

СТРАТЕГИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ

В.М. Чадаев
(ИПУ РАН)

При автоматизации мелких предприятий не возникает проблемы с вычислением экономического эффекта. Достаточно знать стоимость и ресурс автомата, а также суммарную стоимость эффекта от его применения. Сравнивая эти две стоимости, принимают решение о целесообразности процесса автоматизации.

На крупных предприятиях, производящих роботов и прочие средства автоматизации, эта задача решается сложнее. Возникает вопрос, применять ли изготавливаемые на предприятии средства автоматизации для автоматизации своего собственного производства?

Вниманию читателей предлагается серия статей, в которых исследуется стратегия автоматизации крупных промышленных предприятий преимущественно не сырьевых отраслей.

В первой части излагаются основные идеи, позволяющие оптимизировать процесс автоматизации за счет рационального распределения работ между людьми и автоматами по критерию минимизации затрат труда. Показано, что это можно сделать только на уровне технологических операций (а не изделий).

Проблема автоматизации в промышленности

Автоматизация – основной инструмент снижения стоимости и повышения качества продукции. Ее уровень непрерывно повышается с момента возникновения промышленности. Начиная примерно с середины прошлого века, она начала принимать массовый характер. Этот момент привел к качественно новым эффектам. Структура промышленности показана на рис. 1. В группе А изготавливаются средства производства, условно говоря "станки", которые поступают в группу Б, где на них изготавливаются предметы потребления. Естественно, что некоторые типы станков используются в обеих группах (этим станкам соответствует стрелка обратной связи в группе А).

Перед обществом встала проблема, где в первую очередь проводить автоматизацию в группе А или в группе Б. Вначале эта проблема формулировалась расплывчато как распределение ресурсов между группами А и Б.

Попытка строгого экономического анализа и оптимизации этой схемы (с группами А и Б) на уровне изделий сделана уже в работах Канторовича – нашего соотечественника, лауреата Нобелевской премии. Оказалось, что задача очень сложна из-за громадной размерности и множества перекрестных связей. Больше того, как будет ясно из дальнейшего, на уровне изделий она вообще не может быть решена.

Развитие производства средств автоматизации шло по пути все большей универсализации автоматов с тем, чтобы один и тот же автомат мог быть использован для автоматизации различных производств. Ниже проблему автоматизации рассмотрим на примере роботов, хотя приводимые формулы будут верны для любых автоматов.



Рис. 1. Структура промышленности

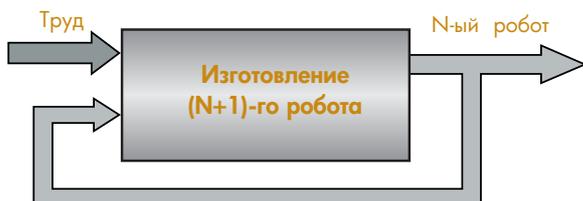


Рис. 2. Схема производства роботов

Важным шагом в направлении промышленной автоматизации было появление на рынке во второй половине прошлого века промышленных роботов – автоматических манипуляторов, управляемых вычислительной машиной, еще в начале прошлого века предсказанных фантастами. Сейчас во всем мире их выпущено более миллиона, и они заняли прочное место в некоторых отраслях машиностроения, например, в автомобилестроении.

Для фирм, производящих роботов, выбор приоритетов автоматизации стал не абстрактной общечеловеческой проблемой, а реальной задачей, от правильного решения которой напрямую зависит прибыль фирмы. Анализ схемы самовоспроизведения роботов, естественно, проще анализа схемы самовоспроизведения промышленности.

Схема производства роботов показана на рис. 2. Завод изготавливает роботов и поставляет их потребителям. Часть изготовленных роботов используется на самом заводе для автоматизации некоторых технологических операций по изготовлению самих роботов. На рис. 2 эти поставки роботов показаны стрелкой обратной связи.

Стоимость робота

Каким образом можно учесть экономический эффект обратной связи, а по сути эффект самовоспроизведения, поскольку роботы будут участвовать в изготовлении таких же роботов. Покажем, как это можно сделать. Везде ниже под стоимостью будем понимать затраты времени человека, включая овеществленные в комплектующих, и будем пользоваться терминами "стоимость" и "затраты времени человека" как синонимами.

Оказалось, что на уровне изделий, как это сделано у Канторовича, эту задачу решить принципиально нельзя. Необходимо спуститься на более низкий уровень – уровень технологических операций. Видов технологических операций сравнительно немного – несколько сот (сварка, сборка, пайка и т.п.), но с помощью их создано все многомиллионное разнообразие искусственного мира – от космических кораблей до произведений искусства.

Пусть для изготовления робота необходимо выполнить m разных видов технологических операций. Количество одинаковых операций j -го вида, которое необходимо выполнить для изготовления одного робота, обозначим через n_j . Время, затрачи-

ваемое человеком на выполнение операции j -го вида, обозначим через a_j , а время, затрачиваемое роботом на выполнение такой же операции, обозначим через b_j . Заметим, что некоторые b_j могут быть равны бесконечности, если робот эту операцию вообще не может делать. В этих обозначениях стоимость робота при ручном изготовлении будет равна

$$A = \sum_{j=1}^m a_j n_j \quad (1)$$

Предположим теперь, что для изготовления робота используется такой же робот. Обозначим через α_j степень автоматизации операции j -го вида

$$0 \leq \alpha_j \leq 1 \quad (j = 1, \dots, m).$$

Степень автоматизации определяет, какая часть одинаковых технологических операций данного вида выполняется роботом. При полной автоматизации, когда все n_j операций j -го вида выполняет робот, $\alpha_j = 1$; если все операции выполняет рабочий – $\alpha_j = 0$.

При частичной автоматизации прямые затраты труда рабочего на изготовление робота можно записать в таком виде

$$A_N(\alpha) = \sum_{j=1}^m (1 - \alpha_j) a_j n_j \quad (2)$$

Соответственно, затраты времени $(N-1)$ -го робота на изготовление N -го будут равны

$$B(\alpha) = \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j.$$

Решая соответствующее разностное уравнение, связывающее стоимости N -го и $(N-1)$ -го робота, для установившегося значения стоимости получим¹

$$\Phi = \sum_{j=1}^m (1 - \alpha_j) a_j n_j \quad (3)$$

при соблюдении условия физической возможности

$$T > \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j, \quad (4)$$

где T – ресурс робота.

Подчеркнем большое значение условия физической возможности. Формально, увеличивая степень автоматизации всех технологических операций до единицы, можно получить нулевую стоимость робота, задаваемую формулой (3). Однако, это в общем случае может быть невозможно, если нарушится условие физической возможности (4).

Доказано, что минимальная стоимость робота Φ достигается, когда компоненты вектора автоматизации $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_m)$ суть только нули и единицы.

Стоимость рабочего времени робота

Изготовление робота не самоцель. Роботы предназначаются для автоматизации ТП по производству самой разнообразной продукции, включающей на заключительном этапе и предметы потребления. Поэтому, если не удастся с помощью автоматизации уменьшить стоимость робота до нуля (а такой

¹ Основы управления технологическими процессами./Под ред. Н.С. Райбмана. М.: Наука, 1978.

результат вряд ли может быть получен в ближайшем будущем), то минимизация стоимости робота не соответствует более общему критерию минимума затрат на производство конечной продукции.

Поскольку на самовоспроизведение робота (точнее, вся система роботов) тратит часть своего же ресурса, то его возможности по автоматизации производства другой продукции будут определяться только остатком ресурса.

Назовем часть ресурса робота, оставшуюся после затрат на самовоспроизведение, *рабочим* (или *свободным*) временем робота.

С точки зрения потребителей роботов более важной их характеристикой является стоимость единицы рабочего времени робота. Определение необходимой степени автоматизации отдельных видов технологических операций по производству роботов должно проводиться по критерию минимума стоимости единицы рабочего времени робота.

$$\lambda = \Phi/\tau, \quad (5)$$

где Φ – стоимость робота, которая вычисляется по формуле (3), а τ – рабочее время робота, вычисляемое по формуле

$$\tau = T - \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j. \quad (6)$$

Условие $\tau > 0$ выделяет класс физически возможных самовоспроизводящихся систем.

Подставляя в (6) значение Φ из (3) и значение τ из (6) получим выражение для стоимости единицы рабочего времени робота

$$\lambda(\alpha) = \frac{\sum_{j=1}^m (1 - \alpha_j) a_j n_j}{T - \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j}$$

с условием физической возможности

$$T > \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j.$$

Удалось доказать следующее важное правило автоматизации.

Для минимизации стоимости единицы рабочего времени робота следует каждый вид технологической операции или целиком автоматизировать, или целиком поручать выполнять человеку.

Но мы предостерегаем коллег неосмотрительно воспользоваться правилом "о полной автоматизации или полной неавтоматизации" не дочитав всей серии статей. Жизнь многообразна и описанная ситуация еще далека от реальной жизни. Важный элемент – неизбежность ошибок при выполнении технологических операций. Вероятность их обычно мала, но так как операций необходимо выполнить сотни и тысячи, то это резко меняет картину. Эта проблема будет обсуждена в следующей статье.

Чадеев Валентин Маркович – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем управления РАН. Контактный телефон (095)334-87-59. E-mail: Chavata@ipu.rssi.ru