. Уточнение множества константных множителей АМ осуществляется с использованием экспериментальных (статистических) данных. На данном этапе может потребоваться уточнение подмножества параметров или смена базиса размерностей, т. е. переход на иную систему единиц. На выходе формируется верифицированное множество аналитических зависимостей, пригодных для дальнейшего использования в диверсифицированной технологии моделирования.

Диверсификация моделирования, основанная на совместном использовании численных моделей, представляющих систему алгебро-дифференциальных уравнений и автоматически генерируемых аналитических моделей, позволила сократить сроки разработки адекватных математических моделей, сложных систем, повысила достоверность прогнозного состояния сложной системы и снизила риски принятия некорректных решений в критически важных областях. Это позволило не только поднять уровень функциональной безопасности информационно-управляющих систем, но и избежать развития неблагоприятных сценариев и полностью исключить катастрофические последствия в таких отраслях как энергетика, экология и транспорт.

#### Литература

1. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А. Сена. – М. : Наука, 1988. – 309 с.
2. Калужнин, Л. А. Введение в общую алгебру / Л. А. Калужнин. – М. : Наука, 1973. – 448 с.
3. Канторович, Л. В. Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – М. : Наука, 1977. – 744 с.