

Модели и инструментальные средства синтеза оптимизированных технологических процессов и устройств в различных приложениях¹

*В.Б. Мелехин,
зав. каф. прогр. обесп. выч. техн. и автом. сист., д.т.н., проф., pashka1602@mail.ru,
ДГТУ, г.Махачкала
М.В.Хачумов,
с.н.с., ст.преп., к.ф.-м.н, khmike@inbox.ru,
ФИЦ ИУ РАН и РУДН, г. Москва,
В.М. Хачумов,
зав. лаб., г.н.с., д.т.н., проф, vtnh48@mail.ru,
ФИЦ ИУ РАН, РУДН, г. Москва и ИПС РАН, г. Переславль-Залесский*

Разработаны модели и методы представления знаний для решения задач автоматического синтеза технологических цепочек, технологических процессов и устройств с различными структурами и связями в рамках интеллектуальной САПР. Рассмотрены общие подходы к ситуационному управлению сложным технологическим процессом в нестабильной среде с нечеткой логикой обработки знаний. Предложены правила для практического сравнения семантических сетей, представленных графами, что необходимо для выработки адекватных управлений. Создана концепция, открывающая путь к автоматическому оптимизационному проектированию технологических цепочек, процессов и устройств на основе пополняемых баз знаний и правил.

Models and methods for the representation of knowledge for solving problems of automatic synthesis of technological chains and technological processes with various structures and connections within the framework of intelligent CAD are developed. The general approaches to the situational control of a complex technological process in an unstable environment that use fuzzy logic of knowledge processing are considered. We propose rules for practical comparison of semantic networks, represented by graphs, which is necessary to develop adequate controls. Thus, a concept has been created that opens the way to automatic optimization design of technological chains, processes and devices, based on knowledge bases and rules.

Введение

Выбор на альтернативной основе наиболее эффективного управления технологическим процессом (ТП) по степени его влияния на эффективность текущего состояния сложного ТП или образующих его технологических операций в условиях неопределенности является одной из актуальных проблем управления сложными объектами [1,2]. Следует отметить, что задача выбора эффективного управления в стабильных условиях функционирования, как правило, решается тривиально на основе заданных критериев оценки эффективности альтернативных управлений и оптимизации при заданных ограничениях [3].

В общем случае имеется кортеж $\langle \text{ТП}_1, \text{ТП}_2, \dots, \text{ТП}_j, \dots, \text{ТП}_m \rangle$ технологических процессов (ТП_i), каждый из которых, в свою очередь, определяется упорядоченной последовательностью технологических операций $O_j = \{o_i^j\}, i = \overline{1, n_j}$, реализуемых на соответствующем им технологическом оборудовании, функционирующем в заданных режимах. Таким образом, задача сводится к сбалансированию входящих в нее технологических процессов, а задача управления определяется регулированием процесса преобразования ТП при случайно действующих в окружающей среде возмущающих факторах. Проблема автоматического построения технологических маршрутов (ТМ) для механической обработки заготовок, например, на гибкой автоматической технологической линии, обладающей требуемыми возможностями, является актуальной проблемой искусственного интеллекта. Это обусловлено тем, что в современных САПР технологических процессов задача автоматического проектирования ТМ ввиду ее высокой сложности фактически не решается, т.к. для этого требуется формализация творческой деятельности технолога-проектировщика. Проектирование ТМ, в лучшем случае, осуществляется высококвалифицированным технологом в диалоговом режиме с ЭВМ и сводится к выбору нужных технологических операций и упорядоченному их размещению в разрабатываемом технологическом маршруте [4,5].

1. Методические основы построения многоуровневой модели ситуационного управления сложным технологическим процессом

Сформулируем основные проблемы, которые необходимо решить в процессе построения многоуровневой модели ситуационного управления сложным технологическим процессом. В общем случае в основе организации ситуационной модели управления лежит гипотеза о том, что на основе полученных экспертным путем технологических данных и накопленного передового опыта управления можно сформировать множество ситуаций $S^* = \{s_k^*\}, k = \overline{1, K}$ и поставить в соответствие каждой из них эффективное управление $u_k \in U$, позволяющее обеспечить требуемое текущее состояние ТП. Под эффективным управлением, как правило, следует понимать такое управление, которые позволяет выполнить необходимые для достижения требуемых режимов функционирования ТП преобразования проблемных текущих ситуаций на объекте управления. В общем случае, каждая такая текущая проблемная ситуация

¹ Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 16-29-12839 офи_м, № 18-07-00025 а, № 16-07-00096 а

представляется формальным образом в виде мультиграфа $G_k = (V_k, E_k)$, часть вершин которого V_k помечается отклонениями фактических значений параметров состояния от заданных значений, а другая часть вершин определяется влияющими на них возмущающими факторами. В свою очередь множество ребер E_k графа G_k также разбивается на два подмножества. Элементы первого подмножества ребер помечаются отношениями между смежными вершинами, которые определяют характер взаимного влияния отклонений одного параметра состояния на другой. Элементы второго подмножества представляют собой отношения, которые характеризуют влияние возмущающих факторов на отклонения параметров состояния отдельного технологического оборудования, ТЦ_j и ТП в целом. Каждая полная ситуация включает соответствующее ей множество проблемных ситуаций и фактическое состояние системы управления.

2. Модели и инструментальные средства синтеза ТП в интеллектуальных САПР

В качестве моделей представления знаний в интеллектуальных САПР, необходимых для построения ТП, применяются нечеткие семантические сети, гиперграфы, сети Петри и другие средства, на которых строится логический вывод, определяющий содержимое технологических операций.

С учетом большой сложности задачи синтеза ТП, предлагается один из подходов организации интеллектуальной САПР ТП, базирующийся на построении многоуровневой модели ситуационного управления с нечеткой логикой представления и обработки знаний полученных экспертным путем. Первый уровень (нижний) данной модели предназначен для контроля и управления состоянием каждой отдельной технологической операции, входящей в структуру ТП.

Второй уровень служит для контроля и управления состоянием отдельных технологических цепочек, когда для нескольких входящих в них взаимосвязанных между собой технологических операций заданные режимы функционирования соответствующего им технологического оборудования отклонились от требуемого течения во времени и возникает необходимость одновременного устранения данных отклонений. Третий уровень предназначен для контроля и управления состоянием ТП в целом.

Одной из эффективных формальных моделей, удобных для сравнения ТП по шкале структурной близости, является их представление в виде нагруженных графов. Задача сравнения в этом случае сводится к задаче поиска изоморфизма.

Графы $G_1 = (V_1, E_1)$ и $G_2 = (V_2, E_2)$ называются изоморфными ($G_1 \cong G_2$), если между графами существует взаимно-однозначное отображение $\varphi: G_1 \leftrightarrow G_2 (V_1 \leftrightarrow V_2, E_1 \leftrightarrow E_2)$, которое сохраняет соответствие между ребрами (дугами) графов. Изоморфные графы различаются только обозначением вершин. Существует большое количество алгоритмов проверки изоморфизма, причем скорость алгоритма проверки изоморфизма зависит от формы задания графа (полагаем, что имеем графы без кратных дуг и циклов).

Одной из возможных моделей технологического процесса может служить сеть Петри [6,7], обладающая выразительными средствами отображения текущей информации и ситуации. На рисунке 1 представлена сеть Петри, описывающая медицинский технологический процесс (МТП) контроля и лечения.

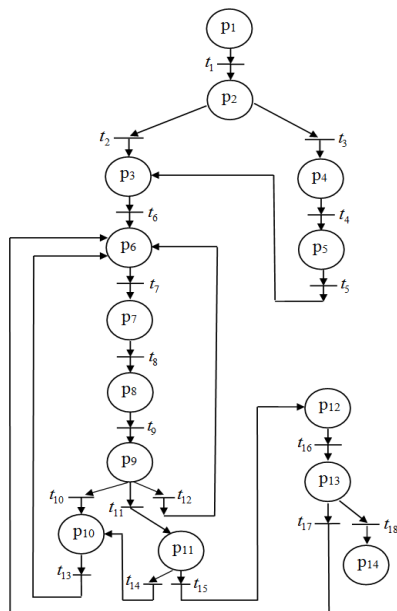


рис. 1 – Пример МТП в виде сети Петри

На рисунке 1 введены следующие обозначения: t_1 – оценка степени тяжести заболевания (легкая, средняя, тяжелая), t_2 – фиксация тяжелой или средней тяжести, t_3 – фиксация средней или легкой степени тяжести, t_4 – недельный период для точного определения степени тяжести; t_5 – повторное определение степени тяжести; t_6 – выбор терапии; t_7 – двухнедельное мониторингирование: карта клинических симптомов; t_8 – оценка эффективности назначенной терапии; t_9 – проверка динамики на положительность, пересмотр степени тяжести; t_{10} – отрицательная динамика или ее отсутствие: пересмотр степени тяжести; t_{11} – проверка: контроль астмы достигнут; t_{12} – динамика положи-

тельная переход на двухнедельное мониторинговое; t_{13} – усилить степень терапии; t_{14} – контроль не достигнут, принять решение; t_{15} – продолжение лечения три месяца; t_{16} – снижение степени тяжести; t_{17} – уменьшение терапии; t_{18} – завершение лечения.

Сеть Петри позволяет анализировать выполнение последовательно-параллельных операций и процессов, осуществлять проверку работоспособности алгоритмов и программ. С ее помощью можно исследовать работу как отдельных узлов или кустов технологического процесса, так и работу системы в целом, получить важную информацию о структуре и динамическом поведении моделируемой системы.

В случае сетей Петри решаются задачи построения графа достижимости и автоматического анализа его структуры с применением алгебраического подхода, сравнения различных реализаций ТП.

На основе двудольного графа сети и набора его инвариантов решается задача определения изоморфизма графов ТП, а на основе графа достижимости – задача выделения цепочек операций и определения эквивалентности ТП или их фрагментов. Так, например, на основе просмотра графа достижимости сети (рис.1) можно выписать примеры последовательностей операций, соответствующие возможным реализациям ТП.

$t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_9 \rightarrow t_{10} \rightarrow t_{13} \rightarrow t_6$ – заикливание процесса лечения,

$t_1 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4 \rightarrow t_5 \rightarrow t_6 \rightarrow t_6 \rightarrow t_7 \rightarrow t_8 \rightarrow t_9 \rightarrow t_{11} \rightarrow t_{15} \rightarrow t_{16} \rightarrow t_{18}$ – успешное лечение.

Подобные выделенные цепочки операций ТП уже можно сравнивать, используя различные шкалы и методы

В автоматическом синтезе структур вычислительных систем актуальным является решение двух задач теории расписаний: задачи построения эффективных алгоритмов оперативного планирования периодической обработки информации, минимизирующих среднее время однократного выполнения алгоритма или системы алгоритмов, и задачи оптимизации структуры специализированного вычислительного устройства, реализующего заданный алгоритм циклической обработки в соответствии с требуемым быстродействием и ограничениями.

Рассмотрим особенности представления знаний и обработки деталей в машиностроении [8,9]. В общем случае, для формального описания заготовок $s_i \in S_j$ относящихся к одному подклассу строится соответствующая ему семантическая сеть $G_j = (V_j, E_j)$, где V_j и E_j - соответственно множества ее вершин и ребер.

Каждая вершина $v_{kj} \in V_j, k = \overline{1, m_{2j}}$ в семантической сети G_j определяется k -й обрабатываемой поверхностью заготовок $s_i \in S_j$ и помечается формой этой поверхности, а также ее геометрическими размерами. Например, вершина $v_{kj} \in V_j$ определяется цилиндрической поверхностью, имеющей диаметр d_k и длину l_k . Таким образом, каждая вершина $v_{kj} \in V_j$ сети G_j , в свою очередь, фактически представляет собой помеченный звездообразный граф $G_k = (v_k, V_k, E_k)$, в котором:

v_k - базовая вершина или идентификатор графа G_k , который определяет геометрическую форму соответствующей ей обрабатываемой поверхности заготовок $s_i \in S_j$. Например, цилиндр, окружность, плоскость и т.д.;

V_k - упорядоченное множество вершин-слотов, ячейки которых заполняются размерами геометрических характеристик соответствующей им поверхности, поступивших на вход заготовок. Иными словами, конкретные значения размеров для заполнения данных слотов определяются информационно-измерительной системой путем замеров одноименных с ними геометрических размеров обрабатываемых поверхностей заготовок $s_i \in S_j$;

E_k - ребра, помечаются формой, размерами и другими характеристиками обрабатываемой поверхности, например, длина, ширина, диаметр и т.д.

Ребра в семантической сети определяются отношениями пространства состояний, которые выполняются между различными смежными поверхностями обрабатываемых заготовок $s_i \in S_j$.

Для автоматического проектирования ТМ в машиностроении рассмотрим решение задачи изготовления двухступенчатого вала из цельного круглого проката. Исходные данные и целевые задачи представлены на рисунке 2.

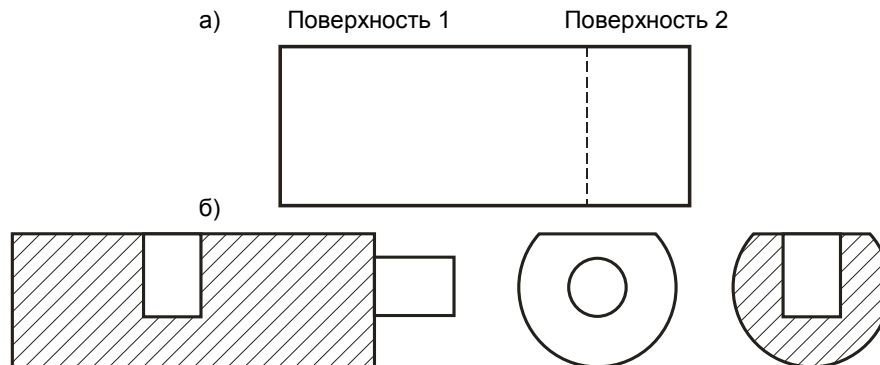


рис. 2 - Внешний вид заготовки и изготавливаемого из нее двухступенчатого вала

Отметим, что в семантической сети описывающей изготавливаемую деталь, чтобы не загромождать рисунок, опущены параметры обработки поверхностей 1 и 2 (точность и чистота их обработки), т.к. их значения не влияют на ход решения поставленной задачи.

1. На первом шаге решения данной задачи создается формальное описание заготовки и вала в виде семантических сетей представленных, соответственно на рисунке 3 и рисунке 4.

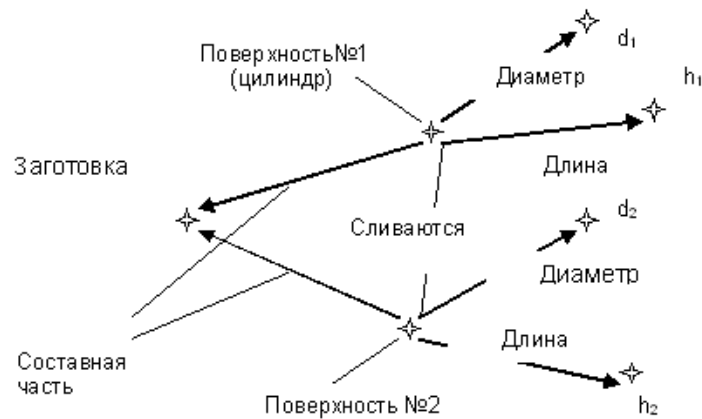


рис. 3 - Семантическая сеть, описывающая заготовку

Следует отметить, что далее в процессе решения поставленной задачи не рассматриваются вопросы, связанные с проектированием технологических операций, т.к. они не относятся к проблеме, исследуемой в настоящей работе.



рис. 4 – Семантическая сеть, описывающая двухступенчатый вал

2. Выявляются обрабатываемые в заготовке поверхности и имеющиеся у данных поверхностей различия с одноименными поверхностями изготавливаемого двухступенчатого вала.

3. Из базы знаний выбираются и заносятся в решатель задач фреймы технологических операций, необходимые для обработки заготовки и изготовления заданного двухступенчатого вала.

4. Определяется порядок обработки поверхностей в имеющейся заготовке на основе анализа характера выполняемых над ними технологическими операциями.

5. Решателем задач устанавливается порядок выполнения технологических операций в проектируемом технологическом маршруте. Для этого используются эвристические правила его построения при изготовлении многоступенчатых валов.

6. Формируется окончательный технологический маршрут механической обработки заготовки для изготовления из нее двухступенчатого вала.

Помимо синтеза технологических процессов в медицине и машиностроении авторами рассматривались модели и задачи синтеза технологических процессов в виде оптимальных периодических расписаний работы различных многофазных вычислительных устройств и производственных процессов. Актуальность решения задач планирования периодических расписаний требует дополнения существующих постановок за счет анализа новых методов и подходов с учетом современных тенденций развития вычислительной техники и требований прикладных областей. Разработанная авторами сквозная технология включает автоматическое построение периодических расписаний для систем локальных алгоритмов и технологию автоматического проектирования структур геометрических процессоров периодической обработки [10,11]. В рамках этого направления решены задачи оптимального назначения исполнительных блоков на фазы ТП и выбора оптимальной структуры устройств управления коммутацией. Методы автоматического оптимизационного синтеза расписаний и бортовых вычислительных устройств важны для организации информационно-вычислительной и интеллектуальной поддержки автономного режима функционирования беспилотных летательных аппаратов. Для автоматизации процессов оптимизационного перехода от структур алгоритмов периодической обработки информации к структурам процессоров разработано специализированное программное обеспечение [12], входящее в состав интерактивной системы проектирования и в состав универсального программного комплекса разработки отказоустойчивых конвейерно-параллельных систем, функционирующих в распределенной вычислительной среде в условиях помех.

Заключение

Предложенные модели представления знаний могут быть применены в задачах синтеза технологических процессов и технологических маршрутов, состоящих из последовательности операций. При этом охватываемыми областями автоматического синтеза являются медицинские, машиностроительные, вычислительные и другие ТП.

Модели представления медицинских технологических процессов на основе сетей Петри позволяют проводить корректное сравнение графовых представлений и осуществлять выбор оптимизированных технологических маршрутов.

Предложенные модели представления процедурных знаний технологических маршрутов в машиностроении позволяет упорядочить последовательность обработки различных поверхностей заготовок и реализуемых технологических операций и, таким образом, автоматически спроектировать необходимый ТМ для изготовления заданных деталей. Разработанные процедуры обработки знаний обеспечивают возможность эффективным образом автоматически строить ТМ сложных технологических процессов механической обработки заготовок для изготовления различных деталей машиностроения и на этой основе автоматизировать на высоком уровне процесс их проектирования.

Методы построения оптимизированных расписаний работы на основе графовых и теоретико-множественных моделей позволяют в конечном итоге строить оптимизированные вычислительные структуры, ориентированные на различные виды параллелизма.

Дальнейшее развитие предложенного подхода, связанного с построением систем автоматического проектирования ТП, заключается в разработке процедур автоматического синтеза технологических маршрутов и процессов на основе анализа вида и характеристик различий между эталонными и проектируемыми или изготавливаемыми объектами, реализующих принцип управления ТП по отклонению.

Литература

1. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами /Л.А. Растринин. – М.: Советское радио, 1980. – 232 с.
2. Ершов Е.В., Варфоломеев И.А., Богачев Д.В. Нейро-нечёткое управление многосвязными объектами в металлургии / Е.В. Ершов. – Saarbruecken (Germany): LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 169 с.
3. Трофимов В.В., Трофимова А.А. Методы принятия управленческих решений/ В.В. Трофимов. М.: Юрайт, 2013. – 336 с.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия, 2007. – 272 с.
5. Кравцова М. Проектирование технологических процессов машиностроительных производств. СПб.: Лань, 2014. – 384 с.
6. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. – 160 с.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. – 264 с.
8. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Интеллектуальная система автоматического проектирования технологических маршрутов обработки деталей в машиностроении. – Автоматизация в промышленности, №9, 2018, с.13-20.
9. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Управление технологическим процессом с нечеткой логикой обработки знаний. – Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, №5, 2018, с.1-7
10. Хачумов В.М., Хачумов М.В. Периодические и разрядно-параллельные алгоритмы обработки информации в составе бортовых вычислителей. – Авиакосмическое приборостроение, №3, 2018, с.13-21.
11. Хачумов В.М., Хачумов М.В. Технология автоматического синтеза структур геометрических процессоров. – Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, №11, 2017, с.1-8.
12. Хачумов В.М., Хачумов М.В. Планирование максимального совмещения циклов периодической обработки информации в технологических процессах // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618710, дата приоритета: 13.06.2017, дата регистрации: 07.08.2017