

АВТОМАТИЗАЦИЯ АДАПТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Аристова Н.И., Чадеев В.М.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65
avtprom@ipu.ru, chavama@ipu.ru*

Аннотация: Рассматривается процесс управления технологической подготовкой адаптивных производств с применением методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств, основанной на анализе эффективности автоматизации технологических операций по различным критериям, учитывающим показатели качественного выполнения технологических операций автоматами.

Ключевые слова: адаптивные производства, технологическая подготовка производства, анализ эффективности автоматизации технологических операций, методология цифрового моделирования.

Введение

В последние годы наблюдаем широкое распространение разнообразных промышленных роботов. Современные полнофункциональные роботы характеризуются универсальностью применения, отказоустойчивостью и экономической эффективностью. Стандартный процесс производства роботов включает тщательное морфологическое и программное проектирование, выбор механических и электрических элементов для построения морфологии, сборку аппаратного оборудования, разработку программно-аппаратного интерфейса и тестирование роботов. Универсальные промышленные роботы способны качественно выполнять поставленные перед ними задачи в тщательно контролируемых условиях.

Однако для роботов, работающих в непредсказуемой и динамичной повседневной среде, гибкость и отказоустойчивость могут стать более важными характеристиками даже по сравнению с точностью промышленного уровня. Устойчивость таких роботов к изменениям окружающей среды и частичным отказам имеет решающее значение для обеспечения контроля расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание. Отказоустойчивость или адаптивность относится к способности роботов самостоятельно находить альтернативные стратегии или морфологии, чтобы при изменении окружающей среды или частичных отказах данные задачи все еще могли выполняться.

Разработкой адаптивных робототехнических модулей занимаются сегодня многие исследователи во всем мире [1–5]. Высказываются предположения, что успехи в области создания адаптивных роботов потенциально могут упростить дорогостоящий производственный процесс обычных роботов [6].

Применение современных адаптивных робототехнических модулей позволяет строить адаптивные производства.

1 Адаптивное производство

В эпоху цифровых технологий приоритетной задачей дискретного производственного процесса, оснащенного современными автоматами, стало обеспечение его клиенто-ориентированности, а, значит, гибкости, характеризующейся:

- способностью выпускать разные виды изделий на одном и том же оборудовании;
- минимальным участием человека в производственном процессе;
- перенастройкой в короткие сроки на выпуск новой продукции;
- выпуском изделий, максимально ориентированных под требования конкретных клиентов;
- возможностью по желанию клиента внесения изменений в готовый проект изделия.

Примером современного гибкого, клиенто-ориентированного и адаптивного производства являются матричные производства.

Концепция матричного производства состоит в том, что технологические операции (ТО) в цехе выполняются внутри отдельных типовых производственных ячеек, которые размещаются в узлах регулярной сетки – матрицы. Все ячейки оснащены оборудованием, не зависящим от изготавливаемой продукции, и обладают базовыми функциями для конкретного вида продукции. В ячейках устанавливаются промышленные автоматы и поворотные столы с необходимой технологической оснасткой, приемные приспособления для инструментов, специализированное оборудование. Ячейки за счет сменного инструмента и оснастки могут перенастраиваться на

различные технологические операции: производственные – сварка, сборка узлов с помощью резьбовых соединений и т.д. либо операции контроля – неразрушающий контроль материалов, 3D-сканирование формы сложных изделий и т.д. [7].

Транспортировка комплектующих, деталей, узлов, материалов, сменного инструмента между ячейками осуществляется автоматическими тележками (интеллектуальное средство доставки) – мобильными роботами по программе с учетом комплектации данного изделия и производственной загрузки отдельных ячеек. По прибытию тележки в ячейку робот «забирает» детали, материалы и инструмент и начинает работать с ними.

Таким образом, обеспечивается гибкость по всей цепочке выпуска изделия. При смене производственного задания система автоматически перестраивается, и становится возможным выпуск партий уникальных изделий в рамках массового производства.

2 Управление технологической подготовкой адаптивного производства

2.2 Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Современные технологии позволяют автоматизировать и оптимизировать производственные задачи, решение которых до настоящего времени требовало больших временных, вычислительных, кадровых и финансовых затрат.

Одной из таких задач является управление процессом технологической подготовкой дискретного производства, которая выполняется каждый раз перед выпуском новой продукции. В условиях гибких производств, когда требуется клиенто-ориентированный подход к выпуску продукции, оптимизация этапа технологической подготовки производства позволит значительно сократить время выпуска изделия и, тем самым, повысить конкурентоспособность предприятия в целом.

Для решения этой задачи в ИПУ РАН разработана методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств, основанная на анализе эффективности автоматизации ТО по различным критериям, учитывающим показатели качественного выполнения ТО автоматами [8, 9].

Применение данной методологии позволяет уже на самом первом этапе ТПП оценить время и стоимость изготовления изделия с учетом вероятности качественного выполнения ТО автоматами.

В основе методологии лежит формализованное описание ТО, включающее измеряемые переменные: b – время выполнения ТО; p – вероятность качественного (в соответствии с производственными нормативами) выполнения ТО.

При описании автоматов используются три параметра:

- стоимость автомата C , которая может быть пересчитана через время, затрачиваемое на его изготовление;
- время жизни автомата T , так как все сложные технические системы имеют ограниченный ресурс. Национальные ассоциации робототехники Кореи, Японии, Северной Америки и Китая предполагают, что средний срок службы автомата составляет 12 лет;
- стоимость единицы рабочего времени автомата λ как отношение его стоимости к ресурсу.

Методология обеспечивает получение оценок эффективности автоматизации ТО благодаря цифровой модели автоматизации ТО, которую удобно представить в виде матрицы $A=||\alpha_{ij}||$ или:

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

где α_{ij} – параметры автоматизации, определяющие, какие виды ТО выполняет тот или иной автомат. Параметр автоматизации изменяется в пределах $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$. Если данную ТО выполняет тот или иной робот, то соответствующий ему параметр автоматизации $\alpha_{ij} = 1$. Матрица содержит число строк, соответствующее числу разных видов ТО (m) и число столбцов – по числу исполнителей f роботов и человек (первый столбец), выполняющих эти ТО.

Стоимость выполнения ТО i -го вида роботом определяется по формуле:

$$C_{ij} = \lambda_j b_{ij}, \quad (2)$$

где b_{ij} – время выполнения ТО i -го вида роботом j -го типа, λ – стоимость единицы рабочего времени робота.

Средняя стоимость выполнения ТО i -го вида роботом определяется по формуле:

$$\bar{C}_{ij} = \frac{\lambda_j b_{ij}}{p_{ij}}, \quad (3)$$

где p_{ij} – вероятность качественного выполнения ТО i -го вида роботом j -го типа.

2.2 Анализ эффективности автоматизации ТО, выполняемых адаптивной роботизированной ячейкой

Рассмотрим пример роботизированной ячейки адаптивного производства, состоящей из двух механообрабатывающих станков и промышленного робота. Автоматическая тележка подвозит заготовки и перекладывает их на конвейер. Робот снимает детали с конвейера и помещал их на обработку сначала в один станок, а затем – в другой. После завершения обработки заготовки на станках робот забирает деталь и устанавливает ее на конвейер. С этого конвейера автоматическая тележка перемещает заготовки к следующей роботизированной ячейке.

Робот в составе робототехнической ячейки должен решать следующие производственные задачи.

1. Захват робота перемещается в область расположения заготовки (на конвейере или в рабочей зоне станков) и выполняет захват заготовки.

2. Захват робота с заготовкой перемещается в зону обработки первого или второго станка и устанавливает заготовку на станке в заданных координатах.

3. Захват робота с заготовкой перемещается в зону выходного конвейера и устанавливает заготовку.

Требуется определить: какую из трех имеющихся видов заготовок, отличающихся по геометрическим параметрам, следует обрабатывать в данной роботизированной ячейке. При этом имеющиеся станки способны выполнить любую из этих заготовок. Определенные сложности и особенности данной роботизированной ячейки при работе с разными видами заготовок связаны с возможностями захвата робота и используемыми им средствами оснащения.

В табл. 1 представлены исходные данные: b_i – время выполнения роботом технологической операции i -го вида, p_i – вероятность качественного выполнения технологической операции i -го вида для каждого типа заготовок.

Таблица 1. Производственные показатели выполнения ТО роботом для трех анализируемых типов заготовок

Код ТО	Заготовка 1		Заготовка 2		Заготовка 3	
	b_1	p_1	b_2	p_2	b_3	p_3
1	2	0,999	2,5	0,995	2	0,99
2	1,5	0,999	2	0,999	1,7	0,999
3	1	0,999	1,5	0,999	1	0,999

Далее в соответствии с методами и алгоритмами методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств для каждой ТО, выполняемой роботом, и каждой из возможных заготовок по формуле (2) оценивается стоимость выполнения ТО (см. табл. 2, ст. В, С, D). В проекте используется промышленный робот Fanuc, стоимость единицы рабочего времени которого $\lambda = 0,15$.

В каждой строке табл. 2, определяется минимальное значение стоимости выполнения ТО i вида при обработке каждой заготовки. Минимальные значения стоимости выделены цветом и представлены в столбце Н – Z_{min} .

Таблица 2. Оценки минимальной стоимости обработки заготовок

А	В	С	Д	Н	Ж
Код ТО	Заготовка 1	Заготовка 2	Заготовка 3	Z_{min}	Тип заготовки
	$z_1 = b_1 \lambda_1$	$z_2 = b_2 \lambda_1$	$z_3 = b_3 \lambda_1$		
1	0,3	0,375	0,3	0,3	31
2	0,225	0,3	0,255	0,225	31
2	0,15	0,225	0,15	0,15	31

Из табл. 2 видно, что все ТО, связанные с захватом и установкой заготовок, робот выполняет за наименьшее время при взаимодействии с заготовкой первого типа.

Далее в соответствии с методами и алгоритмами методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств для каждой ТО, выполняемой роботом, и каждой из возможных заготовок по формуле (3) оценивается средняя стоимость выполнения ТО (см. табл. 3, ст. Е, F, G).

В каждой строке табл. 3 определяется минимальное значение средней стоимости выполнения ТО i вида при обработке каждой заготовки. Минимальные значения средней стоимости выделены цветом и представлены в столбце $J - Z_{min\text{ ср.}}$.

Таблица 3. Оценки минимальной средней стоимости обработки заготовок

A	E	F	G	I	J
Код ТО	Заготовка 1	Заготовка 2	Заготовка 3	$Z_{min\text{ ср.}}$	Тип заготовки
	z_1/p_1	z_2/p_2	z_3/p_3		
1	0,3003	0,376884	0,30303	0,3003	31
2	0,225225	0,3003	0,255255	0,225225	31
2	0,15015	0,225225	0,15015	0,15015	31

Из табл. 3 видно, что все ТО, связанные с захватом и установкой заготовок, робот выполняют с наименьшей стоимостью при взаимодействии с заготовкой первого типа.

Заключение

Таким образом, на модельном примере показаны преимущества от применения методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких адаптивных производств. Оперативно были получены оценки стоимости и средней стоимости выполнения ТО роботом для трех типов обрабатываемых заготовок. По результатам этих оценок сформулированы рекомендации – обрабатывать на данной роботизированной ячейке заготовки первого типа.

Применение данной методологии будет полезным при обработке заготовок небольшими партиями и при частой смене ассортимента выпускаемых изделий и позволит повысить конкурентоспособность предприятия в целом.

Литература

1. Guo H., Meng Y., Jin Y. Analysis of Local Communication Load in Shape Formation of a Distributed Morphogenetic Swarm Robotic System // Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computations. 2011. Pp. 1–8.
2. Ijspeert A., Crespi A., Ryczko D., Cabelguen J.-M. From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model // Science. 2007. Vol. 315. Pp. 1416–1419.
3. Crespi, and Ijspeert A. Online Optimization of Swimming and Crawling in an Amphibious Snake Robot // IEEE Trans. on Robotics. 2008. Vol. 24. No. 1. Pp. 75–87.
4. Hartono P., Nakane A. Modular Robots with Adaptive Connection Topology // Proc. Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems. 2010. Pp. 191–196.
5. Hartono P., Nakane A. Adaptive Coupled Oscillators for Modular Robots // IEEE Trans. on Electronics, Information and Systems. 2011.
6. Hartono P., Nakane A. Robotics Modules with Real time Adaptive Topology // International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications. Vol.3. 2011. Pp. 185–192.
7. Кораблев А.В., Турков В.А. Матричное авиасборочное производство в парадигме Industry 4.0 // Автоматизация в промышленности. 2022. №5.
8. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Разработка гибкой робототехнической ячейки для производства деталей типа «тело вращения» с минимальной средней стоимостью // Датчики и системы. 2022. №3.
9. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Модернизация проекта гибкой робототехнической ячейки для производства деталей типа «втулка» // Автоматизация в промышленности. 2022. №4.