

А. В. Латышев, В. А. Ромакин, В. М. Хачумов, М. В. Хачумов

Методы и модели автоматического синтеза технологических процессов, основанного на знаниях

Аннотация. Рассматриваются методы и модели автоматического построения оптимизированных технологических процессов в различных предметных областях, включая системы автоматизированного проектирования и управления. Наибольшее внимание уделено универсальным решениям синтеза, основанным на знаниях. Приведены примеры практического построения технологических процессов в области САПР вычислительных систем и системах управления беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова и фразы: автоматизированное проектирование, технологический процесс, технологическая цепочка, интеллектуальные системы, синтез процесса.

Введение

Задача автоматического синтеза технологических процессов (ТП) на основе универсальных инструментальных средств пока не нашла своего адекватного решения. Причиной является многообразие технологических процессов в различных прикладных областях и соответствующих требований, критериев и других особенностей. В настоящей работе предлагается обобщение и систематизация имеющихся подходов к построению ТП на основе базирующейся на знаниях интеллектуальной технологии. В самом общем представлении технологическая цепочка и технологический процесс являются результатом автоматического планирования (генерации) дискретных «действий», осуществляемых в соответствии с набором некоторых правил с учетом темпоральных аспектов предметных областей и баз знаний. Для генерации технологических цепочек (траекторий) будем использовать технику искусственного интеллекта в виде баз знаний, содержащих

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 16–29–12839–офи_м, № 15–07–00925–а.

- © А. В. Латышев⁽¹⁾ В. А. Ромакин⁽²⁾ В. М. Хачумов⁽³⁾ М. В. Хачумов⁽⁴⁾ 2016
- © Институт системного анализа РАН^(1, 4) 2016
- © Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН⁽²⁾ 2016
- © Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН⁽³⁾ 2016
- © Программные системы: теория и приложения, 2016

системы правил, которые являются основным способом синтеза планов. Правила, описывающие динамику поведения объекта, могут быть построены на основе циклограмм его работы, а также на основе знаний экспертов. Планирование позволяет создавать множество альтернативных вариантов, характеризуемых показателями качества, что является основой для выбора ТП, оптимизированных по заранее установленным критериям. Методы построения баз знаний, планирования и другие инструментальные средства, основанные на правилах, изложены в основополагающих работах [1–3]. В настоящей работе рассматриваются наиболее общие вопросы автоматического синтеза оптимизированных процессов в различных прикладных областях.

1. Общий подход к синтезу технологических цепочек, основанный на правилах

Не останавливаясь в деталях на теории динамических интеллектуальных систем, приведем только некоторые ее фрагменты [1–3], которые являются наиболее важными для всех рассмотренных методов и подходов автоматического синтеза в настоящей работе. Каждое дискретное «действие», приводящее к текущему состоянию технологического процесса, реализуется в форме правил «если... , то... , иначе... », полнота и непротиворечивость которых достигается на системах имитационного моделирования совместно с экспертами. Каждое правило имеет следующий вид: $P_i = \langle C_i, A_i, D_i \rangle$, где C_i — условие применения правила, A_i — множество высказываний (фактов), добавляемых в результате применения правила, D_i — множество высказываний (фактов), удаляемых в результате применения правила. C_i , A_i и D_i — есть множества атомарных формул некоторого языка L .

Вычислительный механизм технологического процесса состоит из множества правил, базы данных и некоторой стратегии выбора правил. В его основе лежит следующий недетерминированный процесс:

- (1) в соответствии со стратегией выбора правил выбрать некоторое правило P_i из множества правил;
- (2) проверить выполнимость C_i в текущем состоянии базы данных; если C_i выполнено, то подставить на места всех свободных переменных в формулы из C_i , A_i и D_i соответствующие значения параметров из базы данных; иначе перейти к п. 1;
- (3) применить правило, т.е. записать в базу данных те значения, на которых оказались выполненными формулы из A_i , и удалить

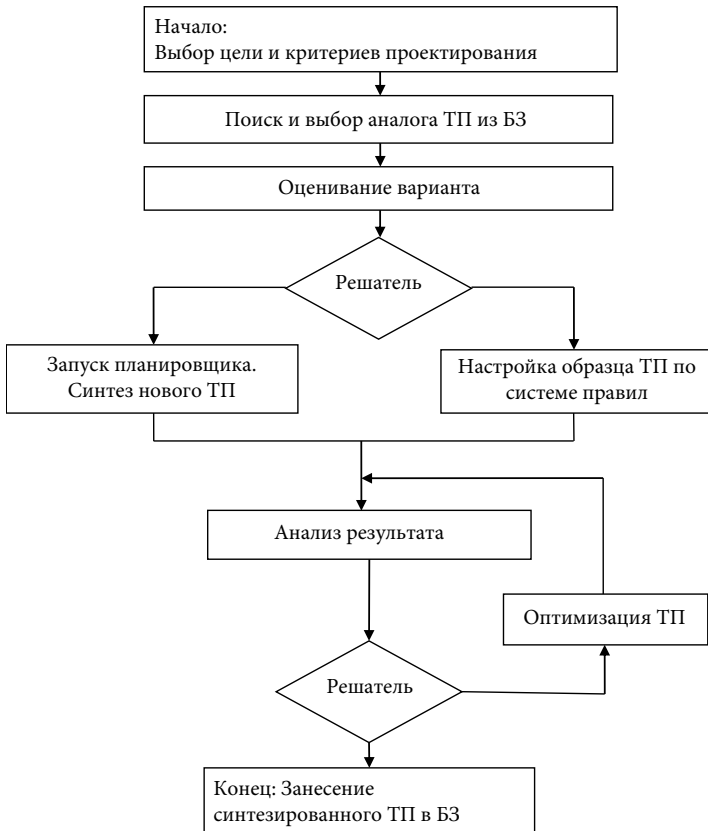


Рис. 1. Блок-схема синтеза ТП

из базы данных те значения, на которых оказались выполнены формулы из D_i ; перейти к п. 1.

В соответствии с [1–3] будем называть систему $S = \langle X, N, F, \Omega \rangle$ динамической системой, основанной на правилах, где X — множество состояний, N — множество отсчетов времени, F — функция состояний, Ω — функция переходов. Неподвижную точку уравнения $F(x) = x$ будем называть состоянием системы S . Процедуру переходов определим как $x'(t+1) = \Omega(x(t), t)$, $x(t+1) = F(\Omega(x(t), t))$. Тогда траектория системы — $\{F(\Omega(x(t), t)) \mid t \in N\}$.

В соответствии с предложениями настоящей работы «траектория» в различных прикладных областях определяет соответствующую тех-

нологическую цепочку (например, последовательность синтезированных алгоритмов, траекторию движения объекта, последовательность состояний распознающего автомата, этапы изготовления изделия и т.д.). ТП, в зависимости от предметной области, представляет собой конечную (возможно циклическую) последовательность «действий» (переходов, операций, этапов, работ, действий, перемещений и т.д.), направленных на достижение конечной цели. В более сложных случаях, когда достижение некоторой цели становится невозможным из-за изменения условий среды или исчерпания какого-либо ресурса, возникают задачи автономного выбора новой цели, формирования плана ее достижения и моделирования соответствующего поведения системы.

Общий процесс синтеза ТП представлен на рис. 1.

Важнейшим вопросом синтеза является оптимизация технологического процесса, для чего служит специальный инструмент — решатель. Планировщик задает для каждого состояния набор выполняемых операторов и передает информацию о текущем и желаемом последующем состоянии решателю. Кроме того, он запоминает весь ход решения задачи, предоставляя возможность возврата в любую точку разветвления процесса и выбор альтернативного состояния из заданного. Планировщик передает пару последовательных смежных состояний некоторого технологического процесса решателю и по результатам его работы осуществляет модификацию состояния в базе данных (изменение значений признаков (как количественных, так и качественных); появление новых и исчезновение старых признаков; появление новых и исчезновение старых патологических процессов). Он позволяет решить поставленную планировщиком задачу оптимального перехода из одного состояния к другому в соответствии с заданными показателями или заданными функциями качества. При этом происходит определение оптимальных значений признаков и функций, обеспечивающих такой переход. Технологический процесс является оптимальным, если он обеспечивает экстремум целевой функции при выполнении системы ограничений, отражающих условия протекания процесса, и требования, предъявляемые к нему. Для постановки задачи оптимизации необходимо сформировать математическую модель процесса, которая должна включать в себя критерии оптимальности, целевую функцию, систему ограничений, входные, выходные и внутренние параметры, управляемые (варьируемые) параметры.

Возможно использование различных критериев качества для оптимизации ТП:

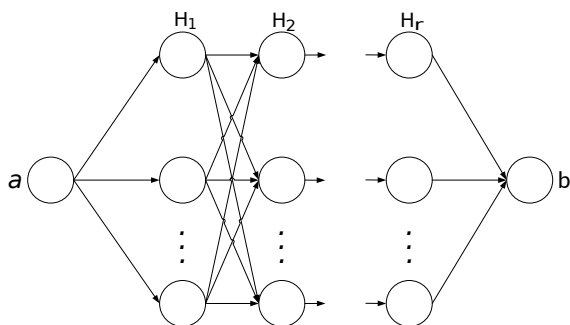


Рис. 2. Граф задачи синтеза ТП

- введение одного обобщенного показателя качества на базе заданных (нормализация, выбор весовых коэффициентов) и решение задачи однокритериальной оптимизации;
- ранжирование показателей качества и последовательное решение задачи многокритериальной оптимизации по методу последовательных уступок (оптимизация на каждом шаге только по одному критерию с переводом всех других критериев в разряд ограничений);
- использование всего множества критериев как равноценных и решение задачи многокритериальной оптимизации.

Отдельный класс технологических цепочек и процессов составляют многократно возобновляемые (циклические) процессы, для которых наиболее естественными являются периодические конвейерные расписания с совмещением циклов. Для этого класса ТП существуют эффективные алгоритмы оптимизации, ориентированные на составление расписаний с плотной упаковкой отдельных циклов, минимизирующие среднее время выполнения одного цикла ТП. С учетом эвристического критерия качества задача нахождения оптимизированного варианта закрепления специализированного оборудования исполнительных блоков (ИБ) за фазами выполнения ТП сводится к отысканию такого пути на ярусном орграфе (см. рис. 2), что $r(a, b) = \min |H_j(a, b)|$, где $H_j(a, b) = H_{1i_1} \cup \dots \cup H_{li_i}$; $j = 1, \dots, r$; $1 \leq i_k \leq r_k$. Здесь H_{ji} — запрещенное множество сдвигов фаз между одноименными приборами в ТП для i -го варианта закрепления ИБ за операциями j -го типа.

Основные положения технологии синтеза периодических ТП с совмещением циклов, основанной на эвристических критериях и правилах, достаточно подробно описаны в серии работ [4–6].

2. Автоматический синтез оптимизированных ТП в интеллектуальных САПР

В САПР ТП все большее применение приобретают интеллектуальные системы (ИСАПР). При этом структурный синтез реализуется с помощью экспертных систем [7], содержащих базу данных о проектируемом объекте; базу знаний, содержащую правила проектирования вариантов; интерпретатор, устанавливающий последовательность применения правил из базы знаний. В этом случае сама САПР представляет собой динамическую интеллектуальную систему с функциями генерации различных оптимизированных цепочек и процессов (вычислительных, информационных, производственных). Технологический процесс генерируется с помощью правил, хранящихся в базе знаний интеллектуальных систем. Предполагается, что в рамках нового подхода будут предложены средства, обеспечивающие генерацию оптимизированных технологических процессов.

Значительный вклад в теорию автоматического синтеза ТП внесли разработки ИПУ РАН (САПР «Графика–81–2D», «Графика–81–3D», «Графика–01–Т»), описанные в ряде трудов, среди которых отметим [8–10]. Здесь сделаны первые попытки автоматического синтеза ТП применительно к машиностроительным, радиоэлектронным, строительным и другим изделиям на основе работы с алгоритмами, сформулирована общая теория формального синтеза структур интерактивных систем. Основная идея синтеза структур заключалась в создании сетевой модели интерактивных систем на основе алгоритма функционирования и возможных взаимосвязей форматов данных с различными реализациями отдельных блоков, а также последующего формального выбора лучшей реализации в виде определения кратчайшего пути на сетевой модели.

Отличительными особенностями предлагаемого метода являются детальный учет используемых структур данных и обобщенных взаимосвязанных моделей проектируемых объектов применительно к программно реализованным системам. Метод основан на исследовании и модификации операций со структурами данных, создании и накоплении базы типовых реализаций. Предусматривается предварительное разделение (декомпозиция) алгоритмов функционирования систем на неделимые части, позволяющее понять принципы функционирования систем и найти лучшие варианты их структурной реализации. Такое

разделение алгоритмов используется как при анализе, так и при синтезе и приводит к построению законченного алгоритма как результата технологического процесса синтеза с наилучшими свойствами.

Алгоритм функционирования проектируемого устройства представляет собой взаимосвязь операций и операндов (объектов информации). При этом учитывается Θ — множество способов кодирования информации; Φ — множество форм внешнего представления; Δ — множество точностей представления. Назовем локальным алгоритмом цепочку последовательного выполнения операций над данными с одинаковым способом кодирования и точностью представления информации. Реализацию локального алгоритма назовем локальной структурой. Будем называть обобщенной моделью граф $G = G(V, E)$, где V — множество вершин, соответствующих различным структурам данных; E — множество (направленных) дуг с весами, равными качественным показателям реализации отдельных операций. Качественными показателями могут являться быстродействие, объем занимаемой оперативной или постоянной памяти компьютера, стоимость и т.п. Задачу поиска лучшей структуры проектируемой системы можно свести к нахождению кратчайшего пути на графе G .

Для генерации возможных вариантов структур проектируемого объекта применяются правила разбиения алгоритма функционирования на локальные алгоритмы и последующего объединения полученных локальных алгоритмов. Систему правил, закладываемых в базу знаний системы проектирования, можно представить следующим образом:

- первоначальное разделение алгоритма функционирования на локальные алгоритмы для их независимой реализации на отдельных функциональных блоках целесообразно проводить по критерию стоимости оборудования только при наличии разной точности и/или разных способов кодирования операндов;
- первоначальное разрезание алгоритма на операторы с независимыми рабочими участками памяти целесообразно по критерию затрат памяти только при наличии разных точностей и/или способов кодирования операндов и разным числе хранимых операндов в выделенных операторах;
- при объединении двух или нескольких локальных алгоритмов способы кодирования информации должны быть приведены к единой форме, обеспечивающей наилучшие показатели качества результирующего локального алгоритма; при объединении из пары

различных способов кодирования выбирается тот способ, который определен техническим заданием на проектирование системы (невозможно объединение двух локальных алгоритмов с заранее заданными в техническом задании различными способами кодирования информации);

- при объединении двух и более локальных алгоритмов с различными точностями представления информации δ_i точность представления данных в обобщенном алгоритме выбирается как $\delta = \min \delta_i$, $i = 1, \dots, n$, где n — число локальных алгоритмов.

Таким образом, технологическая цепочка проектирования информационной системы может состоять из следующих основных стадий:

- (1) по алгоритму функционирования получить модель в виде графа системы;
- (2) разделить обобщенную модель на локальные алгоритмы;
- (3) найти вариант программной реализации локальных алгоритмов;
- (4) подсчитать значения качественных показателей всей структуры системы;
- (5) произвести последовательное объединение локальных алгоритмов, если дальнейшее объединение невозможно, перейти к п. 6, иначе к п. 3;
- (6) подсчитать значения качественных показателей, выбрать лучший вариант.

Предложенный метод может быть применен для проектирования простых и сложных технологических процессов, программных и технических устройств. На рис. 3 показан пример систематизации вариантов программной реализации алгоритма сложения двух векторных изображений [9].

Данные представлены в следующих форматах: GERBER — (1), HPGL — (2), .dxf — (3), .plt — (4), STEP — (5). Сеть представляет возможные преобразования элементов множества Θ (на рисунке обозначены овалами) и реализации операций сложения. Операция сложения двух векторных изображений реализуется одним из пяти способов вводом данных $N(t)$ и $M(t)$. Допустим, что операнд $N(t)$ представлен в формате GERBER, $M(t)$ — в формате HPGL, результат $X(t)$ — в формате STEP. Тогда один из вариантов реализации (на рисунке выделен жирными линиями) будет состоять из программ преобразования $N(t)\{\text{GERBER}\}$ в $N(t)\{\text{dxf}\}$, $M(t)\{\text{HPGL}\}$ в $M(t)\{\text{dxf}\}$, сложения

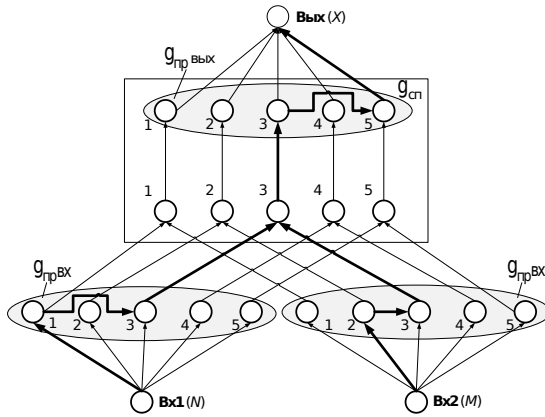


Рис. 3. Систематизация способов сложения двух векторных изображений

с использованием системы AutoCAD, на выходе которой образуется результат $X(t)\{.dxf\}$, и программы преобразования $X(t)\{.dxf\}$ в $X(t)\{STEP\}$.

Пример получения оптимизированной структурной организации программного обеспечения интерактивных средств 3D-систем геометрического моделирования приведен в работе [11]. Здесь задача сведена к поиску кратчайшего пути на обобщенной сетевой модели. В рассмотренных примерах проектирование ТП сложного изделия осуществлялось универсальным методом путем работы со структурами алгоритмов в соответствии с правилами, закладываемыми в базу знаний.

3. Синтез технологических цепочек в интеллектуальном управлении

Рассмотрим задачу синтеза технологической цепочки в виде последовательности команд управления. Общая схема интеллектуального управления сложным динамическим объектом может быть представлена так, как показано на рис. 4.

Блок планирования прогнозирует течение событий и параметры состояния модели на заданное число шагов вперед. Блок управления осуществляет изменение положения рычагов системы в принятой системе ограничений, в результате чего система переходит в новое



Рис. 4. Схема интеллектуального анализа и управления

состояние. Для функционирования модели нужна интегрированная база данных, содержащая данные телеметрии, текущие параметры модели, необходимые правила и т.д. В базе знаний хранятся производственные правила, задающие условия, при которых вырабатываются конкретные управления насосной станцией в соответствии с текущими целями и выработанным планом. Схема, представленная на рис. 4, генерирует технологическую цепочку управления объектом по принципу устранения отклонений в режиме стабилизации и по правилам, заложенным в базу знаний. Технологическая цепочка выполняется непрерывно, достигая и поддерживая глобальное целевое состояние.

Процедура управления основана на применении системы правил, являющихся основным способом синтеза и представления планов при использовании. По этому принципу могут быть построены многие системы управления. Рассмотрим, например, систему управления насосной станцией нефтегазового месторождения, построенную на основе интегрированной базы данных/знаний [12, 13]. Реализация механизма непрерывного управления станцией связана с выполнением следующей технологической цепочки действий:

- внешний запрос и установка целей (целеполагание), критериев и стратегий управления;

- обращение к базе знаний и сопряженной с ней базе данных;
- чтение текущих параметров из базы знаний и базы данных;
- выдача запроса на формирование актуального плана (последовательности правил выбора управления);
- получение плана (выполнение расчетов целевых функций, прогнозирование, планирование);
- обработка плана: подача расчетных и экспериментальных данных, сравнение текущей глобальной ситуации с расчетной, выдача запроса на поиск применимых правил и отношений (применимые правила — правила, условия которых выполнимы на текущем состоянии);
- сравнение текущей глобальной ситуации с расчетной;
- передача выбранного производственного правила на выполнение;
- синхронизация внутренних тактов системы с реальным временем;
- измерение параметров нового состояния (замыкание) и их запись в базу данных.

Схема интеллектуального управления насосной станцией имеет два контура управления, один из которых (внутренний) осуществляет управление оборотами (стабилизацией) вентильного двигателя погружного насоса (и его реверсом). Другой (внешний) контур, в соответствии со стратегией управления, реализует общее управление станцией с учетом состояния среды, в которую погружен насос. Существенную роль играет блок целеполагания, который задает глобальные цели управления станции (стратегический уровень). Предлагаются следующие стратегии управления:

- стратегия движения по точкам — строится как коррекция параметров движения по отклонению от заданной траектории; при этом должны быть пройдены все точки с минимальным отклонением по времени; этот принцип приемлем для управления и стабилизации работы (заданной частоты вращения) электродвигателя погружного насоса;
- стратегия достижения максимального или минимального значения целевого критерия (КПД, уровень давления) — применяется для управления работой станции в целом и опирается на знание модели среды.

Обе стратегии, в зависимости от стадии обработки траектории, могут выполняться последовательно или параллельно. Другие стратегии, число которых определяется количеством целей, также основываются на принципах обработки соответствующих конкретных

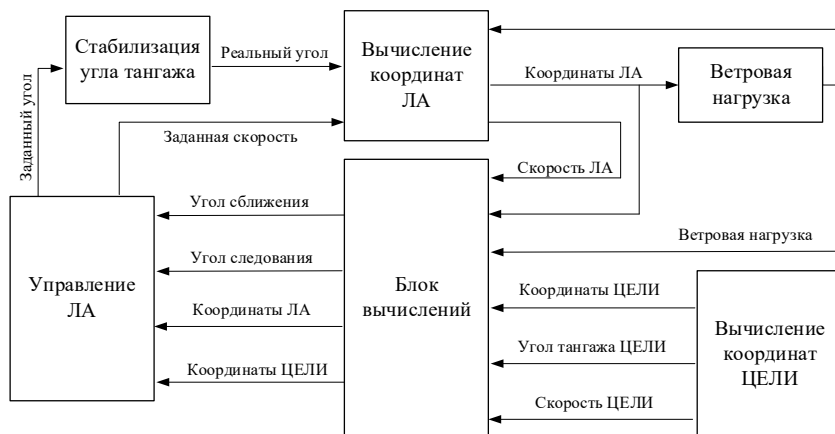


Рис. 5. Структурная схема моделирования следования ЛА за целью

траекторий. Записи в интегрированной базе данных/знаний должны описывать технологический процесс работы насосной станции со всеми регулируемыми, замеряемыми и вычисляемыми параметрами (фиксация значений должна осуществляться в моменты установления их средствами автоматики/внешнего управления или получения от датчиков). Отдельные записи в интегрированной базе данных/знаний, описывающие циклическую (периодическую) эксплуатацию скважины, должны содержать информацию о нескольких итерациях работы скважины. На новой итерации работы скважины создается запись в базе данных, содержащая, в том числе, информацию о предыдущих итерациях. Работа интеллектуальной системы в условиях динамичной внешней среды подразумевает своевременную реакцию на изменение параметров среды и учитывает наличие переходных процессов между состояниями. Это накладывает ограничения и на время функционирования механизмов анализа и измерения текущих параметров для своевременного обновления базы данных (замыкания).

Рассмотрим пример управления траекторным движением беспилотного летательного аппарата (ЛА), основанного на правилах [14, 15]. Задача заключается в следовании по траектории, заданной движением эталонной (идеальной) цели в условиях наличия помех в виде ветровой нагрузки. В соответствии с принципом разделения движения, без потери общности, решение рассматривается в плоскости тангажа.

Общая схема моделирования следования ЛА по маршруту с учетом ветровых нагрузок приведена на рис. 5.

Состояние системы задается в дискретные моменты времени вектором параметров: $v_p(t)$ — скорость ЛА; $v_{pr}(t)$ — реальная скорость аппарата с учетом ветровой нагрузки; $v_e(t)$ — скорость эталонной цели; $x_p(t)$, $y_p(t)$ — координаты ЛА; $x_e(t)$, $y_e(t)$ — координаты эталонной цели; $\beta(t)$ — текущий угол тангажа; $\alpha(t)$ — угол тангажа эталонной цели; $\beta'(t)$ — угол тангажа, необходимый для преследования цели с упреждением (рассчитывается на основе окружности Аполлония). Принято, что имеются две скорости, устанавливаемые рычагами управления, обычная $v_{p1}(t) = v_e(t)$ для следования за целью и повышенная $v_{p2}(t)$ для ее преследования.

Система управления следования ЛА по маршруту с применением эталонной цели реализована в блоке «Управление ЛА». На вход подаются координаты ЛА и цели, углы тангажа $\alpha(t)$ для следования за целью и $\beta'(t)$ для сближения с ней.

На вход блока «Стабилизация угла тангажа» подается угол, который должен отработать летательный аппарат с учетом случайного возмущения. На выходе блок выдает текущий угол тангажа ЛА.

Блок «Вычисление координат ЛА» выдает скорость и текущие значения координат на основе обработки данных бортовых средств машинного зрения.

Блок «Вычисление координат ЦЕЛИ» выдает координаты, угол эталонной траектории в текущий момент времени t .

На вход «Блока вычислений» подается скорость и координаты ЛА, координаты и угол эталонной траектории, ветровая нагрузка. Блок вычисляет угол тангажа для преследования эталонной траектории.

Система управления ЛА работает по следующим простым правилам:

- режим следования — если

$$\sqrt{(x_p(t) - x_e(t))^2 + (y_p(t) - y_e(t))^2} \leq \Delta,$$

где Δ — заданный порог, то установить $v_p(t) = v_e(t)$ и $\beta(t) = \alpha(t)$;

- режим упреждения — если

$$\sqrt{(x_p(t) - x_e(t))^2 + (y_p(t) - y_e(t))^2} > \Delta,$$

то установить $v_p(t) = v_{p2}(t)$, $\beta(t) = \beta'(t)$.

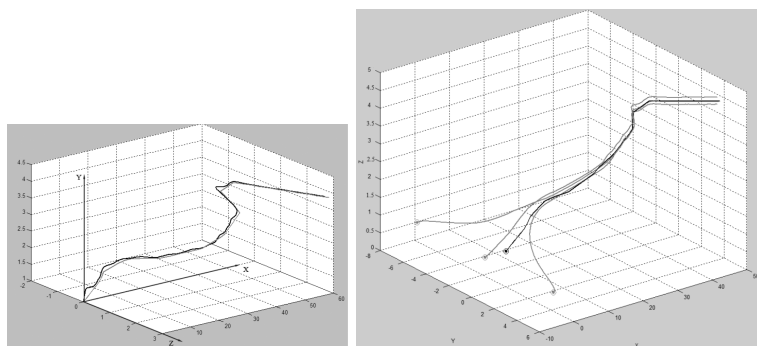


Рис. 6. Траектории одиночного и группового полета ЛА

Система позволяет выполнять прогнозирование (планирование) движения ЛА с применением искусственных нейронных сетей. Рассмотрим пример моделирования следования по маршруту ЛА без обязательной привязки к опорным точкам. Моделирование в условиях ветровой нагрузки осуществлялось с помощью программного обеспечения MATLAB и системы Simulink. На рис. 6 представлены результаты моделирования в виде траектории полета ЛА, в том числе с расширением на случай группового полета ЛА.

Подробное описание предложенного принципа интеллектуального управления с отображением генерируемых цепочек управления скоростью и углами ЛА для различных решенных задач можно найти в работах [5, 16, 17]. Заметим, что предложенная модель генерации траекторий и последовательности управлений позволяет управлять ЛА без знания ее точной математической модели.

Заключение

Выполненный анализ показал, что новое направление интеллектуальных САПР, основанное на процедурах работы с базами знаний, содержащими прецеденты-прототипы, пока еще не нашло единого подхода к построению оптимальных ТП в различных предметных областях. Представляет интерес подход, основанный на операциях с алгоритмами функционирования систем на основе правил, но он также требует дальнейшего развития. Показано, что универсальный подход к синтезу технологических процессов возможен с применением самых общих подходов, имеющихся в арсенале искусственного интеллекта. Проектирование сложных изделия осуществляется путем

генерации вариантов в соответствии с правилами, закладываемыми в базу знаний и критериями качества.

Список литературы

- [1] Г. С. Осипов. «Динамические интеллектуальные системы», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2008, №1, с. 47–54. ↑^{26,27}
- [2] Г. С. Осипов. *Методы искусственного интеллекта*, Физматлит, М., 2011, 296 с. ↑^{26,27}
- [3] Г. С. Осипов. *Лекции по искусственному интеллекту*, Либроком, М., 2013, 272 с. ↑^{26,27}
- [4] В. М. Хачумов. «Модели конвейерного медицинского технологического процесса», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2009, №3, с. 25–32. ↑²⁹
- [5] В. М. Хачумов. *Основные принципы моделирования сложных систем и процессов. Учебное пособие*, Изд-во Российского университета дружбы народов, М., 2013, 141 с. ↑^{29,38}
- [6] В. М. Хачумов. «Модель совмещения циклов обслуживания в медицинских технологических процессах», IX международная научно-практическая конференция «Wschodnie partnerstwo — 2013», 2013, с. 77–80, URL: http://www.rusnauka.com/26_WP_2013/Informatica/2_144243.doc.htm ↑²⁹
- [7] В. С. Семенов, В. П. Золотов. *Системы автоматизации проектных работ. Курс лекций*, Самарский государственный технический университет, Самара, 2012, 134 с. ↑³⁰
- [8] Е. И. Артамонов, В. М. Хачумов. *Синтез структур специальных средств машинной графики*, Институт проблем управления, М., 1991, 145 с. ↑³⁰
- [9] Е. И. Артамонов. *Интерактивные системы. Синтез структур*, Инсвязьиздат, М., 2010, 185 с. ↑^{30,32}
- [10] Е. И. Артамонов, А. В. Балабанов, В. А. Ромакин. «Программно-технические средства для реализации технологий быстрого прототипирования», *Информационные технологии в проектировании и производстве*, 2013, №1, с. 55–59. ↑³⁰
- [11] Е. И. Артамонов, А. В. Балабанов, С. Н. Григорьев, В. А. Ромакин. «Специализированные интерактивные системы в виртуальных производственных корпорациях», *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2012, №1, с. 69–75. ↑³³
- [12] В. Ф. Заднепровский, В. П. Фраленко, М. В. Хачумов. «Интеллектуальные технологии в управлении нефтяным месторождением», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2014, №4, с. 59–67. ↑³⁴

- [13] В. Ф. Заднепровский, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов. «Технологические решения в области интеллектуального управления нефтяными месторождениями», V научно-практическая конференция «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение», 2015, с. 104–107. ↑³⁴
- [14] Н. С. Абрамов, М. В. Хачумов. «Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели», *Авиакосмическое приборостроение*, 2013, №9, с. 9–22. ↑³⁶
- [15] М. В. Хачумов. «Задачи группового преследования цели в условиях возмущений», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2016, №2, с. 46–54. ↑³⁶
- [16] М. В. Хачумов. «Управление группой беспилотных летательных аппаратов, основанное на производственных правилах», IV научно-практическая конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики», 2014, с. 249–254. ↑³⁸
- [17] М. В. Хачумов. «Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2015, №2, с. 45–52. ↑³⁸

Рекомендовал к публикации

д.ф.-м.н. С. В. Знаменский

Пример ссылки на эту публикацию:

А. В. Латышев, В. А. Ромакин, В. М. Хачумов, М. В. Хачумов. «Методы и модели автоматического синтеза технологических процессов, основанного на знаниях», *Программные системы: теория и приложения*, 2016, 7:3(30), с. 25–43. URL: http://psta.psir.ru/read/psta2016_3_25-43.pdf

Об авторах:

Андрей Валерьевич Латышев



Окончил Московский авиационный институт в 1985 г., к.т.н. (2005). Старший научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, решение задач навигации и ориентации, анализ текстовой информации, методов оптимизации, теории построения алгоритмов машинной обработки естественного языка, интеллектуальных поисковых машин, искусственного интеллекта, интернет-систем.

e-mail:

andy_62@inbox.ru



Владимир Александрович Ромакин

Старший научный сотрудник ИПУ РАН. Окончил МГУ им. М.В.Ломоносова в 2003 году. Кандидат технических наук. Автор порядка 60 печатных работ. Область научных интересов: прикладная математика и информатика, системное программирование, вычислительная геометрия, CALS-технологии, геоинформатика.

e-mail:

vladimir-romakin@yandex.ru



Вячеслав Михайлович Хачумов

Окончил Ленинградский кораблестроительный институт в 1971 г., д.т.н. (1997). Зав. Лабораторией интеллектуального управления ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, зав. Лабораторией методов интеллектуального управления ИСА ФИЦ ИУ РАН, профессор Кафедры информационных технологий Российского университета дружбы народов, действительный член Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского.

e-mail:

vmh48@mail.ru



Михаил Вячеславович Хачумов

Окончил Российский Университет Дружбы Народов в 2009 г., к.ф.-м.н. (2012). Научный сотрудник ИСА ФИЦ ИУ РАН. Область научных интересов: искусственный интеллект, интеллектуальное управление, кластерный анализ слабоструктурированных данных, обработка изображений и распознавание образов. Автор более 50 научных работ.

e-mail:

khmike@inbox.ru

Andrey Latyshev, Vladimir Romakin, Vyacheslav Khachumov, Mikhail Khachumov. *Methods and models of automatic knowledge-based synthesis of technological processes.*

ABSTRACT. Methods and models of automatic construction of optimized technological processes in various subject areas, including computer-aided design and control systems are considered. The greatest attention is paid to universal solutions of knowledge-based synthesis. Examples of practical construction of the technological processes in the field of CAD computer systems and unmanned aerial vehicle control systems are given. (In Russian).

Key words and phrases: computer-aided design, technology process, process chain, intelligent systems, process synthesis.

References

- [1] G.S. Osipov. “Dynamic Intelligent Systems”, *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2008, no.1, pp. 47–54 (in Russian).
- [2] G.S. Osipov. *Methods of Artificial Intelligence*, Fizmatlit, M., 2011 (in Russian), 296 p.
- [3] G.S. Osipov. *Lectures on Artificial Intelligence*, Librokom, M., 2013 (in Russian), 272 p.
- [4] V.M. Khachumov. “Models of the Conveyor Medical Process”, *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2009, no.3, pp. 25–32 (in Russian).
- [5] V.M. Khachumov. *Basic Principles of Modeling of Complex Systems and Processes. Tutorial*, Publisher of the Russian Peoples’ Friendship University, M., 2013 (in Russian), 141 p.
- [6] V.M. Khachumov. “Model of Maintenance Cycles Combining in the Medical Processes”, IX mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Wschodnie partnerstwo” — 2013, 2013, pp. 77–80 (in Russian), URL: http://www.rusnauka.com/26_WP_2013/Informatica/2_144243.doc.htm
- [7] V.S. Semenov, V.P. Zolotov. *Automation systems for design work. Lecture course*, Samara State Technical University, Samara, 2012 (in Russian), 134 p.
- [8] E.I. Artamonov, V.M. Khachumov. *Synthesis of Structures of Computer Graphics Special Means*, Institute of Control Sciences, M., 1991 (in Russian), 145 p.
- [9] E.I. Artamonov. *Interactive Systems. Synthesis of Structures*, Insvjazizdat, M., 2010 (in Russian), 185 p.
- [10] E.I. Artamonov, A.V. Balabanov, V.A. Romakin. “Software Tools for the Realization of Rapid Prototyping Technology”, *Information Technologies in Design and Manufacturing*, 2013, no.1, pp. 55–59 (in Russian).
- [11] E.I. Artamonov, A.V. Balabanov, S.N. Grigoryev, V.A. Romakin. “Specialized Interactive Systems in Virtual Manufacturing Corporations”, *Information Technologies and Computer systems*, 2012, no.1, pp. 69–75 (in Russian).
- [12] V.F. Zadneprovskij, V.P. Fralenko, M.V. Khachumov. “Intelligent Technologies in the Management of Oilfield”, *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2014, no.4, pp. 59–67 (in Russian).

- [13] V. F. Zadneprovskij, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov. “Technological Solutions in the Field of Intelligent Control Oilfields”, V nauchno-prakticheskaja konferencija “Superkompjuternye tehnologii v neftegazovoj otrasli. Matematicheskie metody, programnoe i apparatnoe obespechenie”, 2015, pp. 104–107 (in Russian).
- [14] N. S. Abramov, M. V. Khachumov. “Air Route Simulation of Unmanned Aerial Vehicles as the Pursuit-evasion Problem”, *Aerospace instrument-making*, 2013, no.9, pp. 9–22 (in Russian).
- [15] M. V. Khachumov. “Problems of Group Pursuit of a Target in a Perturbed Environment”, *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2016, no.2, pp. 46–54 (in Russian).
- [16] M. V. Khachumov. “UAVs Group Management Based on Production Rules”, IV nauchno-prakticheskaja konferencija “Mezhdisciplinarnye issledovanija v oblasti matematicheskogo modelirovanija i informatiki”, 2014, pp. 249–254 (in Russian).
- [17] M. V. Khachumov. “The Solution of the Problem of the Target Following by the Autonomous Aircraft”, *Artificial Intelligence and Decision-making*, 2015, no.2, pp. 45–52 (in Russian).

Sample citation of this publication:

Andrey Latyshev, Vladimir Romakin, Vyacheslav Khachumov, Mikhail Khachumov. “Methods and models of automatic knowledge-based synthesis of technological processes”, *Program systems: theory and applications*, 2016, **7**:3(30), pp. 25–43. (In Russian).

URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2016_3_25-43.pdf