

**СТРАТЕГИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ<sup>1</sup>**

**В.М. Чадаев (ИПУ РАН)**

*Излагаются основные идеи, позволяющие оптимизировать процесс автоматизации за счет рационального распределения работ между людьми и автоматами по критерию минимизации затрат труда, что можно сделать только на уровне технологических операций (а не изделий). Показано, что только иерархия и контроль позволяют эффективно автоматизировать производства, использующие сотни технологических операций.*

**Иерархия**

Изготовить сколько-нибудь сложное изделие, выполняя последовательно только технологические операции, практически невозможно. Это происходит потому, что отдельные технологические операции выполняются правильно только с определенной вероятностью. Эта вероятность лежит в пределах 0,99...0,999 и очень редко бывает выше. Технологические операции, как правило, статистически независимы, поэтому к ним применим закон умножения вероятностей. Это означает, что вероятность изготовить изделие без ошибок равна произведению вероятностей правильно выполнить каждую операцию.

Возникает законный вопрос: почему же работают окружающие нас сложные машины? Например, для изготовления каждого автомобиля нужно выполнить десятки тысяч технологических операций. Даже при фантастической надежности выполнения технологической операции 0,999 вероятность не сделать ни одной ошибки будет только четыре сотых тысячных ( $0,999^{10000}=0,0000452$ ). Дело в том, что никто так – деталь за деталью – автомобиль не собирает. Собирают сначала узлы – карбюратор, фару, лампочки, спидометр, реле и т. д. Затем, и это принципиально важно, узлы контролируют, отбирают годные и, только потом, из отобранных узлов собирают само изделие.

Рассмотрим простой пример. Если автомобиль разбить на 100 узлов по 100 деталей в каждом узле, то вероятность собрать годный узел из 100 деталей будет равна 0,904 ( $0,999^{100}$ ). В среднем для изготовления полного комплекта годных узлов потребуется  $1/0,904=1,1062$  исходных комплекта, то есть всего на 11% боль-

ше. Сборка из 100 годных узлов тоже даст вероятность годности автомобиля 0,904 и, таким образом, средняя стоимость автомобиля возрастет всего на 22%. И это по сравнению с 2500000% при последовательной сборке.

Конечно, существует масса тонкостей. Например, не все ошибки равноценны. От одних ошибок машина перестанет работать, при других станет работать хуже, третьи вообще скажутся только на ее внешнем виде. Существует даже вероятность того, что ошибка улучшит работу машины, изменив, например, сечение жиклера холостого хода для конкретных условий. Контроль тоже никогда не бывает абсолютным. В проверенной партии всегда существует какой-то процент брака. Эти вопросы достаточно хорошо исследованы, и показано, что все это слабо влияет на эффективность иерархической системы изготовления. Отметим, что иерархия одинаково эффективна как при ручном, так и при автоматическом выполнении технологических операций.

При автоматизации производства изделий, изготавливаемых по иерархической схеме, а так изготавливаются все сложные изде-

лия, возникает вопрос, сохраняются ли те правила автоматизации, которые были получены для безиерархических систем. Ответ половинчатый: сохраняются, но определение вида технологической операции должно быть изменено. Одинаковые технологические операции, разделенные контрольными операциями, должны рассматриваться как операции разного вида. Например, если завинчивается десять винтов, затем изделие контролируется, а затем завинчивается еще десять таких же винтов, то нужно считать, что завинчивание до и после контроля – это разные технологические операции. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

На рис.1 показана двухуровневая иерархическая система изготовления изделия.

В соответствии с этой схемой на первом уровне с помощью набора технологических операций изготавливается три узла. Узлы контролируются. Бракованные удаляются, а годные поступают на сборку, где из них собирается готовое изделие. Технологические операции одного и того же вида могут быть использованы для изготовления не только разных узлов, но и на разных уровнях иерархии. Например,

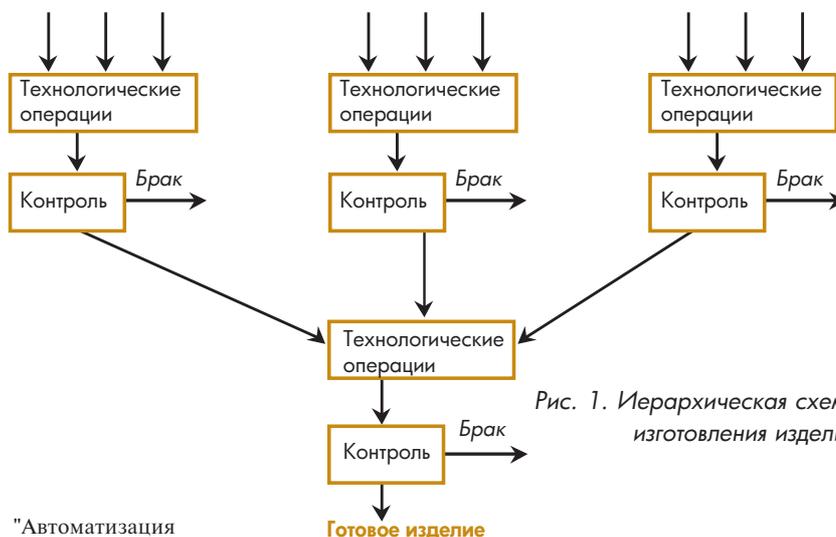


Рис. 1. Иерархическая схема изготовления изделий

<sup>1</sup> Продолжение. Начало см. в журналах "Автоматизация в промышленности" №№ 2, 3. 2003.

*Наука любит точность, но ученый должен уметь фантазировать.  
Можно сухие научные идеи излагать интересно и возбуждающе.*

А.В. Фокин

операция завинчивания винтов может быть использована и при изготовлении узлов, и при соединении узлов в готовое изделие.

При оптимизации распределения работ между роботами и людьми одинаковые технологические операции, используемые для изготовления разных узлов или на разных уровнях иерархии должны определяться, как технологические операции разного вида. Иначе говоря, одинаковые технологические операции, разделенные контрольной операцией должны считаться операциями разного вида. С учетом этой оговорки основное правило автоматизации можно изложить в таком виде.

*Для минимизации стоимости единицы рабочего времени работа следует технологическую операцию каждого вида или полностью автоматизировать, или полностью выполнять вручную. При этом одинаковые технологические операции, разделенные контрольной, должны считаться технологическими операциями разного вида.*

Подробные доказательства представленных утверждений и прочие подробности приведены в литературе [1,2].

#### Робастность иерархии

Оптимальное разбиение изделия на узлы – сложная нелинейная задача [3, 4]. Задача осложняется тем, что на выбор иерархии много ограничений накладывает конструкция изделия. Например, в узлы можно объединять только пространственно близкие детали.

Оказывается, что иерархия наряду с фантастической эффективностью обладает свойством робастности, то есть слабой чувствительностью к параметрам. Характерный пример показан на рис. 2.

При различных вероятностях выполнения операции стоимость изделия меняется на порядок. Оптимальное число деталей в узле лежит в интервале 4...8, и стоимость изделия слабо зависит от числа деталей в узле, если оно лежит в указанном диапазоне.

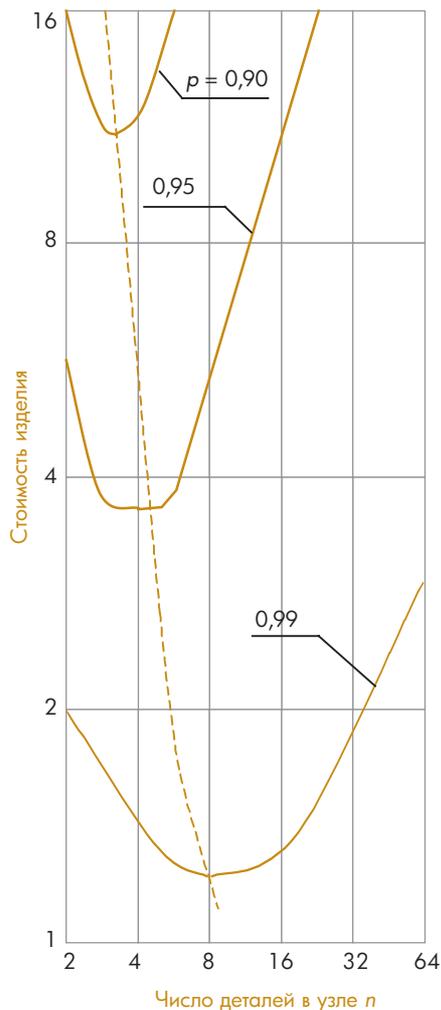


Рис. 2. Зависимость стоимости изделия от числа деталей в узле  $n$  для различных вероятностей правильной сборки  $p$

Когда число деталей в изделии изменяется в фантастически широком диапазоне  $4096 \dots 64 \cdot 10^9$ , оптимальное число деталей для всех случаев не выходит из диапазона 4...16. При этом ошибка в задании оптимального числа деталей в узле (в пределах диапазона 4...16) изменяет стоимость изделия всего в несколько раз, в то время как отсутствие иерархии увеличивает стоимость изделия на десятки порядков.

#### Список литературы

1. Чадеев В.М. Иерархические системы неполного самовоспроизведения роботов с идеальным контролем // Автоматика и телемеханика. №10. 1998.
2. Чадеев В.М. Иерархические системы неполного самовоспроизведения роботов с реальным контролем // Там же. №12. 1998.
3. Чадеев В.М. Иерархические системы самовоспроизведения роботов // Тр. ИПУ РАН. Т. I. М.: ИПУ РАН. 1999.
4. Чадеев В.М. Принципы использования иерархии при автоматизации технологических процессов // Там же. Т.VIII. М.: ИПУ РАН. 2000.

*Чадеев Валентин Маркович – д-р техн. наук, профессор Института проблем управления РАН. E-mail: Chavama@ipu.rssi.ru*

Подчеркнем значение иерархии для автоматизированного производства. Дело в том, что когда человек выполняет какую-либо технологическую операцию, он невольно контролирует результат ее выполнения. Например, наживляя гайку, человек будет делать это до тех пор, пока она не навинтится правильно, повторяя попытки. То есть человек, по сути дела, во многих случаях совмещает технологические и контрольные операции.

Другое дело автомат. Если это не предусмотрено в его конструкции или программе работы, робот не "осознает" результата своей работы, поэтому контрольные операции в автоматизированном производстве должны предусматриваться специально.

Основные выводы, которые следует сделать относительно иерархии, состоят в следующем.

1. Изготовление сколько-нибудь сложных машин, в том числе роботов, без иерархии невозможно из-за экспоненциально быстрого возрастания стоимости годного изделия (или, конкретно, робота).

2. При вероятности брака не выше 1% число деталей в узле следует выбирать в пределах 4...16.

3. Вариации числа деталей в узле в пределах 4...16 слабо влияют на стоимость изделия в широком диапазоне изменения сложности от сотен до миллионов деталей в изделии.

Эти выводы следует учитывать при конструировании роботов и организации их автоматизированного производства.