

Модели представления и методы сравнения технологических процессов¹

В.М. Хачумов,
зав. лаб., д.т.н., проф., vmh48@mail.ru,
ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, РУДН, г. Москва,
М.В. Хачумов,
н.с., к.ф.-м.н., khmike@inbox.ru,
ФИЦ ИУ РАН, г. Москва,
А.О. Колесникова,
инж., k.aleksandra@inbox.ru,
ООО «РИТЕХ», г. Москва

Задача автоматического поиска аналогов в базах знаний/данных может быть решена путем корректного сопоставления вариантов технологических цепочек и процессов с привлечением подходов, получивших развитие в различных областях (медицина, образование, наука и техника). Рассмотрены вопросы формализации описания технологических процессов нечеткими растущими семантическими сетями и сетями Петри.

The task of automatic search of analogues in knowledge/data bases can be solved by correct matching of variants of technological chains and processes with the use of approaches developed in various fields (medicine, education, science and technology). The questions of formalization of technological processes description by fuzzy growing semantic networks and Petri nets are considered.

Введение

Многообразие технологических процессов (ТП) в различных прикладных областях и соответствующих требований к ним приводит к необходимости обобщения и систематизации имеющихся реализаций. Значимые исследования в этой области были выполнены под руководством д.т.н., проф. Е.И. Артамонова, предложившего достаточно универсальные формализованные методы синтеза информационно-вычислительных систем на основе локальных алгоритмов (ЛА) и локальных структур [1]. При построении ТП на основе знаний о прецедентах сначала проверяется наличие аналога в базе типовых и групповых ТП, а при его отсутствии – проводится синтез нового технологического процесса. Выделены три механизма формализации сравнения, являющихся универсальными при выполнении операций измерения расстояний между абстрактными процессами, а именно: шкала наименований (nominal scale) для не связанных между собой состояний (свойств) объекта; шкала времени (time scale), относящаяся к интервальным измерительным шкалам отношений и шкала значений (fuzzy-values scale) [2]. Важную роль здесь играет выбор модели представления процесса, которая определяет методы сравнения и поиска. Так, например, нечеткие растущие семантические сети (НРСС) позволяют описывать и сравнивать сложные многофакторные динамические процессы, выявлять отклонения и строить различные прогнозы возникновения аномальных ситуаций. Основные результаты в этой области получены д.т.н., проф. В.Б. Мелехиным [3,4]. В случае использования сетей Петри решаются задачи построения графа достижимости и анализа его структуры с применением алгебраического подхода [5]. На основе двудольного графа сети и набора его инвариантов решается задача определения изоморфизма графов, а на основе графа достижимости – задача выделения цепочек операций и определения эквивалентности ТП или их фрагментов. Предложенные модели и процедуры сравнения служат для автоматического выбора аналогов из баз прецедентов и решения задачи оценки величины отклонения прецедентов от эталонов.

1. Общая схема технологического процесса

Общая схема синтеза ТП и пример последовательности действий в задаче структурного синтеза специализированных устройств и систем на основе операций с локальными алгоритмами [1] представлены на рисунке 1.

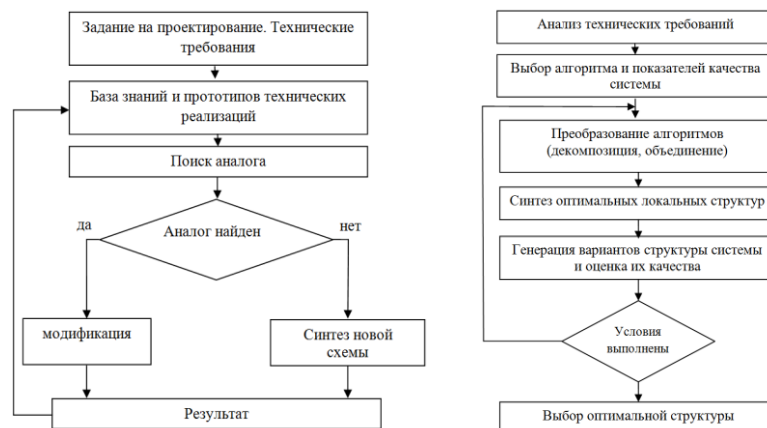


рис. 1 Общая схема синтеза технологических процессов и структурного синтеза информационных систем

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

В качестве примера рассмотрим вопросы автоматического проектирования геометрических процессоров (ГП) как вычислительных систем с конвейерной архитектурой, ориентированных на решение достаточно широкого круга задач машинной графики и управления. Архитектура геометрического процессора, построенного на множестве геометрических процессорных элементов (ГПЭ), представлена на рисунке 2. Здесь (x_i, y_i, z_i) - набор сигналов i -го ГПЭ. Геометрический процессор, реализующий заданную систему алгоритмов, может быть охарактеризован вектором параметров, отражающих степень соответствия устройству своему функциональному назначению. При решении задачи оптимального перехода от алгоритмов к структуре ГП можно ограничиться наиболее общими показателями качества, определяющими технико-экономические характеристики устройства, реализующего систему ЛА. К ним относятся сложность реализации, быстродействие и надежность [1]. Под показателем сложности реализации системы ЛА понимается общее количество ГПЭ, используемых в ГП для решения задачи. Под быстродействием понимается среднее время однократной реализации системы ЛА. Под показателем надежности – вероятность безотказной работы ГП при k -кратной реализации системы ЛА. Для автоматизации процессов оптимизационного перехода от структур алгоритмов периодической обработки информации к структурам геометрических процессоров разработано специализированное программное обеспечение (СПО) – программная среда, входящая в состав интерактивной системы автоматизированного проектирования «Графика-81» (<https://vuzlit.ru/336669/grafika>). Структура программной среды и способ ее подключения к САПР показаны на рис.2 и рис.3.

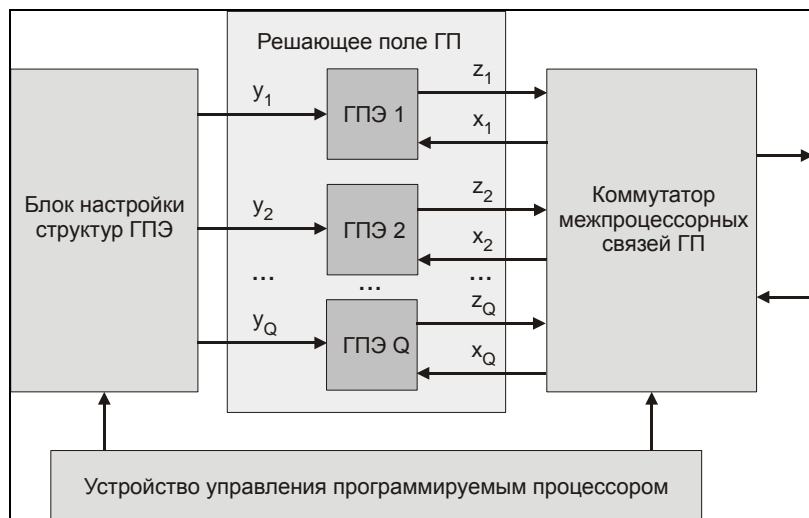


рис. 2 Архитектура геометрического процессора

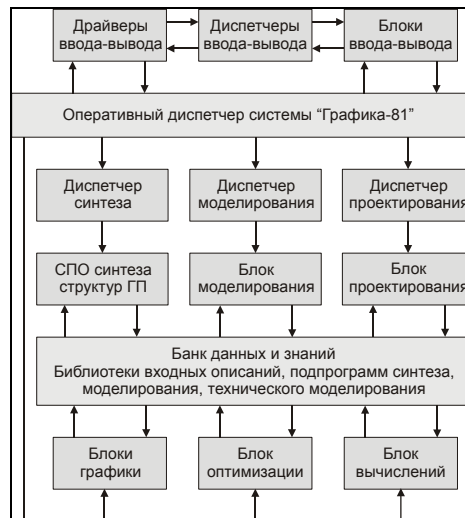


рис. 3 Подключение СПО к САПР

Основные программные модули системы автоматизированного проектирования (построены по технологии [1]):
 ALG1 – модуль максимального совмещения периодических расписаний при заданном способе закрепления геометрического процессорного элемента (ГПЭ) за фазами ЛА, вычисляет значения шагов совмещения, периода и среднего времени обработки ЛА.

ALG2 – модуль перебора всех возможных вариантов закрепления ГПЭ, использует следующие процедуры: TABL – процедура формирования таблицы вариантов независимого закрепления ГПЭ каждого типа за фазами ЛА или системы ЛА; PEREB – процедура формирования вариантов совместного закрепления ГПЭ за фазами алгоритмов; MIN1 – процедура поиска и отбора вариантов с минимальной суммарной мощностью сдвигов, которые поступают в модуль ALG1.

OPTIM – модуль оптимизации закрепления ГПЭ. После формирования таблицы вариантов с помощью TABL происходит переход к процедуре USL, которая сокращает таблицу вариантов на основе критерия минимума мощности сдвигов в пределах каждого столбца матрицы. Процедура METKA осуществляет разметку таблицы вариантов, на основании которой USL осуществляет дальнейшее сокращение таблицы вариантов. Процесс сокращения является итерационным и прекращается, когда в таблице остаются только несравнимые варианты. Далее управление передается процедуре PEREB и процесс протекает в установленном порядке.

ALG3 – модуль оптимизации циклической реализации системы ЛА, состоящей из двух алгоритмов. Для первого ЛА составляется сокращенная таблица вариантов с использованием процедуры TABL; а для второго составляется полная таблица. Далее подключается процедура PHASE, которая формулирует множество запрещенных сдвигов и передает полученные варианты на анализ в установленном порядке. Подключение СПО к системе «Графика-81» обеспечивает: использование имеющихся в ней библиотек процессоров различной степени интеграции, вывод и визуализацию графической информации на основных этапах проектирования, в том числе в виде блок-схем алгоритмов, структур специализированных вычислителей и диаграмм совмещения. СПО отвечает основным требованиям, предъявляемым к программному обеспечению САПР систем реального времени.

2. Последовательность действий в ТП структурного синтеза

Исходной информацией для проектирования специализированных информационно-вычислительных средств является техническое задание на их разработку, включающее требования и рекомендации на используемые типы исполнительных блоков и к характеристикам алгоритмов функционирования. Проектирование начинается с выбора показателя качества специализированной системы [1].

На первой стадии синтеза проводятся операции преобразования исходного алгоритма функционирования. Общий алгоритм разделяется на ЛА, затем производится последовательное объединение ЛА по сформулированным правилам. В результате проведения этих операций образуются различные варианты сочетаний локальных алгоритмов, для каждого из которых определяются его основные характеристики (показатели качества). Полученная инфор-

мация является исходной для последующих стадий проектирования структур. На второй стадии – осуществляется синтез локальных структур для каждого сформированного ЛА в соответствии с требуемыми показателями качества. Для каждого ЛА предусматривается построение структурного графа и определение числовых показателей качества отдельных блоков. Эти значения присваиваются соответствующим дугам структурного графа, после чего осуществляется поиск кратчайшего пути. Выбранные таким образом дуги определяют набор функциональных блоков структуры, оптимальной по выбранным критериям, и связи между блоками в полученном наборе. Вторая стадия заканчивается набором оптимальных локальных структур для всех, полученных ранее ЛА.

На третьей стадии выбирается структура всей специализированной системы. Вначале составляются варианты системы на основании найденных оптимальных структур. Далее для каждого варианта подсчитывается суммарное значение показателя качества.

Для сравнения различных вариантов технологических процессов может быть применен метод измерения расстояний между двумя иерархическими структурами с различными шкалами. Показано, что основой процедуры синтеза на основе подхода [1] служат алгоритмы поиска аналогов, декомпозиции и объединения алгоритмов, а также их оптимального покрытия имеющимися исполнительными блоками.

3. Особенности модели технологического процесса в виде НРСС

Основной операцией выбора наилучшего решения при использовании моделей НРСС является сравнение фактической семантической сети с эталонными моделями ТП, хранящимися в памяти интеллектуальной САПР [2]. Для этого должна быть определена операция оценки вложенного изоморфизма текущей модели и модели одного из эталонных динамических процессов, хранящихся в базе знаний. Пусть для сложного ТП определено множество допустимых ситуаций $S = \{s_{i1}(t)\}, i_1 = 1, 2, \dots, n$, которым априори, на основе накопленного опыта и экспертных данных, можно поставить в соответствие множество причин $P = \{p_{i2}(t)\}, i_2 = 1, 2, \dots, m_1$ возникновения отклонений и множество управлений $R = \{r_{i3}\}, i_3 = 1, 2, \dots, m_2$, позволяющих устранить отклонения путем преобразования текущей ситуации. Таким образом, между множеством ситуаций S и множеством управлений R устанавливается соответствие $D = S \times R$. В общем случае каждая текущая $s_{i1}(t) \in S$ и желаемая (целевая) $s_{i1}(u) \in S$ ситуации определяются, соответственно, кортежем текущих значений основных параметров $\langle a_1, a_2, \dots, a_d \rangle$ и кортежем $\langle a_1^*, a_2^*, \dots, a_d^* \rangle$ требуемых на данный момент времени значений данных параметров.

Пусть текущее целевое состояние технологического процесса определяется ситуацией $s_{i1}(u) \in S$, обобщенное описание которой представляет собой кортеж вида:

$$s_{i1}(u) = \langle \langle T_{i5}(j_{i1}), \mu(a_{i5}(u)) \rangle, i_5 = 1, 2, \dots, d \rangle,$$

где T_{i5} - упорядоченное множество словесных значений или термов $T_{i5}(j), j = 1, 2, \dots, 5$, характеризующих качественные значения параметра управления $a_{i5} \in A$ (например, для лингвистической переменной, определяющей нечетко заданные значения параметра управления $a_{i5} \in A$ - температура: T_{i5} = «очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая температура»);

- $\mu(a_{i5}(u))$ - степень принадлежности целевого значения параметра управления $a_{i5}(t)$ к интервалу численных значений терма $T_{i5}(j_{i1})$ в текущий момент времени, найденного по обобщенному описанию текущего целевого состояния технологического процесса.

Фактическое состояние технологического процесса в текущий момент времени определяется ситуацией $s_{i1}(t) \in S$, обобщенное описание которой представляет собой кортеж вида: $s_{i1}(t) = \langle \langle T_{i5}(j), \mu(a_{i5}(t)) \rangle, i_5 = 1, 2, \dots, d \rangle$, где $a_{i5}(t)$ -

значение i_5 -го параметра управления. Сама процедура сравнения текущего и эталонного ТП, представленных НРСС, подробно описана в работе [2] и в настоящей статье не рассматривается. Для прогнозирования аномальных ситуаций на различных стадиях выполнения процесса может выполняться операция оценки вложенного изоморфизма текущей динамической модели ОС и модели одного из эталонных динамических процессов, хранящихся в базе знаний.

4. Описание технологического процесса сетями Петри

Предлагается моделировать и сравнивать ТП с применением аппарата сетей Петри [5]. Сеть Петри это удобный инструмент для имитационного моделирования динамических систем, который позволяет анализировать выполнение последовательно-параллельных операций и процессов, осуществлять проверку работоспособности алгоритмов и программ. С помощью сетей Петри можно исследовать работу как отдельных узлов или кустов технологического процесса, так и работу комплекса в целом, получить важную информацию о структуре и динамическом поведении моделируемой системы. Задача проверки эквивалентности ТП, которые могут иметь разную структуру, требует установления взаимно-однозначного соответствия между состояниями моделирующих сетей в результате множества запусков последовательностей переходов.

Процедура перехода заключается в замене операторов алгоритма ТП соответствующими операторами сети Петри и их «склеивании» между собой по обрамляющим позициям. Рассмотрим пример перехода от блок-схемы алгоритма медицинского ТП диагностирования и лечения астмы к его модели в виде сети Петри. Технологический процесс антиастматической терапии показан на рисунке 4 [5].

Осуществим переход к сети Петри как имитационной модели ТП. Полученная сеть Петри, представленная на рисунке 5, визуально отображается графом, узлами которого служат позиции и переходы, связанные направленными

дугами, сеть снабжается одной фишкой, расположенной в начальной позиции. В соответствии с классификацией имеем сеть автоматного типа (state machine), у которой каждый переход имеет не более одного входа и не более одного выхода.

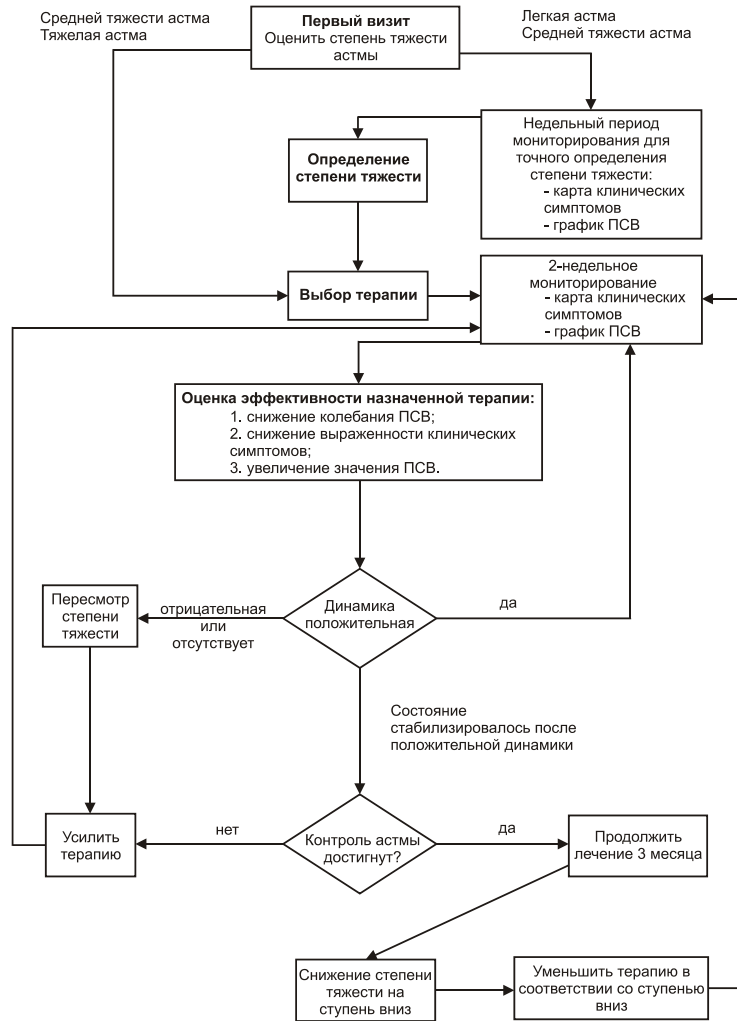


рис. 4 Блок-схема антиастматической терапии

Такие сети описывают последовательные процессы с ветвлением по условию. В нашем случае сеть является ограниченной и безопасной, т.к. в ней отсутствует возможность накопления меток, приводящих к очередям. Сеть может быть представлена двудольным графом, что позволяет применять известные механизмы выявления изоморфизма [2]. На рисунке 5 обозначено:

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 мониторинга для точного определения степени тяжести; основные действия: мониторинг, построение карты клинических симптомов и графика пиковой скорости выдоха (ПСВ); t_5 – повторное определение степени тяжести; t_6 – выбор терапии; t_7 – двухнедельный мониторинг: карта клинических симптомов, график ПСВ; t_8 – оценка эффективности назначенной терапии (характеристики: снижение колебаний ПСВ, снижение выраженности клинических симптомов, увеличение значения ПСВ); t_9 – проверка динамики на положительность, отрицательная динамика, пересмотр степени тяжести; t_{10} – отрицательная динамика или ее отсутствие: пересмотр степени тяжести; t_{11} – проверка: контроль астмы достигнут; t_{12} – динамика положительная переход на двухнедельное мониторинг; t_{13} – усилить степень терапии; t_{14} – контроль не достигнут, принять решение; t_{15} – продолжение лечения три месяца; t_{16} – снижение степени тяжести на единицу вниз; t_{17} – уменьшение терапии в соответствии со ступенью вниз; t_{18} – завершение лечения.

Сеть начинает работу после подачи фишки в позицию p_1 . Попадание фишки в позицию p_{14} означает окончание работы сети (окончание лечения).

Дадим формализованное описание сети Петри, моделирующей ТП:

$$P = \{p_1, \dots, p_{14}\}, T = \{t_1, \dots, t_{18}\}, \text{ начальная разметка: } M_0 = (1000000000000).$$

На каждом шаге работы для сети Петри строится вектор, содержащий информацию о количестве фишек в каждой позиции, который является кодом, определяющим состояние моделируемой системы. Таким образом, можно построить граф достижимых маркировок (состояний), представленный на рисунке 5.

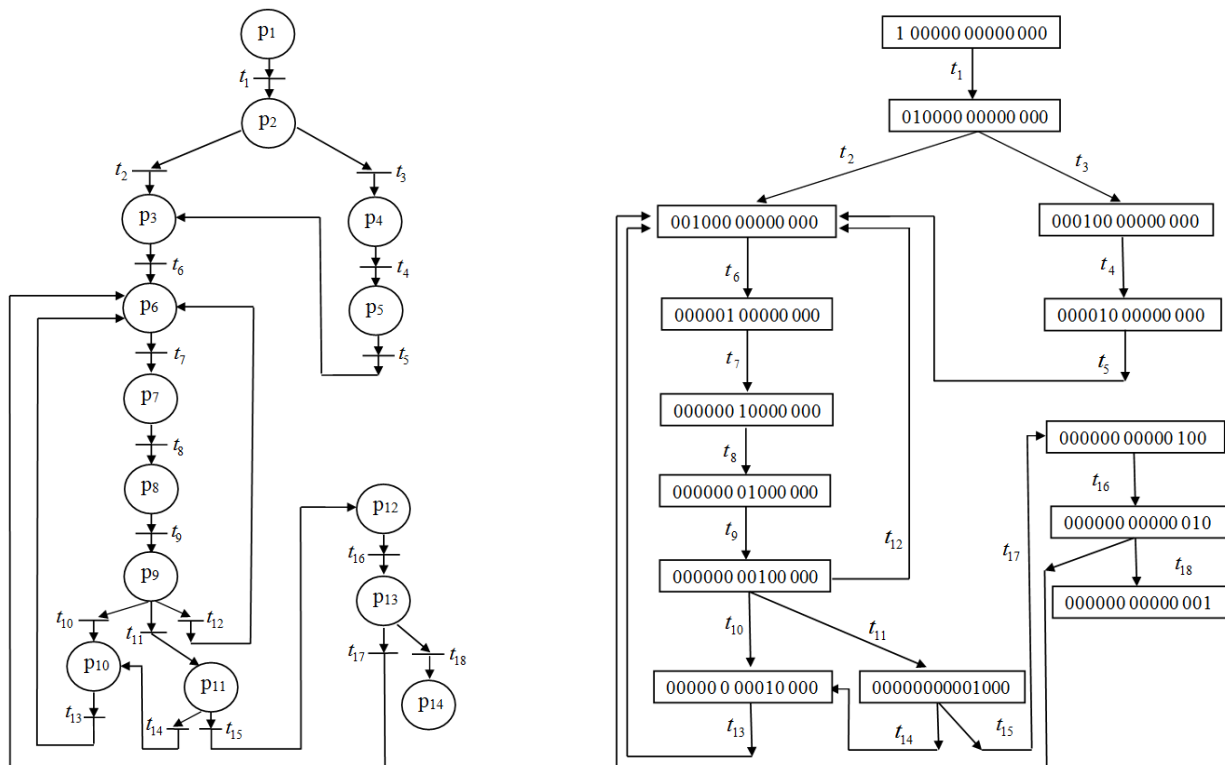


рис. 5 Моделирующая сеть Петри и граф достижимости

Описание сети Петри позволяет проводить формализованное исследование процессов выполнения ТП на основе алгебры матриц, в том числе изучать свойства моделируемого технологического процесса с применением методов теории графов. Формализация позволяет ввести шкалу близости результатов выполнения различных ТП для проверки степени их эквивалентности. Полное исследование представленной сети Петри как модели медицинского технологического процесса дано в работе [5].

Заключение

В статье дается описание возможных подходов к описанию технологических процессов и их сравнения при поиске аналога в базе знаний. Представлены некоторые модели технологических процессов и рассмотрен подход к решению задачи автоматического синтеза структур информационно-вычислительных систем на основе последовательного преобразования локальных алгоритмов. Показано, что на основе представленных формализмов возможно решение ряда важных практических задач, в том числе сравнения реализаций ТП в соответствии со способами их формализованного представления. Наибольшее внимание уделено универсальной модели описания ТП на основе сетей Петри, которые могут быть применены для сравнения различных вариантов технологических процессов, выделения в них общих технологических цепочек, выявления возможных коллизий. На основе двудольного графа сети и набора его инвариантов решается задача определения изоморфизма, а на основе графа достижимости – задача выделения цепочек операций и определения эквивалентности ТП или их фрагментов. Предложенные процедуры сравнения служат основными подходами к автоматическому выбору аналогов из баз прецедентов, решению задачи контроля хода выполнения ТП и оценки величины отклонений от эталонов. Рассмотренные подходы являются составными элементами более общей задачи автоматического синтеза технологических процессов, которая пока не имеет законченного решения.

Литература

1. Артамонов Е.И. Интерактивные системы. Синтез структур. М.: Инсвязьиздат, 2010. – 185 с.
2. Кочина Л.В., Латышев А.В., Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Методы автоматического поиска аналогов и генерации вариантов технических решений в интеллектуальных САПР // Авиакосмическое приборостроение, №5, 2017, с. 42-54
3. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Динамическая модель представления знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов. – Искусственный интеллект и принятие решений. – № 2, 2017, с.31-43.
4. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Модель ситуационного управления сложным технологическим процессом. – Приборы и системы. управление, контроль, диагностика, №5, 2017, с.25-30.
5. Агроник А.Ю., Кочина Л.В., Хачумов М.В. Имитационное моделирование и анализ технологических процессов сетями Петри. – Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2017, №4, с. 19-28.