

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРАНЫ

Чадеев В.М., Аристова Н.И.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

chavama@ipu.ru, avtprom@ipu.ru

Предложено формализованное описание промышленных производств, охватывающих различные виды технологических операций, различные типы автоматов, различные виды изготавливаемых изделий. Важный компонент формализованного описания – вероятность качественного изготовления каждой технологической операции каждым автоматом и человеком. Поставлена задача – собрать информацию обо всех видах технологических операций, обо всех автоматах и изделиях в рамках страны в единую базу данных. Наличие такой справочной информации позволит оперативно принимать решение о целесообразности автоматизации тех или иных видов технологических операций и выпускать изделия, характеризующиеся минимальной средней стоимостью.

Ключевые слова: автомат, технологические операции, вероятность качественного изготовления изделия, формализованное описание производств.

Введение

На промышленных предприятиях страны непрерывно выпускаются миллиарды наименований изделий. Эти изделия предназначены для удовлетворения потребностей населения, а также самих промышленных предприятий и народного хозяйства. В процессе изготовления изделий задействованы люди - рабочие, инженеры, проектировщики и т.д. и автоматы. Под автоматом будем понимать любой механизм, который некоторое время работает без участия человека. Это металлорежущие станки, станки, делающие отливки из металла, 3D-принтеры, роботы и т.п.

Промышленные предприятия – структуры динамические. В производство внедряются средства автоматизации как старые, так и вновь изобретенные. Снижается стоимость производства как за счет собственно внедрения автоматов, так и за счет снижения их стоимости. Изменяется ассортимент продукции, необходимой для удовлетворения потребностей общества. Происходит перетекание рабочей и интеллектуальной силы из одного направления в другое. И все эти процессы происходят непрерывно. Но в масштабах страны эти изменения являются достаточно инерционными.

Для управления автоматизацией страны необходима информация об изменениях на предприятиях страны. Решение этой задачи связано со сбором и обработкой огромного массива информации. Но в условиях Industry 4.0 промышленные предприятия вынуждены использовать современные цифровые технологии, чтобы поддерживать собственную конкурентоспособность. А использование цифровых технологий открывает новые возможности для сбора, обработки и анализа производственных данных о выпускаемых изделиях, о состоянии оборудования, о состоянии производства в целом. И эти знания можно использовать для управления автоматизацией в масштабах страны.

На любом производстве неизбежно существует брак, и это необходимо учитывать. Для компенсации брака необходимо выпускать дополнительные изделия. Компенсации брака в масштабах страны имеет свои особенности. Те производства, автоматизация которых важна для экономики страны, - это производство массовой и крупносерийной продукции. В этом случае увеличение затрат на компенсацию брака на всех уровнях производства равны средним затратам на изготовление годной продукции. Если нужно изготовить N экземпляров и вероятность, что изделие будет годным равна Q , то для компенсации брака достаточно изготовить N/Q изделий. Эта простая формула справедлива для крупных партий изделий. При малых N затраты могут быть больше в несколько раз. В масштабах страны наиболее эффективна автоматизация крупных производств, выпускающих массовую продукцию [1].

Предметом исследования является автоматизация промышленных предприятий, выпускающих произвольные изделия. Цель автоматизации – снижение стоимости изделий.

1 Формализованное описание промышленных производств страны

Все изделия промышленности изготавливаются с помощью технологических операций (ТО). Основной путь повышения эффективности различных отраслей производства связан с автоматизацией ТО.

Процедура изготовления любого изделия состоит в выполнении некоторого набора ТО, которые могут выполнять как люди, так и автоматы. Число видов ТО велико, значительно больше 1000 ед., но

неизмеримо меньше числа видов выпускаемых изделий – больше миллиарда. Все изделия изготавливаются из ограниченного набора ТО.

Вся информация о промышленности может быть представлена в виде таблицы в координатах виды ТО – исполнители ТО (табл. 1). Здесь O - множество видов ТО размером t .

Таблица 1. Информация о промышленности в координатах виды ТО – исполнители ТО

Исполнители	Люди	Автоматы	Автоматизированные системы управления	Импорт
Виды ТО	R_0	R_1	R_f	$R_{имп}$
O1	g_{10}, p_{10}	b_{11}, p_{11}	b_{1f}	$b_{1имп}$
O2	g_{20}, p_{20}	b_{21}, p_{21}	b_{2f}	$b_{2имп}$
...
O _i	g_{i0}, p_{i0}	b_{i1}, p_{i1}	b_{if}	$b_{iимп}$
...
O _m	g_{m0}, p_{m0}	b_{m1}, p_{m1}	b_{mf}	$b_{mимп}$

В табл. 1 каждая ТО может выполняться за время g (если исполнитель – человек), b (если исполнитель автомат), при этом выполняться качественно с вероятностью p . Эта таблица по сути представляет собой громадную базу данных. Заголовки табл. 1 могут быть расшифрованы. Например, блок «люди» можно представить в виде табл. 2, блок «автоматы» - в виде табл. 3 и 4. В эту базу данных входят как дискретные, так и аналоговые средства производства.

Аналоговые средства производства (прокатные станы, химические и атомные реакторы и т. п.) управляются с помощью автоматизированных систем управления и в этой работе рассматриваться не будут.

Таблица 2. Специалисты, которые могут выполнять ТО за время g и с вероятностью p .

Специалисты	Сборщик	Токарь	...	Программист	...	Разнорабочий
Виды ТО	g_{01}, p_{01}	g_{02}, p_{02}	...	g_{0i}, p_{0i}	...	g_{0x}, p_{0x}
O1	g_{101}, p_{101}	g_{102}, p_{102}	...	g_{10i}, p_{10i}	...	g_{10x}, p_{10x}
O2	g_{201}, p_{201}	g_{202}, p_{202}	...	g_{20i}, p_{20i}	...	g_{20x}, p_{20x}
O3	g_{301}, p_{301}	g_{302}, p_{302}	...	g_{30i}, p_{30i}	...	g_{30x}, p_{30x}
...
O _i	g_{i01}, p_{i01}	g_{i02}, p_{i02}	...	g_{i0i}, p_{i0i}	...	g_{i0x}, p_{i0x}
...
O _m	g_{m01}, p_{m01}	g_{m02}, p_{m02}	...	g_{m0i}, p_{m0i}	...	g_{m0x}, p_{m0x}

Обозначим множество автоматизированных средств производства через R . Множество R содержит подмножества автоматов размером f , способных выполнять ТО определенного вида, например, i -го вида. Подмножество R_i размером f_i содержит средства производства, способные выполнять ТО вида O_i .

Таблица 3. Информация о времени и вероятности качественного выполнения ТО автоматами.

Типы автоматов	R1	R2	...	Rj	...	Rf
Виды ТО	b1	b2	...	b _j , p _j	...	b _f , p _f
O1	b ₁₁ , p ₁₁	b ₁₂ , p ₁₂	...	b _{1j} , p _{1j}	...	b _{1f} , p _{1f}
O2	b ₂₁ , p ₂₁	b ₂₂ , p ₂₂	...	b _{2j} , p _{2j}	...	b _{2f} , p _{2f}
O3	b ₃₁ , p ₃₁	b ₃₂ , p ₃₂	...	b _{3j} , p _{3j}	...	b _{3f} , p _{3f}
...
O _i	b _{i1} , p _{i1}	b _{i2} , p _{i2}	...	b _{ij} , p _{ij}	...	b _{if} , p _{if}
...
O _m	b _{m1} , p _{m1}	b _{m2} , p _{m2}	...	b _{mj} , p _{mj}	...	b _{mf} , p _{mf}

Кроме того, для каждого средства производства необходимо иметь сведения о его жизненном ресурсе T , стоимости C и стоимости единицы рабочего времени λ , которая определяется как

отношение стоимости к ресурсу. Сведения по всем средствам производства необходимо представить, как показано в табл. 4.

Таблица 4. Информация о ресурсе, стоимости и стоимости единицы рабочего времени автоматов.

Типы автоматов	R1	R2	...	Rj	...	Rf
T	T1	T2	...	Tj	...	Tf
C	C1	C2	...	Cj	...	Cf
$\lambda=C/T$	λ_1	λ_2	...	λ_j	...	λ_f

Необходимо также собрать информацию по числу ТО, выполняемых в различных отраслях промышленности (табл. 5), а затем собрать информацию по числу ТО, необходимых для изготовления каждого вида изделия в каждой отрасли промышленности, например, в автомобилестроении (табл. 6).

Таблица 5. Число ТО, необходимое для изготовления изделий в различных отраслях промышленности

Отрасль промышленности	Автомобилестроение	Судостроение	Приборостроение	Станкостроение
Виды ТО	N_1	N_2	N_3	N_4
O1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}
O2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}
...
O _m	n_{m1}	n_{m2}	n_{m3}	n_{m4}

Таблица 6. Число ТО, необходимое для изготовления изделий в автомобилестроении

	Автомобилестроение			
Модель	ГАЗ-24	ГАЗ-66	УАЗ-12	ПАТРИОТ
Виды ТО	N1	N2	N3	N4
O1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}
O2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}
...
O _m	n_{m1}	n_{m2}	n_{m3}	n_{m4}

Поскольку рассматривается производство изделия, в котором часть ТО выполняет человек, а часть – автоматы, требуется решить задачу оптимального распределения работ между автоматами и людьми, а также между различными автоматами в соответствии с критериями:

- минимальные время изготовления изделия;
- среднее время изготовления изделия (с учетом вероятности брака);
- минимальные стоимость изготовления изделия;
- средняя стоимость изготовления изделия.

Матрица автоматизации $A=||\alpha_{ij}||$:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{10} & \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{1f} \\ \alpha_{20} & \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2j} & \dots & \alpha_{2f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{i0} & \alpha_{i1} & \alpha_{i2} & \dots & \alpha_{ij} & \dots & \alpha_{if} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m0} & \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \dots & \alpha_{mj} & \dots & \alpha_{mf} \end{pmatrix} \quad (1)$$

включает параметры автоматизации α_{ij} , которые определяют, какие виды ТО выполняет автомат (и какой автомат), а какие — человек. Параметр автоматизации изменяется в пределах $0 \leq \alpha \leq 1$. Если все однотипные операции выполняет человек, то $\alpha = 0$, если автомат, то $\alpha = 1$. Матрица содержит число строк, соответствующее числу разных видов ТО (m) и число столбцов – по числу исполнителей (f) этих ТО (человек или автомат j -го типа) [1].

2 Задачи управления автоматизацией страны

Представленное формализованное описание промышленных производств страны позволит управлять автоматами различных предприятий страны. Для использования формализованного описания и достижения поставленной цели – минимизация стоимости выпускаемых изделий требуется решить ряд задач.

2.1 Сбор информации в соответствии с формализованным описанием промышленных производств.

Первая задача, которую необходимо решить для автоматизации в масштабе страны, состоит в сборе следующей информации:

- все виды ТО, используемые в промышленности,
- характеристики всех автоматов (отечественных и импортных): стоимость, ресурс, стоимость единицы рабочего времени, исполняемые виды ТО (время выполнения каждой ТО и вероятность ее качественного выполнения),
- характеристики всех возможных изделий (число различных видов ТО, необходимых для изготовления каждого изделия).

Это весьма сложная задача, которую ранее не ставилась. Близкую по смыслу задачу решал межотраслевой баланс в Советском Союзе [2]. Но межотраслевой баланс подразумевал взаимопроникновение изделий из отрасли в отрасль (например, металлургия в автомобильную промышленность поставляет металл, а автомобильную промышленность снабжает в предприятия металлургии грузовиками). В табл. 7 представлен небольшой фрагмент межотраслевого баланса страны за 1961 г. В каждой клетке таблицы приведено сколько человек в течении года из одной отрасли работали для других отраслей.

Таблица 7. Фрагмент межотраслевого баланса страны 1961 г.

	Металлы	Метизы	Электроэнергетика	Кабели	Автопром	Тракторы	Подшипники
Металлы	439470	43814	470	36544	36275	34845	6388
Метизы	2018	1866	101	101620	2214	1520	433
Электроэнергетика	37619	2664	494	802	2283	4597	1099
Кабели	657	52	70	44	-	-	-
Автопром	782	83	54	9	35440	1279	12
Тракторы	437	9	16	1	14	38074	1
Подшипники	2389	285	97	21	8546	9419	1349

Современные промышленные производства характеризуются стремлением собрать и обработать как можно больше информации о ходе технологического процесса, о состоянии оборудования, о местонахождении изготавливаемых изделий, их качестве и т.д. Анализ всей этой информации позволяет своевременно реагировать на производственные отклонения, принимать упреждающие меры, тем самым, повышая производительность и качество выпускаемых изделий, конкурентоспособность предприятия в целом [3].

Для реализации указанных потребностей в условиях Industry 4.0 значимым этапом является сбор производственных данных и тесно связанная с ним технология промышленного Internet вещей.

Промышленный Internet вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) – технология, обеспечивающая информационное взаимодействие вычислительных средств предприятия, подключенных к компьютерной сети предприятия или сети Internet, без непосредственного участия человека. Другими словами, информация, поступающая от встроенных в промышленное оборудование датчиков и программного обеспечения, собирается на производственном сервере и в дальнейшем передается в облако (локальное или глобальное) для обработки и анализа.

В рамках технологии IIoT используется информация от датчиков, штатно установленных в мехатронных узлах промышленного оборудования, а также от дополнительных датчиков, устанавливаемых на критически важных производственных узлах и компонентах, за которыми требуется пристальное слежение. Дополнительные датчики устанавливаются также на

производственные участки, которые являются узким местом в производственной системе (бутылочным горлом), чтобы выявлять и устранять производственные проблемы.

В системах уровня IoT могут использоваться самые различные датчики измерения физических величин. Отдельно отметим важность интеграции IoT систем с технологиями компьютерного зрения как источника производственной информации, значительно расширяющих возможности фиксации и анализа информации с производственной линии.

Компьютерное зрение уже не первый год используется в производственных системах для различных целей, таких как контроль качества выпускаемого полуфабриката, управление потоком комплектующих и т.д. Компьютерное зрение реализуется путем установки внешних видеодатчиков на конвейере, чтобы отслеживать и фиксировать действия в заранее определенной области производственной линии. Решение отличается большой адаптируемостью и гибкостью, поскольку различные типы оптических датчиков могут быть просто и быстро перемещены в производственной среде без какой-либо специфической инфраструктуры [3].

Следующим IoT источником информации на производственной линии служат RFID-системы, которые автоматически, в беспроводном режиме передают информацию об объекте (детали, полуфабрикате) на сервер в реальном времени. Технология RFID используется для решения задач автоматизированного контроля перемещения объектов, учета большого числа продукции и т.д.

Источником дополнительной производственной информации являются также системы управления технологического оборудования (роботы, ПЛК, контроллеры движения и т.д.), из которых извлекается информация для анализа, не предусмотренная для предоставления пользователю в штатном режиме работы. Для доступа к этой информации разрабатываются специальные программные приложения [4].

Таким образом, для реализации указанной тенденции по сбору максимальной информации о производственном процессе технологические линии оснащаются дополнительными датчиками, видеокамерами, RFID-системами, комплексами технического зрения и прочим оборудованием – источниками искомой информации, а также периферийными вычислительными устройствами, способными на локальном уровне произвести первичную обработку данных. Далее отфильтрованная информация по коммуникационным каналам передачи данных поступает на сервер предприятия или в специализированное облако, где происходит аналитическая обработка информации.

Для обработки значительных объемов информации потребовалась разработка специальных баз данных и алгоритмического обеспечения, получивших название – технологии работы с большими данными [3].

Все это позволяет надеяться, что первая задача будет решена в ближайшем будущем. Впрочем, для получения информации всегда остается доступным трудоемкий ручной сбор статистики.

2.2 Оценка минимального времени выполнения всех ТО.

Вторая задача состоит в том, чтобы по информации, содержащейся в матрице табл. 2, найти минимальные значения времени выполнения для всех видов ТО, требующихся стране, и типы автоматов, реализующих это время. Задача сложная, многокритериальная и часто не однозначная. Основные факторы, которые должны быть учтены: вид операции O , тип автомата R , стоимость автомата C , ресурс автомата T , время выполнения операции b_{ij} , вероятность качественного выполнения операции p_{ij} .

Время изготовления изделия автоматами определяется формулой:

$$G = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} n_{ij} . \quad (2)$$

Алгоритм поиска минимальных значений времени выполнения для всех видов ТО рассмотрен в [5,6].

2.3 Оценка минимальной стоимости выполнения всех ТО.

Третья задача состоит в том, чтобы найти минимальную стоимость выполнения для всех видов ТО, требующихся стране, и типы автоматов, реализующих эту стоимость. Эта задача возникает из-за того, что стоимость разных типов автоматов различна, вследствие чего различаются и стоимости единицы рабочего времени автоматов. Стоимость будем выражать через время.

Оценка стоимости отличается от оценки времени необходимостью учитывать стоимость единицы рабочего времени автоматов, выполняемых ТО.

Стоимость изготовления изделия автоматами определяется формулой:

$$C = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} \lambda_j n_{ij} \quad (3)$$

Алгоритм поиска минимальных значений стоимости выполнения для всех видов ТО рассмотрен в [5,6].

2.4 Оценка минимального среднего времени и средней стоимости выполнения всех ТО.

Изделие, изготовленное за время G и со стоимостью C будет качественным только с вероятностью:

$$P = \prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{ij} n_{ij}} \quad (4)$$

Это справедливо для любых типов автоматов, а также для ТО, выполняемых человеком. В табл. 1, 2, 3 значения вероятностей для каждой ТО и каждого исполнителя этой ТО должны быть собраны и зафиксированы.

С учетом вероятностей качественного выполнения ТО время и стоимость изготовления каждого изделий будет больше, чем это было оценено в формулах (2) и (3).

Четвертая задача состоит в том, чтобы найти минимальное среднее время и минимальную среднюю стоимость выполнения ТО и изготовления изделия.

Среднее время изготовления изделия автоматами определяется формулой:

$$G = \frac{\sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} n_{ij}}{\prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{ij} n_{ij}}} \quad (5)$$

Средняя стоимость изготовления изделия автоматами определяется формулой:

$$C = \frac{\sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} \lambda_j n_{ij}}{\prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{ij} n_{ij}}} \quad (6)$$

Алгоритм поиска минимальных средних значений времени и стоимости выполнения для всех видов ТО рассмотрен в [5,6].

Заключение

В работах [7, 8] были показаны возможности использования предложенного формализованного описания промышленных производств для управления различного типа автоматами при обеспечении функционирования автономных систем, а также для организации взаимодействия предприятий в условиях кластерных систем.

Действительно, вопросы автоматизации производства стоят особенно остро, если речь идет об автономных системах, к которым относятся, например, полярные и орбитальные станции, атомная подводная лодка и т.д. Люди, поддерживающие жизнеобеспечение автономных систем, должны иметь возможность осуществлять ремонт оборудования и изготавливать некоторые изделия самостоятельно, без помощи с большой земли.

Основной целью реализации кластерной политики является обеспечение высоких темпов экономического роста и диверсификации экономики за счет повышения конкурентоспособности предприятий, поставщиков оборудования, комплектующих, специализированных производственных и сервисных услуг научно-исследовательских и образовательных организаций, образующих территориально-производственные кластеры. В настоящее время в России проводятся активные исследования в области построения моделей кластеров в различных областях экономики, различных географических регионах, а также с учетом выявления структуры, компонентов и потенциала развития [1].

Предложенное формализованное описание производств, а также математические модели позволяют минимизировать затраты на выполнение отдельных ТО и производство изделий в целом применительно к автономным системам и промышленным кластерам. Рассмотренные идеи могут быть распространены на промышленные производства всей страны.

В работе сформулирована новая задача - необходимости сбора информации обо всех ТО, всех автоматах и об изготавливаемых изделиях, выпускаемых в стране. Собранная информация будет использоваться для поиска оптимального распределения работ между автоматами, выполняющими каждую ТО, по выбранному критерию; позволит оперативно определять план выпуска продукции, экономно расходовать ресурс автоматов, экономить электроэнергию, расходные материалы и предлагать потребителям качественную продукцию в заданные сроки.

Решение поставленной задачи позволит минимизировать стоимость выпускаемых изделий, повысить конкурентоспособность каждого предприятия в стране и решить важную народно-хозяйственную задачу – повысить эффективность промышленности страны.

Работа осуществлялась в рамках коллективного проекта Минобрнауки России № 13.331–2 «Моделирование и интеллектуальное управление производственными процессами в промышленности и электроэнергетики».

Литература

1. Чадеев В. М., Аристова Н. И. Самовоспроизведение механических роботов. М.: СИНТЕГ. 2012. - 312 с. ISBN 978-5-89638-123-5.
2. Народное хозяйство СССР в 1961 год. Статистический ежегодник. М. Госстатиздат. ЦСУ СССР.1962. 861 с.
3. Аристова Н.И. Автоматизация сборочных производств уровня Industry 4.0 // Автоматизация в промышленности. 2020. №5.
4. Yuval Cohen, Hussein Naseraldin, Atanu Chaudhuri, Francesco Pilati. Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand Assembly 4.0 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. 105:4037–4054.
5. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Метод быстрого оценивания технологичности конструкции изделия с учетом вероятностей качественной работы автоматизированных средств производства // Датчики и системы. 2021. №1.
6. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Метод быстрого оценивания минимальной средней стоимости изготовления изделия на производствах, оснащенных станками с ЧПУ // Датчики и системы. 2021. №2.
7. Chadeev V.M., Aristova N.I. Automation of Cluster Large-Scale Production Systems // Advances in Systems Science and Applications. 2020. Vol 20. No 4. С. 105-112.
8. Chadeev V.M., Aristova N.I. Automation of Autonomous Largescale Production Systems // Proceedings of the 12 International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD2019). – М.: IEEE, 2019. – С. 1–4.