

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н.И. Аристова, В.М. Чадеев (ИПУ РАН)

Рассматривается методика оценки ожидаемого эффекта от автоматизации производства массовых изделий заданным набором средств автоматизации. Учитывается как эффективность работы автоматов, так и их стоимость, и время жизни. Алгоритм позволяет выбрать набор автоматов, который обеспечивает минимальную стоимость изделия. Вычисляется оценка минимально достижимой стоимости изготовления.

Ключевые слова: автоматизация, робот, производство, производительность труда, стоимость, технологические операции.

Введение

Автоматизация машиностроительного производства — наиболее эффективный способ снижения стоимости выпускаемых изделий. Концепция автоматизации должна закладываться еще на этапе проектирования предприятия и/или изделия. Средства и системы автоматизации являются существенным вкладом в бюджет проекта. Поэтому выбор средств и систем автоматизации — задача серьезная и непростая. Ошибки при ее решении чреваты серьезными финансовыми потерями [1].

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.

При автоматизации конкретного производства необходимо учитывать все факторы. Однако в предлагаемом подходе экономические факторы производства учитываться не будут.

Для оценки эффективности степени автоматизации производства вычислим, сколько будет стоить изготовление изделия без учета затрат на средства и системы автоматизации и сколько с ними. Эта задача — неоднозначная и по большому счету переборная.

Пойдем по пути оценки минимально достижимой стоимости изделия. Это будет предел, к которому можно только стремиться. Учет более тонкой информации будет увеличивать эту минимальную стоимость. В частности, рассматриваемый алгоритм расчета стоимости учитывает факт наличия необходимых видов и необходимого числа технологических операций, но не учитывает порядка их выполнения. Учет порядка увеличит стоимость и сложность вычисления стоимости.

Для вычисления минимально достижимой стоимости изготовления будем считать, 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.

Принципы оценки стоимости автоматизации

Сейчас на рынке представлено большое (если не сказать громадное) число видов автоматов, выполняющих всевозможные технологические операции от примитивных переключателей с конвейера на конвейер, реализующих логическую функцию «если пошло изделие, то толкнуть его», до универсальных роботов, способных заменить человека. Полный спектр этих автоматов может выполнить практически любую технологическую операцию. То есть формально можно автоматизировать все. В этой ситуации необходимо обсуждать:

- целесообразность автоматизации всех технологических операций;
- факторы, максимально влияющие на стоимость выпускаемого изделия;
- критерии сравнения автоматов;
- параметры автоматов, которые в первую очередь необходимо учитывать при минимизации стоимости изделия.

Каждый автомат имеет стоимость, под которой будем понимать труд человека, затраченный на его окончательную сборку, и изготовление всех комплектующих. Подчеркнем еще раз: стоимость автомата — это труд человека и только! С другой стороны, любой автомат (в прочем, как и человек) не вечен и имеет ограниченное время жизни. Для оценки эффективности автоматизации большое значение имеет такой параметр робота, как стоимость времени его работы [2], которая равна

$$L_j = C_j / T_j, \quad (1)$$

где L_j — стоимость единицы рабочего времени автомата j -го типа, C_j — стоимость автомата j -го типа, T_j — рабочее время автомата j -го типа (время его жизни).

Разные типы роботов могут выполнять разные виды технологических операций. Как правило, чем дороже автомат, тем более сложные функции он может выполнять. Но эта зависимость не прямолинейная и даже не монотонная.

Постановка задачи

Известна технологическая информация об изделии, производство которого необходимо автоматизировать. Эта информация включает список всех m видов технологических операций, необходимых для изготовления изделия. Известно число операций каждого вида n_i ($i=1, m$), необходимое для изготовления конечного изделия.

Известна техническая информация о средствах автоматизации технологических операций, входящих в список необходимых. Условно назовем каждое средство автоматизации роботом (или автоматом). Общее число типов роботов f . Для каждого типа роботов определен список видов технологических операций, которые он может выполнять и время их выполнения. Дана также стоимость каждого типа робота C_j и его жизненный ресурс T_j . Стоимость единицы рабочего времени человека положим равной 1. Каждую технологическую операцию может выполнить либо робот, либо человек.

Требуется найти такое распределение работ между роботами и людьми, чтобы суммарные затраты человека на изготовление изделия, включая затраты на роботов, были минимальны.

В общем случае поиск точного решения – задача сложная и, как правило, переборная. Поэтому полученные решения – это оценки типа «стоимость изделия не может быть меньше оценки».

Алгоритм выбора схемы автоматизации

На каждом машиностроительном производстве готовое изделие любой сложности изготавливается по иерархической схеме. То есть из элементарных деталей собираются узлы, на следующем уровне из этих узлов собираются укрупненные узлы и т. д. до сборки готового изделия.

При изготовлении одного узла на любом уровне иерархии выполняется некоторый конечный набор технологических операций n , число которых лежит в пределах $i=1...m$. Каждая технологическая операция выполняется за некоторое время b , на выполнение технологической операции робот затрачивает некоторую долю своего ресурса T . При сборке одного узла используются f роботов. Оценка стоимость изготовления узла на автоматизированном производстве складывается из суммы оценок стоимости выполнения каждой технологической операции

$$S(\alpha_{ij}) = \sum_{i=0}^f \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} b_{ji} L_j n_i, \quad (2)$$

где

$$0 \leq \alpha_{ij} \leq 1 \text{ для всех } i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, f, \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^f \alpha_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Равенство (4) означает, что, при изготовлении изделия выполнить технологическую операцию определенного вида может или человек, или один из типов роботов. Но не выполнить его нельзя!

Задача состоит в том, чтобы найти минимум функции (2) по α_{ij} в допустимой области (3) при ограничении (4). Очевидно, что существует прямое переборное решение, которое при больших f и m может оказаться трудно выполнимым. Тем не менее особенности реальных систем автоматизации позволяют найти алгоритмы решения, исключающий полный перебор.

Во-первых, отметим, что хотя решения лежат в области (3), строго доказано [2], что оптимальное решение лежит на границе этой области. То есть при оптимальном решении операцию полностью должен выполнять или человек, или только один определенный тип робота. В этом случае резко сокращается объем перебора. Во-вторых, для большого класса производств удается заменить поиск глобального минимума по всем видам технологических операций поиском локального минимума по каждому виду отдельно.

Рассмотрим простейший случай, когда изделие представляет собой узел. При этом считаем, что процесс изготовления не включает контрольных операций. Все операции выполняются правильно, то есть брак отсутствует.

Формирование блока исходных данных

Вся информация об изделии и средствах автоматизации, необходимая для выбора оптимальной схемы производства приведена в табл. 1. Предполагается, что для изготовления узла необходимо выполнить m видов технологических операций (столбец A4: A7), которые может выполнить или человек, или один из f типов роботов. В табл. 1 человек представлен как робот нулевого типа – R_0 .

Время, за которое человек выполняет технологическую операцию первого вида, записывается в ячейку B4, второго – в ячейку B5, последнего – в ячейку B7. Аналогично заполняются значения времени выполнения операций роботами с первого по f -ый тип в блоке C4: F7.

Число технологических операций первого вида, необходимых для изготовления узла, записывается в ячейку G4, второго – в ячейку G5, последнего – в ячейку G7.

Каждый автомат имеет стоимость C и ресурс T (блоки C9: F9 и C10: F10 соответственно).

Стоимости единицы рабочего времени роботов, вычисляемые в соответствии с (1), для всех f типов роботов в табл. 1 помещены в блок C11: F11.

Таблица 1. Исходные данные

	A	B	C	E	F	G
1						
2		R ₀	R ₁	...	R _f	
3	b					n
4	b_1	b_{01}	b_{11}	...	b_{f1}	n_1
5	b_2	b_{02}	b_{12}	...	b_{f2}	n_2
6	...	...	...	...	...
7	b_m	b_{0m}	b_{1m}	...	b_{fm}	n_m
8						
9	C		C_1	...	C_f	
10	T		T_1	...	T_f	
11	L	$L_0=1$	L_1	...	L_f	

Перейдем к изложению алгоритма вычисления оценки стоимости узла после оптимальной автоматизации его производства.

Алгоритм расчета стоимости изготовления узла

Стоимость узла вычисляется по формуле (2). Для удобства поиска минимальной стоимости сведем промежуточные вычисления в табл. 2.

Таблица 2. Выбор схемы автоматизации

	A	B	C	E	F	G	
1		АВТОМАТЫ					Min
2		R ₀	R ₁	...	R _f	R _{min}	
3	Lbn	Затраты времени на выполнение операций					
4	Lb ₁ n ₁	L ₀ · b ₀₁ · n ₁	L ₁ · b ₁₁ · n ₁	...	L _f · b _{f1} · n ₁	S _{1min}	
5	Lb ₂ n ₂	L ₀ · b ₀₂ · n ₂	L ₁ · b ₁₂ · n ₂	...	L _f · b _{f2} · n ₂	S _{2min}	
6	...	...	...	...	...	...
7	Lb _m n _m	L ₀ · b _{0m} · n _m	L ₁ · b _{1m} · n _m	...	L _f · b _{fm} · n _m	S _{m min}	
8							
9	S	S ₀	S ₁	...	S _f	S _{min}	

Алгоритм состоит из двух этапов. Сначала по данным табл. 1 вычисляется время выполнения всех технологических операций одного вида для каждого типа роботов и заносится во все ячейки блока В4: F7 табл. 2. Например, затраты робота типа R₁ на выполнение всех n₂ технологических операций вида b₂ вычисляются по формуле

$$s_{12} = L_1 \cdot b_{12} \cdot n_2, \tag{5}$$

и заносится в ячейку С5 табл. 2. Стоимость s₁₂ — это фактически затраты времени человека на выполнение операции b₂ роботом R₁. Собственно затраты времени робота равны b₁₂ n₂, а коэффициент L₁ учитывает стоимость единицы рабочего времени робота (1).

Стоимость изготовления узла роботом j-го типа вычисляется по формуле

$$S_j (\alpha_{ij} = 1) = \sum_{i=1}^m b_{ji} L_j n_i, \tag{6}$$

и записывается в блок В9: F9 табл. 2.

На втором этапе в каждой строке блока В4: F7 табл. 2, соответствующей определенному виду технологической операции, определяется робот, выполняющий эту операцию с наименьшими затратами. Таким образом, в каждой строке определяется минимальное значение времени изготовления. Из каждой строки эти минимальные значения переносятся в столбец G, где вписаны значения времени изготовления при оптимальном распределении работ. Сумма значений из этого столбца и определит минимально возможную стоимость узла при его изготовлении данным набором автоматов.

Пример выбора оптимальной схемы автоматизации

Рассмотрим более подробно работу алгоритма вычисления минимальной стоимости на числовом примере.

Дан узел, для изготовления которого необходимо выполнить пять видов технологических операций. Необходимое число операций каждого вида приведены в столбце G4: G7 табл. 3. Эти операции могут быть выполнены человеком (столбец В4: В7) или одним из четырех видов роботов (блок С4: F7). Роботы могут работать как быстрее, так и медленнее человека. Кроме того, роботы имеют разную стоимость и разный ресурс. В соответствии с этим стоимость единицы рабочего времени разных роботов (строка В11: F11)

может быть как больше, так и меньше человеческой, которая равна единице.

Требуется выбрать такую схему автоматизации производства, чтобы стоимость изготовления была минимальна.

В соответствии с описанным выше алгоритмом заполним табл. 4 по формулам табл. 2. Как видно из табл. 4, операцию первого вида быстрее всех выполняет робот четвертого типа R₄, операцию второго вида — робот первого типа R₁, операцию третьего вида — робот второго типа R₂, операцию четвертого вида — человек R₀, операцию пятого вида — робот третьего типа R₃. Все эти минимальные значения выделены в табл. 4 коричневым цветом и перенесены в столбец G4: G8. Сумма этого столбца даст минимальную стоимость изготовления узла S_{min}=17 (ячейка G10).

Обсуждение результатов

Минимальная стоимость изготовления узла равна 17. Хорошо это или плохо? Все зависит от величины партии узлов, которую надо изготовить. Если изготавливается непрерывный поток узлов, то есть автоматизируется массовое производство, то стоимость 17 — это будет действительно минимально достижимая цена при возможной с данными роботами автоматизации. И это хорошо.

Но если необходимо изготовить один или несколько узлов, то получим совершенно другую картину. Ручное изготовление дает стоимость 49 (В:10), то есть в три раза дороже, чем при массовом автоматизированном производстве. Использование роботов при единичном производстве еще дороже, поскольку стоимость робота войдет в стоимость узла. Например, использование робота R₁ для изготовления одного узла увеличит его стоимость до 500 ед. Увеличение партии до 10 узлов, снизит стоимость до 50 ед. Но увеличение партии ограничено ресурсом робота (из табл. 3 для робота R₁ он равен 1000). На изготовление одного узла R₁ затрачивает 76 своего времени (табл. 3, С:9). То есть за время своей жизни он может изготовить только 1000/76=13 узлов. И только при полной загрузке стоимость будет равна 38 (табл. 4, С:10).

Таблица 3. Исходные данные

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
3	b	времена выполнения операции					n
4	b ₁	3	4	4	1	1	4
5	b ₂	3	2	3	7	100	2
6	b ₃	4	12	1	3	100	3
7	b ₄	1	4	1	1	100	1
8	b ₅	9	8	2	1	10	2
9	S=Σbn	40	76	30	30	330	
10							
11	C		500	6000	10000	1000	
12	T		1000	2000	5000	4000	
13	L	L ₀ =1	0,5	3	2	0,25	

Таблица 4. Выбор схемы автоматизации

	A	B	C	D	E	F	G	
1								Min
2		R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄		R _{min}
3	L _{bn}							
4	L _{b1n1}	12	8	48	8	1	1	R4
5	L _{b2n2}	6	2	18	28	50	2	R1
6	L _{b3n3}	12	18	9	18	75	9	R2
7	L _{b4n4}	1	2	3	2	25	1	R0
8	L _{b5n5}	18	8	12	4	5	4	R3
9								
10	S	49	38	90	60	156	17	

При массовом производстве роботы будут постепенно исчерпывать свой жизненный ресурс и их придется заменять, приобретая дополнительных роботов.

Таким образом, представленный алгоритм выбора схемы автоматизации производства узла с использованием системы автоматов позволяет получить

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

точную оценку нижней границы стоимости автоматизации при массовом производстве (при заданных ограничениях). Своевременная информация о необходимых затратах на приобретение средств и систем автоматизации поможет при создании бюджета промышленного предприятия и станет залогом его конкурентоспособности в будущем [4].

Список литературы

1. Яковис Л.М. Системный подход к проектированию автоматизированных технологических комплексов непрерывных производств // Автоматизация в промышленности. 2016. №1.
2. Чадаев В.М. Стратегия автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2003. №2-4.
3. Чадаев В. М., Аристова Н.И. Самовоспроизведение механических роботов. М.: СИНТЕГ, 2012. 312 С.
4. Кутин А.А., Корниенко А.А. Современные проблемы и концепция повышения конкурентоспособности продукции отечественного станкостроения // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 2. С. 68-72.

FANUC с помощью Cisco воплощает мечту о фабрике будущего

Компания FANUC объявила о начале совместного проекта с Cisco, Rockwell Automation, и Preferred Networks (PFN) по разработке и развертыванию интеллектуальной системы управления производством FANUC Intelligent Edge Link and Drive (FIELD). В этом проекте Internet вещей, промышленная автоматизация и машинное обучение делают реальностью появление фабрики будущего.

Платформа FIELD обеспечивает аналитическую поддержку, позволяя оптимизировать процесс серийного производства посредством взаимодействия и обмена информацией между станками с ЧПУ, роботами, периферийными устройствами и сенсорами. Цель сотрудничества участников проекта — внедрить такие системы на предприятиях крупнейших автопроизводителей. Клиенты, уже применяющие такие системы, отмечают у себя на производстве сокращение простоев и существенное снижение затрат.

Система FIELD станет платформой доставки развернутых аналитических данных для станков с ЧПУ, роботов, периферийных устройств и сенсоров производства FANUC, используемым в системах автоматизации. Она обеспечит повышение надежности, качества, гибкости и скорости работы станков, что повлечет за собой рост общей эффективности оборудования (коэффициента ОЕЕ) и рентабельности производства. С помощью этой открытой платформы разработчики приложений и другие специалисты смогут создавать решения, повышающие коэффициент ОЕЕ, производительность и качество.

Система FIELD развивает успех действующего в США проекта по обеспечению нулевого времени простоев FANUC Zero Downtime (ZDT) на базе платформы облачных сервисов и ПО Cisco IOT.

В проекте FIELD компания Cisco обеспечивает:

- распределенные периферийные вычисления для ЧПУ и роботов с помощью платформ UCS и ICA. В результате появятся мощности для сбора данных, необходимые при обработке больших массивов, получаемых от станков и роботов, число которых иногда достигает нескольких тысяч только на одном предприятии;
 - конвертированное взаимодействие с коммутаторами Cisco и Rockwell Stratix;
 - сквозную промышленную безопасность, встроенную в сеть с помощью сервисов Industrial Security Appliance line и Sourcefire;
 - сервисы безопасности, гарантирующие адресную доставку необходимых данных от станков, пользователей и приложений специалистам, которым они предназначены;
 - программную платформу, включающую средства конфигурирования приложений, мониторинга, управления жизненным циклом и приложение-агент сообщений.
- Поскольку FIELD изначально будет представлять собой локальное приложение, некоторым пользователям потребуется облачная или гибридная версия рабочей среды. Тогда сервисные менеджеры и клиенты смогут следить за состоянием своих роботов, и для реализации возможностей по наблюдению за несколькими предприятиями и динамического обновления приложений потребуются облачные сервисы Cisco.

По результатам недавнего опроса SCM World survey, в котором приняли участие более 400 руководителей производственных предприятий, использование новой платформы приведет к: сокращению времени простоев на 48% и брака на 49%; повышению ОЕЕ на 16%.

[Http://www.cisco.ru](http://www.cisco.ru) и www.cisco.com