

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ К АНАЛИЗУ ОБЪЕКТОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

В. Х. Каримова, Н. С. Нигматова, Х. И. Авезова

Узбекистан, Ташкент

Для анализа сложных систем с нелинейными обратными связями используется принцип системной динамики. Системная динамика, как метод имитационного моделирования, включает в себя структуризацию объекта; построение системной диаграммы объекта, где указываются связи между элементами; определение переменных для каждого элемента и темпов их роста; принятие гипотез о зависимости каждого темпа роста от переменных и формальное описание этих гипотез; процесс оценки введенных параметров с помощью имеющейся статистики. Для построения и исследования моделей с помощью метода системной динамики разработан специальный язык программирования DYNAMO.

Модель Форрестера включает следующие элементы:

- уровни (ресурсы);
- потоки, перемещающие содержимое одного уровня к другому;
- функции решений, которые регулируют темпы потока между уровнями;
- каналы информации, соединяющие функции решений с уровнями.

Уровни характеризуют возникающие накопления внутри системы. Это могут быть заготовки, комплектующие и готовая продукция, страховые межоперационные запасы, производственные площади, численность работающих, финансовые ресурсы и т. п. Каждый уровень описывается его переменной величиной, зависящей от разности входящих и исходящих потоков. Темпы определяют существующие мгновенные потоки между уровнями в системе и отражают работу, в то время как уровни измеряют состояние, которого система достигает в результате выполнения некоторой работы.

Функции решений (или уравнения темпов) представляют собой формулировку правила поведения, определяющую, каким образом имеющаяся информация об уровнях приводит к выбору решений, связанных с величинами текущих темпов.

Базовая структура модели Форрестера, представленная на рисунке 1, показывает только одну сеть с элементарной схемой информационных связей между уровнями и темпами. Чтобы отразить деятельность всего промышленного предприятия, необходимы несколько взаимосвязанных сетей. Выделяют шесть типов сетей, представляющих существенно различные типы переменных: заказы, материалы, денежные средства, рабочую силу и оборудование, соединенных воедино с помощью сети информации. Любая из этих сетей может быть разбита еще на несколько отдельных частей.

Информационная сеть служит для остальных сетей соединительной тканью. Она переносит информацию от уровня к точкам решений, а также информацию о темпах в двух сетях к уровням в сети информации. В самой сети информации тоже существуют уровни и темпы. Например, информация о фактическом текущем темпе в потоке материалов усредняется для определения уровня среднего темпа потока материалов. Этот уровень относится к сети информации.

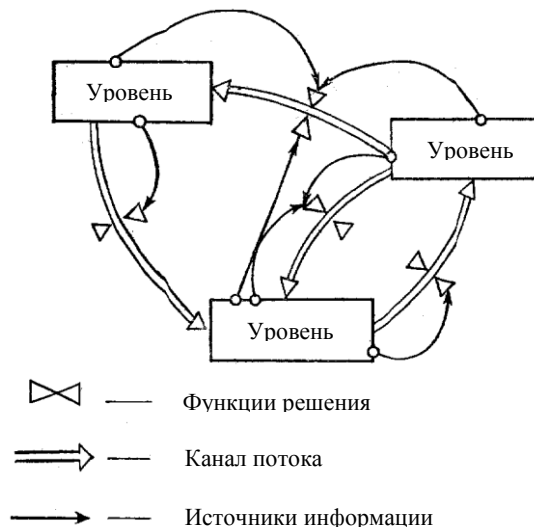


Рис.1. Базовая структура модели Форрестера

Базовая структура модели дополняется системой уравнений, которые связывают характеристики уровней этой структуры. В основном эта система состоит из уравнений двух типов: уравнения уровней и уравнения темпов.

При построении уравнений временная ось разбивается на интервалы времени  $\Delta\tau_{ij}$  между  $i$ -м и  $j$ -м моментами времени.

Новые значения уровней рассчитываются на конец интервала, и по ним определяются новые темпы (решения) для следующего интервала  $\Delta\tau_{ij+1}$ .

Уравнения уровня имеют вид:

$$Q_{ij} = Q_{ik} + \Delta\tau_{kj} \left( \sum_{x'} q_{x_1,i}^{k,j} - \sum_{x''} q_{x_2,i}^{k,j} \right), \quad (1)$$

где  $x_1 \in x', x_2 \in x'', x' \cup x'' = x$ ;  $x$  - множество уровней, связанных с  $i$ -м уровнем;

$Q_{ij}$  - значение  $i$ -го уровня в  $j$ -й момент времени;

$\Delta\tau_{kj}$  — величина интервала от момента времени  $k$  до момента времени  $j$ ;  $q_{x_1,i}^{k,j}$  - темпы потоков, входящих в  $i$ -й уровень в интервале между моментами  $k$  и  $j$ ;

$q_{x_2,i}^{k,j}$  — темпы потоков, выходящих из  $i$ -го уровня в интервале между моментами времени  $k$  и  $j$ .

Пример уравнения темпа:

$$q_j^{k,j} = S_k / \Delta t,$$

где  $S_k$  - величина уровня, отражающего запаздывание в момент времени  $k$ ;

$\Delta t$  - константа (среднее время), необходимое для преодоления запаздывания.

Этапы построения модели Форрестера:

1. Построение базовой структуры модели в виде специализированного графа;
2. Параметризация графа и построение соответствующей системы уравнений;
3. Описание полученной модели на языке DYNAMO и проведение экспериментов.

К числу достоинств модели относятся: возможность отражать практически любую причинно-следственную связь; простая математическая форма; использование терминологии, синонимичной языку экономики и производства. Для основных фазовых переменных (так называемых системных уровней) используются дифференциальные уравнения одного вида:

$$\frac{dy}{dt} = y^+ - y^-, \quad (2)$$

где  $y^+$  – положительный темп скорости переменной  $y$ , включающий в себя все факторы, вызывающие рост переменной  $y$ ;

$y^-$  – отрицательный темп скорости, включающий в себя все факторы, вызывающие убывание переменной  $y$ .

Предполагается, что эти темпы выражаются через произведение функций, зависящих только от так называемых "факторов" — вспомогательных переменных, являющихся комбинациями основных переменных:

$$y^\pm = g(y_1, y_2, \dots, y_n) = f(F_1, F_2, \dots, F_k) = f_1(F_1)f_2(F_2)\dots f_k(F_k), \quad (3)$$

где

$F_j = g_j(y_{i_1}, \dots, y_{i_m})$  — факторы, причем  $m = m(j) < n$ ,  $k < n$ ,  $n$  — число уровней, т.е. факторов меньше, чем переменных, что позволяет упростить задачу и рассматривать только функции одного переменного.

Модель применяется для прогнозирования экологии, демографии, финансового анализа, экономики и социологии.

Программные средства, реализующие модель Форрестера: AnyLogic, VenSim, PowerSim, Stella, ModelMaker и др. Для построения моделей в них используются графическое представление зависимостей переменных в виде так называемых «stock and flow diagrams».

Обратимся, к модели Месаровича-Пестеля, позволяющей проводить анализ и расчет сложных систем на основе теории многоуровневых иерархических систем. В основе модели лежит идея "органического дифференцированного роста". Основные принципы её построения:

- Модель, отражающая сложные процессы взаимодействия человека с окружающей средой, должна основываться на теории многоуровневых иерархических систем.

- Модель должна быть управляемой, т.е. включать в себя процесс принятия решений, что позволяет учесть возможность сознательного воздействия человека на развитие мировой системы.

- Мир следует рассматривать не как единое однородное целое, а как систему взаимодействующих регионов, различающихся уровнем развития, населенностью и т.п.

### Литература:

1. Дж. Форрестер «Теория игр. Экономическое поведение», М. : 1982.