

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ БРАКА

Н.И. Аристова, В.М. Чадеев (ИПУ РАН)

Разработана методика определения оптимальной схемы автоматизации, обеспечивающей минимальную стоимость производства узла с учетом вероятности брака. Предложенный алгоритм позволяет избежать полного перебора возможных решений поставленной задачи.

Ключевые слова: автоматизация технологических операций, робот, система роботов, матрица автоматизации, вероятность брака, узел.

Введение

Автоматизация сборочного машиностроительного производства — эффективный способ снижения стоимости выпускаемых изделий. При выборе средств и систем автоматизации необходимо рассмотреть и учесть громадное число факторов, среди которых:

- характеристики инфраструктуры (помещение и т. п.);
- ресурсоемкость производства;
- ассортимент средств автоматизации на рынке (их характеристики и функциональность);
- планируемый набор выпускаемых изделий;
- величина партии выпускаемых изделий;
- параметры технологических операций, необходимых для изготовления изделия и т. д.

В предлагаемом подходе экономические факторы производства учитываться не будут.

Стоимость изделия определяется схемой автоматизации процесса его изготовления. Поиск схемы автоматизации, минимизирующей стоимость, — это переборная задача, точное решение которой практически невозможно. В данной методике вычисления стоимости будут сделаны некоторые допущения, занижающие стоимость изделия. Например, будет предполагаться возможность произвольного порядка выполнения технологических операций.

Предлагаемая методика позволяет получить схему автоматизации с минимальной стоимостью изготовления изделия. Соответствующую этой схеме стоимость изделия уменьшить технически невозможно — это нижняя грань возможностей данного набора средств автоматизации.

В [1] получены оценки минимально достижимой стоимости изделия. При этом полагалось, что вся инфраструктура есть и она бесплатна, средства автоматизации на рынке есть и продаются по себестоимости, партия выпускаемых изделий бесконечна, параметры технологических операций, необходимых для изготовления изделия известны, вероятность брака равна нулю.

Но такой детерминированный случай автоматизации на производстве практически не встречается. На реальном производстве всегда существует брак. Обычно это несколько процентов. Однако наличие брака может существенно увеличить стоимость изготовления *годного* изделия. Рассмотрим алгоритм вычисления оптимальной схемы автоматизации для вероятностного случая. Будем рассматривать отлаженный технологический процесс производства, ког-

да систематические ошибки уже устранены и брак определяется только случайными и независимыми причинами.

Проблема вычисления оптимальной схемы автоматизации состоит в том, что при выборе любой конкретной схемы автоматизации значения времени выполнения технологических операций складываются, а вероятности правильного выполнения — перемножаются. Этим определяется сложность и многоуровневость методики определения схемы автоматизации, гарантирующей минимальную стоимость изделия.

Постановка задачи

Известна технологическая информация об изделии, производство которого необходимо автоматизировать. Эта информация включает: m видов технологических операций, которые необходимо выполнить для изготовления изделия; набор из f типов средств автоматизации (роботов); характеристики всех f типов роботов — значения времени выполнения и вероятности правильного выполнения всех видов технологических операций каждым типом роботов. Также для каждого робота известны: его стоимость Z_j , ресурс T_j и стоимость единицы рабочего времени $\lambda_j = Z_j / T_j$.

Необходимо определить минимальную достижимую стоимость изготовления партии изделий данной системой роботов.

Под технологическими операциями понимаются как собственно технологические операции, так и *все* вспомогательные операции — перенос детали, закрепление, включение и др. Человек (рабочий) рассматривается как один из типов роботов ($R0$) со своими характеристиками.

В качестве «изделия» будет рассматриваться узел, для изготовления которого выполняется несколько технологических операций. По завершении процесса изготовления осуществляется контроль. В результате контроля узел может быть забракован. Подчеркнем, что внутри процесса изготовления контрольных операций нет. Приведенные ниже формулы действительны только для объектов типа узел (без контроля внутри процесса изготовления).

Термины «стоимость» и «время выполнения» в данной статье понимаются как синонимы.

Величина изготавливаемой партии изделий в большей степени определяет оптимальную схему автоматизации. Очевидно, что автоматизировать изготовление одного изделия почти всегда бессмысленно, так как

в стоимость изделия войдут и купленные автоматы. Хотя и здесь бывают исключения. Например, если при изготовлении изделия необходимо завернуть 100 винтов, гайковерт может окупиться и при изготовлении одного макета. Основные формулы верны для массового производства. Для меньших партий стоимость возрастет.

Методика определения оптимальной схемы автоматизации

Стоимость изделия, то есть затраты времени на его изготовление системой роботов, вычисляется по формуле:

$$Z = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} b_{ji} \lambda_j n_i, \quad (1)$$

где m — число видов технологических операций необходимое и достаточное для изготовления изделия, f — число типов роботов доступных при автоматизации, включая человека, каждая сумма в (1) соответствует одному типу роботов (первая — человеку); b_{ji} — время выполнения технологической операции i -го вида роботом j -го типа; n_i — число одинаковых технологических операций i -го вида, необходимых для изготовления изделия; α_{ji} — степень автоматизации технологической операции i -го вида роботом j -го типа, λ_j — стоимость единицы рабочего времени робота j -го типа. Переменные i и j изменяются в пределах $j=0, 1, 2, \dots, f$ и $i=1, 2, \dots, m$ для всех формул, представленных в статье. Значок j будет использоваться для обозначения типа робота, а i для обозначения вида операции.

Для переменных в (1) имеются ограничения. Доказано [2], что степень автоматизации любой технологической операции может быть равно только нулю или единице ($0 \leq \alpha_{ji} \leq 1$). Если для изготовления изделия требуется выполнить технологическую операцию определенного вида, то это должен сделать человек или один из типов роботов, то есть $\sum_{i=1}^m \alpha_{ji} = 1$.

Формула (1) определяет сколько каждый из m типов роботов вкладывает времени в выполнение каждого вида технологических операций. Однако для упрощения изложения процедуры оптимизации представим (1) в виде иерархической структуры:

$$Z = \sum_{j=0}^f Z_j, \quad Z_j = \sum_{i=1}^m z_{ji}, \quad z_{ji} = \alpha_{ji} b_{ji} \lambda_j n_i, \quad (2)$$

где Z_j — вклад робота j -го типа в стоимость изделия, z_{ji} — вклад робота j -го типа в стоимость выполнения только операции i -го вида.

Изготовленное за время Z изделие будет годно только с вероятностью P , которую тоже представим в виде иерархической структуры:

$$P = \prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ji}^{\alpha_{ji} n_i}, \quad (3)$$

где p_{ji} — вероятность правильного выполнения технологической операции i -го вида роботом j -го типа.

Для упрощения изложения процедуры оптимизации представим (3) в виде иерархической структуры:

$$P = \prod_{j=0}^f P_j, \quad P_j = \prod_{i=1}^m p_{ji}, \quad p_{ji} = p_{ji}^{\alpha_{ji} n_i}. \quad (4)$$

Входящие в (1) коэффициенты α_{ji} составляют матрицу автоматизации A . Поскольку стоимость изделия $Z(A)$ — линейная функция элементов матрицы A , то минимум по любой переменной α_{ji} лежит на границе ее области определения, то есть матрица A состоит только из нулей и единиц.

Средняя стоимость *годного* изделия будет равна

$$C(A) = Z(A) / P(A), \quad (5)$$

и, как легко заметить, является нелинейной функцией элементов матрицы A . Однако и для этого случая строго доказано [1], что в оптимальной матрице A , минимизирующей стоимость $C(A)$, элементы суть только нули и единицы.

Среднюю стоимость изготовления годного изделия только роботом j -го типа можно вычислить по (9)

$$C_j(A) = Z_j(A) / P_j(A). \quad (6)$$

Для поиска матрицы автоматизации потребуется матрица, элементы c_{ji} которой являются средним значением времени выполнения всех технологических операций i -го вида роботом j -го типа:

$$c_{ji} = \sum_{i=1}^m z_{ji} / \prod_{i=1}^m p_{ji}. \quad (7)$$

Цель методики — определить элементы матрицы A , соответствующие минимальной средней стоимости изделия $C(A)$.

Пример применения методики определения оптимальной схемы автоматизации

Рассмотрим пример определения оптимальной схемы автоматизации производства изделия, для изготовления которого необходимо выполнить $m=5$ видов технологических операций.

Таблица 1. Исходные данные

	A	B	C	D	E	F
1						
2		R0	R1	R2		n
3	b_{j1}	8	8	1	n1	6
4	b_{j2}	6	1	5	n2	8
5	b_{j3}	7	8	9	n3	4
6	b_{j4}	3	9	8	n4	6
7	b_{j5}	5	9	2	n5	6
8	Zr_j	-	1000	2000		
9	Tr_j	-	2000	1000		
10	λ_j	1	0,5	2		
11						
12	p_{j1}	0,998	0,97	0,99		
13	p_{j2}	0,999	0,97	0,99		
14	p_{j3}	0,97	0,97	0,98		
15	p_{j4}	0,99	0,97	0,999		
16	p_{j5}	0,95	0,99	0,95		

Таблица 2. Стоимость изделия при индивидуальной сборке

	A	B	C	D	E
1					
2		R0	R1	R2	<i>min</i>
3	Z_{i1}	48	24	12	12
4	Z_{i2}	48	4	80	4
5	Z_{i3}	28	16	72	16
6	Z_{i4}	18	27	96	18
7	Z_{i5}	30	27	24	24
8	Z_j	$Z_0=172$	$Z_1=98$	$Z_2=284$	$Z_{min}=74$
12	P_{j1}	0,988	0,833	0,941	0,941
13	P_{j2}	0,992	0,784	0,923	0,784
14	P_{j3}	0,885	0,885	0,922	0,885
15	P_{j4}	0,941	0,833	0,994	0,941
16	P_{j5}	0,735	0,941	0,735	0,735
17	P_j	$P_0=0,601$	$P_1=0,453$	$P_2=0,586$	0,452
18	$C_j=Z_j/P_j$	$C_0=286$	$C_1=216$	$C_2=484$	$C_{min}=164$

Производственная система включает три типа роботов R0 (человек), R1, R2.

Данные о роботах и изделии сведены в табл. 1. Производственные характеристики роботов, включают матрицу значений времени выполнения всех видов технологических операций b_{ji} всеми типами роботов и человеком (B3:D7), и матрицу вероятностей правильного выполнения всех видов технологических операций (B12:D16).

Кроме того, задан вектор ресурсов всех типов роботов T , вектор стоимости всех типов роботов Zr и производный от этих переменных вектор стоимости единицы рабочего времени всех типов роботов и человека $\lambda = Zr/Tr$.

Параметры изделия, которые расположены в столбце F , содержат информацию о том, сколько технологических операций каждого вида необходимо выполнить, чтобы изготовить узел.

Необходимо по имеющейся информации найти оптимальную схему автоматизации, которая обеспечит минимальную стоимость изготовления изделия.

Процесс определения оптимальной схемы автоматизации состоит из нескольких последовательных шагов.

Первый шаг — вычисление стоимости изготовления изделия каждым типом роботов отдельно (без участия других типов роботов). Для вычисления стоимости используем формулы (1–3).

Используя данные табл. 1 и формулы (1–3), заполним табл. 2. В блоке A3:D7 расположены значения времени выполнения всех пяти видов технологических операций тремя типами роботов. При этом учитывается стоимость единицы рабочего времени робота.

Как видно из табл. 2 все шесть технологических операции первого вида (строка 3) быстрее всех выполняет робот R2 — за 12 ед. Технологические операции второго вида (строка 4) быстрее всех выполняет робот R1 — за 4 ед. В табл. 2 минимальные значения времени выделены цветом и собраны в столбце E.

Таким образом матрица автоматизации принимает вид:

$$A_{min} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

В строке 8 показаны значения времени сборки изделия до контроля разными типами роботов. Таким образом, при индивидуальной сборке дешевле всех сборку выполняет робот типа R1. При коллективной сборке, когда все виды технологических операций выполняются лучшими роботами, стоимость изделия составляет всего 74 ед., что значительно эффективнее.

Однако собранное по любой схеме изделие может оказаться бракованным. Вероятность брака при выполнении каждой конкретной технологической операции невелика ($\leq 5\%$ — табл. 1). Вероятности, что собранное изделие будет годным приведены в строке 17 табл. 2. В строке 18 приведена средняя стоимость изделия с учетом возможного брака. В результате с учетом брака при индивидуальной сборке наиболее эффективен робот R1—216 ед., но еще более эффективна коллективная сборка — 164 ед.

Формирование матрицы автоматизации в табл. 2 проводилось путем выбора минимального времени сборки в строке. То есть для каждого вида технологических операций при изготовлении изделия по оптимальной схеме выбирался тот тип робота, который выполнял сборку за минимальное время. При этом не учитывался возможный брак.

Для формирования оптимальной матрицы автоматизации следует выбирать для выполнения каждого конкретного вида технологических операций не тот тип робота, у которого минимальное время сборки, а тот у которого минимальное среднее время сборки. Оно очевидно больше с учетом неизбежных затрат на компенсацию брака. Покажем, как это можно учесть.

В таблице 3 в блок B3:D7 занесены средние значения времени выполнения технологических операций c_{ji} . Соответственно выбор робота, который лучше всех выполняет операцию, происходит по среднему времени.

Таблица 3. Стоимость изделия при вероятностной сборке

	A	B	C	D	E	F
1						
2		R0	R1	R2	B_{min}	P_{min}
3	i_1	48,580	28,812	12,746	12	0,941
4	i_2	48,386	5,104	86,698	4	0,784
5	i_3	31,628	18,073	78,060	16	0,885
6	C_{j4}	19,119	32,414	96,578	18	0,941
7	C_{j5}	40,811	28,678	32,649	27	0,941
8					77	0,579
18				$C_{min}=$	133	

В результате получается оптимальная матрица автоматизации по критерию среднего времени выполнения, которая в табл. 3 выделена желтым цветом и имеет вид:

$$A_{min} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица (5) отличается от матрицы (4). То есть изменение критерия отбора приводит к изменению схемы автоматизации.

Отметим, что вычисление стоимости изготовления изделия не может быть проведено простым суммированием лучших средних значений времени выполнения операций. Поэтому алгоритм расчета нижней грани стоимости изменится. В табл. 3 (столбцы E и F) заносим значения стоимости выполнения операций и значения вероятностей их правильного выполнения из табл. 2, но уже в соответствии с матрицей автоматизации (5).

Элементы столбца E3:E7 суммируются — это время выполнения всех операций лучшими робота-

ми Z_{min} до контроля. Элементы столбца F3:F7 перемножаются — это вероятности правильного выполнения операций лучшими роботами. Средняя стоимость собранного лучшими роботами изделия равна $C_{opt} = Z_{opt}/P_{opt} = 133$ ед., что существенно лучше всех других способов автоматизации.

Заключение

Представлен алгоритм выбора оптимальной схемы автоматизации производства изделия с использованием системы автоматов, позволяющий получить точную оценку нижней границы стоимости автоматизации при массовом производстве (при заданных ограничениях) с учетом вероятности брака. Алгоритм позволяет избежать полного перебора возможных решений поставленной задачи.

Список литературы

1. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Оценка эффекта автоматизации массового производства // Автоматизация в промышленности. 2016. №5.
2. Чадеев В.М., Аристова Н.И. Самовоспроизведение механических роботов. М.: СИНТЕГ. 2012. 312 С.

Аристова Наталья Игоревна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Чадеев Валентин Маркович — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Контактный телефон (495) 334-91-30.

Система поддержки эксплуатации АББ eSOMS для Нововоронежской АЭС

Нововоронежская АЭС — старейшее предприятие атомной энергетики России. В рамках модернизации Нововоронежской АЭС встала задача увеличения эффективности управления оперативной эксплуатацией атомной электростанцией, повышения надежности и безопасности функционирования ее оборудования и систем. Одним из основных инструментов для решения этой задачи выбрана информационная система поддержки эксплуатации, реализованная на программной платформе eSOMS вер. 3.9 компании АББ.

В марте 2015 г. был заключен договор, а в декабре этого же года система поддержки эксплуатации была внедрена в промышленную эксплуатацию на пятом энергоблоке. До конца 2017 г. предполагается внедрить такую же систему на третьем и четвертом энергоблоках. В дальнейшем у Нововоронежской АЭС есть планы по внедрению этой системы и на двух новых энергоблоках.

Специалисты компании АББ совместно с партнером — компанией ИНЛАЙН ГРУП — провели обследование объекта и разработали техническое задание. Затем была реализована функциональность управления обходами операторов; ведения оперативных журналов, журналов административных и технических распоряжений, журналов неисправностей;

управления сменами оперативного персонала, формирования оперативной отчетности по результатам обходов и данным оперативных журналов: ведомости, рапорты, оперативные журналы и другие отчетные документы.

В рамках проекта в системе сформирована база данных для обходов помещений и оборудования оперативным персоналом, разработана проектная и эксплуатационная документация. Сотрудники АББ провели приемо-сдаточные испытания, обучили сотрудников Нововоронежской АЭС и ввели систему в промышленную эксплуатацию.

Реализация этого решения позволила повысить эффективность проведения обходов оборудования (используются мобильные электронные устройства) и достоверность и оперативность информации о текущем состоянии систем и оборудования работающих энергоблоков.

Система поддержки эксплуатации АББ eSOMS внедрена и более двух лет успешно функционирует на Смоленской АЭС. Ожидается, что внедрение такой системы на Нововоронежской АЭС позволит значительно повысить эффективность и качество работы оперативного персонала станции, снизит риск человеческих ошибок, улучшит культуру производства и обеспечит новое качество процессов управления Нововоронежской АЭС.

<http://www.abb.com>

АББ поддерживает международный пробег на электрокарах — 80EDAYS-ELDURO'2016

10 августа 2016 г. семь электрокаров автопробега прибыли на контрольную точку ПАО «Россети» в Москве, где установлена быстрая зарядная станция АББ серии Тегга, позволяющая заряжать электромобили всех типов за 10 мин.

Мультистандартные быстрые зарядные станции для электромобилей серии Тегга от АББ позволяют зарядить электромобиль любого типа всего за 10 мин для пробега на 120 км. Зарядные станции АББ соответствуют стандартам электромагнитной совместимости МЭК 61000-6-3, то есть даже водители с кардиостимуляторами могут безопасно заряжать свои электромобили.

Международный пробег 80EDAYS-ELDURO'2016 стартовал 16 июня 2016 г. в Барселоне. 11 международных команд из Швейцарии, Испании, Германии, Китая, Венгрии, США, Чехии, Италии и Австрии объединились для того, чтобы преодолеть путь в 25 тыс. км, проехав 25 стран на трех континентах. Цель участников кругосветного пробега на электромоби-

лях — побить предыдущий рекорд аналогичного автопробега, который был пройден за 127 дней.

Этим пробегом участники хотят доказать, что будущее автотранспорта за электромобилями — ни шума, вместе с высокой динамикой электродвигателя. На этом виде транспорта можно без особых проблем и вреда для экологии преодолевать большие расстояния.

Маршрут пробега по территории России прошел через г. Курган, Челябинск, Златоуст, Уфа, Набережные Челны, Казань, Чебоксары, Нижний Новгород, Владимир и достиг Москвы. Теперь команда направляется в Европу.

Эксплуатация быстрой зарядной станции АББ реализована в рамках Всероссийской программы по развитию зарядной инфраструктуры ПАО «Россети».

В 2020 г. планируется очередная кругосветка «80EDAYS — ZERO — 2020» на электромобилях. Уже зарегистрированы три команды из Испании и Германии.

<http://www.abb.com>