

С.А. Скиба

## Модификация языка потоковых диаграмм, для более полного представления информации о моделях системной динамики

Методы системной динамики относятся к методам имитационного моделирования непрерывного типа и являются хорошим инструментом для исследования сложных систем различного типа. Они успешно применяются в решении задач из сферы экономики [1], социологии [2], менеджмента [3, 4], экологии [5], в других областях науки. Кроме того, системная динамика является средством, позволяющим синтезировать знания из различных областей науки, без чего невозможно исследование сложных систем глобального масштаба [5].

Вместе с тем, существует ряд проблем, делающих недоступными методы системной динамики для широкого круга исследователей. Одним из аспектов, затрудняющих использование системной динамики, является несовершенство средств компьютерного представления модели. А поскольку этот этап является неотъемлемой частью имитационного моделирования, трудности, возникшие на нем, могут стать препятствием для осуществления исследования в целом.

Рассмотрим суть проблемы подробнее. Математической основой моделей системной динамики являются разностные дифференциальные уравнения. Строя модель сложной системы, исследователь первоначально использует язык потоковых диаграмм для формализации знаний о структуре сложной системы. Язык потоковых диаграмм – средство графического представления структуры сложной системы. На базе этого представления строится дифференциальная модель системы, которая затем получает компьютерное представление. Первые средства, разработанные для реализации моделей системной динамики, представляли специальные языки программирования, с помощью которых программировались дифференциальные модели [6]. Это порождало две трудности: необходимость для исследователя обладать знаниями этого языка и навыками программирования; необходимость работать с двумя представлениями модели: графическим (в виде потоковых диаграмм) и математическим (текст программы). В современных системах моделирования [5] эта проблема частично решена за счет того, что основой компьютерного представления модели стали потоковые диаграммы. Вместе с тем, потоковые диаграммы, изначально разработанные для других целей, не содержат полной информации о модели. Для описания конкретных зависимостей приходится использовать встроенные языки программирования.

В данной работе предлагается модификация языка потоковых диаграмм, позволяющая графически представлять полную информацию о дифференциальной модели, описывающей сложную систему.

Основными элементами потоковых диаграмм являются уровни (переменные модели) и темпы (активности, характеризующие изменения уровней). Соединенные дугами потоков, эти элементы составляют потоковую сеть модели. Модель сложной системы обычно содержит несколько потоковых сетей, каждая из которых описывает движение некоторых однородных материальных ингредиентов. Например, в модели производственно-сбытового предприятия [7] можно выделить пять основных потоковых сетей: сеть движения денежных средств; сеть заказов; сеть движения материалов; сеть оборудования; сеть


сотрудников предприятия. Каждому уровню соответствует разностное уравнение, определяемое входным и выходным потоками. От чего зависит уравнение каждого конкретного темпа, определяется информационной сетью модели. Таким образом, информационная сеть является соединительной тканью между сетями потоков. Вместе с тем, информационная сеть модели не дает информации о характере зависимостей (их описывают отдельно специальными уравнениями).

Использование языка потоковых диаграмм в качестве формы машинного представления модели позволяет не описывать уравнения уровней, поскольку информация о них полностью содержится в потоковой диаграмме. Вместе с тем, информация об уравнениях темпов неполная и поэтому требует дополнительного описания.

Введение дополнительных элементов в информационную сеть может позволить описывать эти зависимости в наглядной графической форме. Но для этого необходимо пересмотреть некоторые понятия, принятые в системной динамике. Основными элементами информационной сети являются информационные дуги. Они описывают, от каких факторов (уровней, входных данных, констант) зависят темпы. Для большего удобства и структуризации таких зависимостей были введены дополнительные переменные. Их значение определяется так же, как и значения темпов. Единственное принципиальное различие между ними – это то, что дополнительная переменная не может влиять непосредственно на какой-либо уровень. Учитывая эту особенность в

системе моделирования STELLA [8], классический символ темпа  $\Sigma$  был

заменен на символ , который напоминает символ дополнительной пе-

ременной . В данной работе предлагается другой подход, основанный на изменении понятия темпа и дополнительной переменной, а именно, того, каким образом они используются при описании уравнений модели.

Поскольку дополнительные переменные и темпы являются функциональными зависимостями своих аргументов, введем понятие функционала. Функционал полностью заменит дополнительные переменные. Значение темпа в предложенной схеме будет полностью определяться связанным с ним функционалом. Таким образом, вместо трех типов уравнений (уровней, темпов, дополнительных переменных) при использовании такой схемы имеют место два типа уравнений (уровней и функционалов). Уравнения уровней, как уже говорилось, полностью описываются потоковой сетью модели. Для того чтобы это относилось и к функционалам, необходимо расширить и уточнить само понятие функционала.

*Функционал* является расширением понятия дополнительной переменной. Функционал (как и дополнительная переменная) служит для структуризации информационных зависимостей в модели. Но в отличие от дополнительной переменной, значение которой определяется с помощью отдельно записываемых уравнений, функционал полностью определяет и характер зависимости от входных параметров. Функционал имеет один выход.

Будем различать три группы функционалов.

1. Функционалы с одним входом.
2. Функционалы с произвольным числом входов и порядком их следования.
3. Функционалы с определенным числом входов и порядком их следования.

В *первую группу* входят математические функции одного аргумента, такие логические функции, как сравнение с нулем и инверсия, функция изменения знака, функция вычисления модуля и другие. Примеры таких функционалов приведены на рисунке 1.

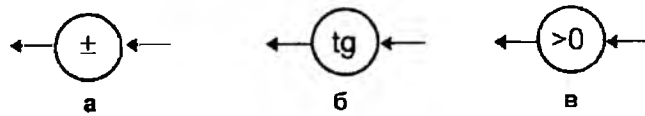


Рис. 1. **Функционалы первой группы:** а – изменение знака, б – тангенс, в – функция сравнения с нулем (если вход > 0, на выходе 1, иначе 0)

Во *вторую группу* входят функционалы сложения, умножения, логическое И, логическое ИЛИ, поиски минимального, максимального значения, математическое ожидание, дисперсия. Примеры функционалов второй группы представлены на рисунке 2.

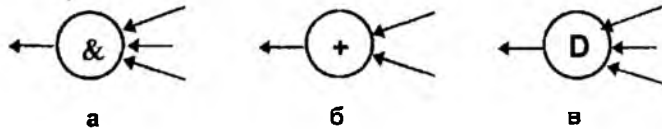


Рис. 2. **Функционалы второй группы:** а – логическое И, б – сумма, в – дисперсия

Первые две группы представляют собой простейшие функционалы, которые, вместе с тем, дают возможность описывать зависимости высокой степени сложности. Рассмотрим пример использования функционалов первой и второй группы.

*Пример.* Значение темпа модели  $T$  зависит от трех факторов ( $x, y, z$ ), и определяется по формуле:

$$T = \begin{cases} \ln(x^2), & \text{если } 1/x > 0, \\ \sqrt{y^2 - z}, & \text{если } 1/x \leq 0. \end{cases}$$

Фрагмент потоковой диаграммы, который определяет уравнение темпа  $T$  с помощью функционалов первой и второй группы, представлен на рисунке 3.

Как видно из примера, функционалы первых двух групп обладают достаточной гибкостью, позволяют описывать сложные зависимости. Вместе с тем, их использование в ряде случаев делает потоковую диаграмму более громоздкой и сложной для понимания. Уравнения, подобные описанному в примере, встречаются довольно редко. Однако построение с помощью функционалов первой и второй группы даже нескольких сложных уравнений может сделать потоковую диаграмму неудобочитаемой. В подобных случаях удобно использовать функционалы третьей группы.

В состав *третьей группы* входят функционалы, отражающие различные математические, социальные, экономические, физические и др. законы и формулы. Зависимости, описываемые такими функционалами, обычно более сложны. Их использование не загромождает потоковую диаграмму. Вместе с тем, при анализе потоковой диаграммы они дают исследователю информацию о характере зависимостей между факторами в модели.

Исследователю предлагается пользоваться стандартным набором функционалов. Его вполне достаточно, чтобы описывать уравнения различной степени сложности. Однако если исследования не носят разовый характер, должна быть возможность расширения третьей группы функционалов путем добавления новых, специальных наборов.

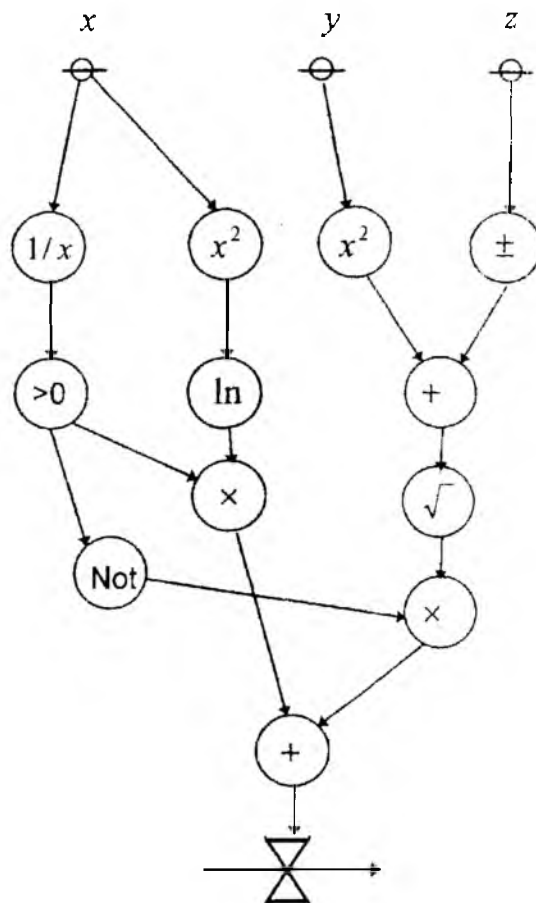


Рис. 3. Представление уравнения темпа с помощью функционалов первой и второй группы

Для моделей многих сложных систем характерно многократное использование некоторых фрагментов потоковых диаграмм. Одним из примеров этого являются различного рода задержки в сетях потоков. Для упрощения процесса моделирования в состав некоторых систем моделирования [9] включают компоненты, реализующие наиболее часто встречающиеся фрагменты модели. Однако такой подход нельзя считать универсальным. Нередко сложная система состоит из похожих подсистем, которые сами по себе являются сложными системами. Например, филиалы в составе фирмы, регионы в составе страны. Предусмотреть такие компоненты на уровне языка моделирования невозможно. Поэтому предлагается дополнить язык потоковых диаграмм понятием *составной компонент*.

*Составной компонент* может представлять собой как небольшой фрагмент потоковой диаграммы, так и подсистему сложной системы. Процесс построения составных компонентов подобен процессу построения модели. Поэтому составной компонент можно рассматривать как модель в модели. Составной компонент может иметь потоковые и информационные входы и выходы. Таким образом, использование составных компонентов позволяет не только многократно использовать повторяющиеся фрагменты модели, но и строить в рамках системной динамики многоуровневые модели.

Работа с *элементами контейнерами* напоминает работу с составными компонентами. Принципиальное отличие заключается в том, что реализуются эти элементы средствами внешнего ПО, не связанного принципами системной динамики. В качестве такого ПО могут выступать, например, интеллектуальные системы, системы моделирования, основанные на других методах фор-

мализации. Использование для реализации контейнера системы моделирования дискретного типа позволяет в рамках модели объединять дискретную и непрерывную части и строить таким образом гибридные, т.е. дискретно-непрерывные модели. Архитектура внешнего ПО должна обладать некоторыми особенностями для возможности включения его в такие модели. Кроме того, необходимо синхронизировать такие элементы с остальной моделью. Для этого нужно учитывать, что управление таким элементом передается на каждом шаге дифференцирования при вычислении уравнений уровней.

Таким образом, представленная в работе модификация языка потоковых диаграмм позволяет графически представлять полную информацию о дифференциальной модели. Кроме того, предложенные элементы расширения языка потоковых диаграмм позволяют в рамках системной динамики строить многоуровневые системы и системы дискретнонепрерывного типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Sterman J.D.** The Economic Long Wave: Theory and Evidence. *System Dynamic Review* 2(2), 1986. P. 87-125.
2. **Forrester J.W.** Nonlinearity in High-Order Models of Social Systems. *European Journal of Operational Research* 30 (2), 1987. P. 104-109.
3. **Morecroft J. D. W., Lane D.C., Vilita P.S.** Modelling Growth Strategy in a Biotechnology Startup Firm. *System Dynamics Review* 7 (2), 1991. P. 93-116.
4. **Форрестер Дж.** Динамика развития города. М.: Прогресс, 1974. - 287 с.
5. **Форрестер Дж.** Мировая динамика. М.: Наука, 1978. - 168 с.
6. **Richardson G. P., Pugh A. L.** Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO. Cambridge MA: Productivity Press, III. 1981.
7. **Форрестер Дж.** Основы кибернетики предприятия. М.: Прогресс, 1971. -340 с.
8. **Senge Peter M.** The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. New York: Doubleday Currency, 1990.
9. **Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др.** Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова. М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. - 520 с.

## S U M M A R Y

*It is proposed a language of simulation modeling oriented to the model of continuous type, in the article. This language is developed in the frame of system dynamics. The language of flow-stock diagrams is used as the base of its, that itself is not a language of modeling, but is used for formalization the data about continuous type complex systems, while creating the models of system dynamic. In graphic form, the language of flow-stock diagrams allows to represent the bulk part of information about the model of complex system. However, it is necessary for the using the language as a language of modeling, that it could represent the complete data about the model. According to this purpose, it is proposed in the article to modify and widen the language of the flow-stock diagrams. There are next concepts in the article: functional, container, compound element. The concept of temp, that is accepted for classical flow-stock diagrams is modified. There are some distinctions of the proposed language of modeling: to represent in the graphic form the complete data about the object of modeling, to create the multilevel models and make use of element of non-flow-stocks structure.*