

**МОДЕЛИ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОЙ  
ЭКОНОМИКИ****В. М. Чадеев, Н. И. Аристова (Москва)****Введение**

Мировая экономика виртуальна. Она только косвенно, через акции, связана с производством. Основным критерий, по которому она работает, – максимизация прибыли, а основным инструментом – спекуляции с ценными бумагами. Эти спекуляции, конечно, влияют на прибыль предприятий, но критерии работы предприятий, выпускающих реальную продукцию, другие. Основная цель их работы – выпуск продукции, удовлетворяющей определенным требованиям, с наименьшими затратами труда. Критерии спекулятивной и реальной экономики могут противоречить друг другу.

Качество модели во многом определяет и результаты моделирования. Небольшие, казалось бы, детали или малые параметры, отбрасываемые для упрощения модели, могут привести к совершенно неудовлетворительным результатам, никак не связанным с действительностью. Это относится, например, к уровню брака. На некоторых хорошо организованных производствах уровень брака на технологических операциях не превышает нескольких процентов, и тем не менее игнорирование этих потерь может привести к занижению трудозатрат в тысячи раз.

В работе рассматриваются модели, в которых производство представляется как набор технологических операций, включая транспортные.

В реальной экономике цель автоматизации производстве заключается в повышении производительности труда, т. е. уменьшении участия человека в технологическом процессе и соответственно снижении себестоимости изделия. При этом цена изделия на будущем рынке при оптимизации производства для изготовления конкретного изделия не играет роли.

**Основные предположения**

Представим себе процесс изготовления продукции в виде последовательности технологических операций. Поскольку основным инструментом повышения производительности труда является автоматизация, будем рассматривать только автоматизированное производство. Автоматизация, как правило, не полная: на практике всегда остаются технологические операции, которые может выполнить только человек. Одни технологические операции может выполнять только человек, другие только автомат, а некоторые операции могут выполнять и люди, и автоматы. Перераспределяя работу между ними можно минимизировать затраты человека на выпуск единицы продукции. При этом, естественно, необходимо учитывать и затраты времени людей на изготовление автоматов. Ведь для их изготовления использовались какие-то технологические операции.

Все окружающее нас многомиллионное разнообразие искусственно созданных объектов, от предметов потребления до автострад и космических кораблей, сделано с помощью технологических операций. Видов технологических операций сравнительно немного, около тысячи, и в то же время, этого набора достаточно, чтобы изготовить и стандартный автомобиль, и неповторимое произведение искусства.

Под технологической операцией будем понимать общепринятое ее значение, имея в виду такие операции, как токарная обработка, фрезерование, сверление, сборка, ориентирование детали и т.п., однако в дальнейшем нам потребуется некоторое формализованное описание любой технологической операции, удобное для целей моделирования.

Будем характеризовать технологическую операцию двумя параметрами: временем выполнения  $a$  и вероятностью ее правильного выполнения  $q$ . Как время выполнения операции, так и вероятность ее правильного выполнения зависят от многих причин, в частности, от квалификации рабочего, от станка, на котором она выполняется, от качества заготовки. Часто одна и та же технологическая операция может быть выполнена вручную рабочим или автоматически, без участия человека.

Затраты на изготовление изделия складываются из затрат на отдельные технологические операции. Можно написать для затрат времени рабочего на изготовления изделия

$$A = \sum_i^m a_i n_i, \quad (1)$$

где  $a_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида человеком,  $n_i$  – общее количество технологических операций  $i$ -го вида, необходимое для изготовления всего изделия,  $m$  – общее количество видов технологических операций.

При этом нужно иметь в виду, и это принципиально важно, что изготовленное изделие будет годным только с вероятностью

$$P = \prod_i^m q_i^{n_i}, \quad (2),$$

где  $q_i$  – вероятность правильного выполнения технологической операции  $i$ -го вида человеком.

Формула (1) определяет общие затраты человека на изготовление изделия (известно годного или нет), а средние затраты на изготовление годного изделия будут больше

$$A^* = A / P. \quad (3)$$

Формула (3) определяет средние затраты на изготовление годного изделия при ручном изготовлении. Заметим, что вероятности в (2) перемножаются, а это значит, что изготовить годное изделие из большого числа деталей практически невозможно. Если вероятность брака на одной операции 0,99, то вероятность без ошибок выполнить 1000 операций равна 0,000043. С этим борются с помощью контроля. Об этом позже.

Если некоторые технологические операции выполняются не человеком, а автоматом, то схема вычисления затрат изменится. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

### Автоматизация

Если некоторые технологические операции выполняются автоматом, то время, затраченное на изготовление изделия, будет равно

$$C = \sum_i^m (1 - \beta_i) a_i n_i + \sum_i^m \beta_i b_i n_i, \quad (4)$$

где  $b_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида автоматом,  $\beta_i$  – уровень автоматизации технологических операций  $i$ -го вида, необходимых для изготовления всего изделия. Уровень автоматизации должен удовлетворять условиям

$$0 \leq \beta_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

Если все технологические операции операции  $i$ -го вида выполняются автоматом, то уровень автоматизации  $\beta_i$  равен 1, если человеком, то 0.

Изготовленное изделие будет годным с вероятностью

$$P = \prod_i^m q_i^{(1-\beta_i)n_i} p_i^{\beta_i n_i}, \quad (6)$$

где  $p_i$  – вероятность правильного выполнения технологической операции  $i$ -го вида автоматом.

Формула (4) задает время изготовления изделия. Первая сумма – затраты времени человека, вторая – автомата. Любой автомат имеет ограниченное время жизни. Поэтому, чтобы автомат смог выполнить все технологические операции во второй сумме, в (4) должно соблюдаться условие физической возможности

$$TP > \sum_i^m \beta_i b_i n_i, \quad (7)$$

которое означает, что за время своей жизни автомат изготовит одно годное изделие.

### Самовоспроизведение

Рассмотрим задачу частичного самовоспроизведения промышленных роботов. Если роботы будут тратить часть своего ресурса на изготовление таких же роботов, то уменьшится часть ресурса, доступная пользователям роботов (рабочее время роботов). При учете этих дополнительных трат стоимость единицы рабочего времени робота будет равна

$$\lambda(\beta) = \frac{\sum_i^m (1-\beta_i) a_i n_i}{TP - \sum_i^m \beta_i b_i n_i}, \quad (8)$$

при условии физической возможности (7).

Некоторые свойства функции (8) удалось определить аналитически. Например, доказано, что при фиксированном времени выполнения операций оптимальное (в данном случае минимальное) значение  $\lambda(\beta)$  достигается, когда компоненты вектора  $\beta$  суть только нули и единицы. То есть все технологические операции одного вида должны выполнять или только люди, или только роботы.

### Имитационное моделирование

Попытки моделировать экономические процессы предпринимались уже давно. Одним из первых это сделал наш лауреат Нобелевской премии Л. В. Канторович [1, 2]. В его работах была предпринята попытка оптимизировать экономику путем перераспределения ресурсов между тяжелой и легкой промышленностью. В то время это был прорыв в науке. Сегодня уже понятно, что оптимизация реальной экономики возможно только на уровне технологических операций, а не изделий. Дело в том, что количество наименований изделий, изготавливаемых мировой промышленностью, составляет миллионы, а под технологические операции Международная федерация робототехники отвела всего 1000 позиций. То есть необходимо автоматизировать выполнение всего 1000 видов технологических операций, а не изготавливать разные автоматы для изготовления разных изделий. Это означает, что если создан автомат, выполняющий какую-либо технологическую операцию, например завинчивающий гайки, который повышает производительность труда, то его выгодно применять и в легкой, и в тяжелой промышленности – везде, где необходимо выполнить эту технологическую операцию.

**Выводы**

Модели для имитационного моделирования реальной экономики существенно отличаются от моделей виртуальной (спекулятивной экономики). Это следует учитывать при проведении имитационного моделирования.

**Литература**

1. **Канторович Л. В.** Математические методы организации и планирования производства. Л., изд-во ЛГУ, 1939.
2. **Канторович Л. В.** Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М.: изд-во АН СССР, 1959.
3. **Чадеев В. М.** Стратегия автоматизации//Автоматизация в промышленности. 2003. № 2–4.