

УДК 519.876.5: 621.865.8

**А.Н. Горитов****Технология разработки аппаратно-программного комплекса АСУ ТП**

Рассматриваются базовые задачи, возникающие при проектировании и моделировании робототехнических систем, а также основные направления решения этих задач.

**Ключевые слова:** робототехника, синтез, анализ, управление.

Грандиозные технологические достижения XX в. стали возможны благодаря тому, что ученые и инженеры научились проводить математическое моделирование огромного числа физических и химических процессов. Активное применение математического моделирования, а в последние десятилетия – информационных технологий, преобразило нашу реальность.

Создание новых робототехнических систем (РТС) происходит при сокращении сроков, отводимых на их разработку. Одновременно увеличивается сложность проектируемых систем. Все это приводит к необходимости широкого применения информационных технологий в этом процессе.

Процесс использования информационных технологий может быть формализован следующим образом.

Будем считать, что исследуемый объект находится в трехмерном евклидовом пространстве  $R^3$ . Тогда подмножество  $R_C \subset R^3$ , на котором размещаются РТС, объекты манипулирования и различное оборудование, назовем рабочей средой. Пространство, в котором может находиться исполнительный механизм РТС или МС в процессе функционирования, назовем рабочим пространством РТС и МС:  $R_U \subseteq R_C$ . Пусть исполнительный механизм (ИМ)  $r$  РТС и состоит из множества звеньев  $r_i$ . Обозначим через  $R_t$  подмножество, занимаемое РТС в момент времени  $t$ . Для  $R_t$  справедливо условие  $R_t \subset R_C$ .

Во время выполнения операций объекты манипулирования могут перемещаться с помощью различных автоматических транспортных средств (транспортные роботы, конвейеры и т.д.).

Подмножество трехмерного пространства, занимаемое объектом манипулирования в момент времени  $t$ , будем обозначать  $M_t$ .

Оборудование, находящееся в рабочей среде, накладывает ограничения на свободу перемещения РТС, и рассматривается как препятствия при выполнении заданных операций. Пусть  $P_t \subset R_C$  – подмножество рабочей среды, занятое препятствиями в момент времени  $t$ , расположенными в рабочей среде.

Пространственное положение РТС и МС характеризуется набором значений обобщенных координат  $(q_1, \dots, q_N) \in Q$ , где  $N$  – количество звеньев исполнительного механизма УМС;  $Q$  – множество состояний РТС.

Можно выделить три основных направления использования информационных технологий в этой области – синтез, анализ и управления РТС.

**Синтез РТС.** Задача синтеза состоит в том, чтобы на основе заданного набора ограничений предложить проектировщику набор конструкций, удовлетворяющих заданным требованиям.

Пусть РТС состоит из  $m$  компонентов ( $k_i \in K$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ). Каждый компонент  $k_i$  обладает набором параметров  $p$ . Среди  $p$  параметров  $k_i$ -го компонента выделено подмножество параметров, значения которых могут выбираться из заданного множества фиксированных значений

$$k_i \in \{k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \dots, k_i^{(m)}\}$$

или диапазона значений

$$k_i^{(p_j \min)} \leq k_i^{(p_j)} \leq k_i^{(p_j \max)}, \quad (1)$$

где  $k_i^{(p_j)}$  –  $j$ -й параметр  $k_i$  компонента;  $k_i^{(p_j \min)}, k_i^{(p_j \max)}$  – минимальное и максимальное значение  $j$ -го параметра  $k_i$  компонента.

В общем случае задача синтеза механизма сводится к задаче отыскания таких параметров синтезируемого механизма, при которых выполняются принятые ограничения, а целевая функция имеет экстремальное значение.

Для синтеза пространственных механизмов, как правило, используется метод многопараметрической оптимизации. Одним из возможных методов решения, позволяющих значительно уменьшить число перебираемых вариантов, является использование агрегатно-модульного подхода. Синтез исполнительных механизмов управляемых механических систем агрегатно-модульного типа имеет следующие особенности [1]:

1. Синтезируемые механизмы являются пространственными механизмами.
2. Синтез механизмов выполняется на основе заданного множества модулей.
3. Ограничения, накладываемые на синтез механизма, кроме ограничений, накладываемых выполняемой технологической операции, включают ограничения внешней среды в виде препятствий в рабочей зоне РТС.
4. Знания носят часто эвристический и неопределенный характер и представляются в декларативной или процедурной форме.

Таким образом, задачу проектирования РТС можно решить или поиском готового прототипа по заданным значениям поисковых ключей, или синтезом структуры РТС по заданным характеристикам.

В первом случае поиск готового прототипа ведется по предварительно подготовленной базе данных РТС. Поиск выполняется по совокупности значений ключей:  $K: \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , для каждого из которых может быть установлен критерий поиска:  $k_i < k_i^{(j)}, k_i > k_i^{(j)}, k_i \leq k_i^{(j)}, k_i \geq k_i^{(j)}, k_i \neq k_i^{(j)}$ , где  $k_i$  – заданное значение  $k_i$  ключа,  $k_i^{(j)}$  –  $j$ -е значение  $k_i$  ключа.

Во втором случае решение задачи выполняется экспертной системой (ЭС) [2]. Достоинство применения ЭС заключается в возможности применения в уникальных ситуациях, для которых алгоритм заранее неизвестен и формируется по исходным данным в виде цепочки рассуждений из БЗ, причем в условиях неполноты, недостоверности, многозначности исходных данных. Экспертная система позволит быстро подобрать множество вариантов структуры РТС, удовлетворяющих заданным ограничениям.

Экспертная система проектирования РТС включает в себя: базу данных (БД), базу знаний (БЗ), интерфейс, машину вывода, правила задания неопределенности.

Одной из составляющей ЭС является база знаний (БЗ) – формализованное представление знаний, описание объектов предметной области и их взаимосвязей, действий над объектами, неопределенностей. С помощью механизма вывода из БЗ формирует конкретный алгоритм решения задачи. Для объектно-ориентированного представления знаний характерно применение механизма наследования атрибутов, когда знание атрибутов передается по иерархии от вышестоящих классов к нижестоящим.

Основными факторами, учитываемыми при синтезе РТС, являются выполняемая операция, количество и тип звеньев, грузоподъемность, точность позиционирования, типы приводов, зона обслуживания и т.д. Образами будут являться структуры данных из фактов в рабочей памяти, образцами – правила продукции.

Результатом работы экспертной системы является синтезированный исполнительный механизм, удовлетворяющий заданным ограничениям [3].

Зачастую для того чтобы проверить соответствие синтезированного варианта требованиям проектировщика, необходимо использовать методы математического моделирования.

**Анализ РТС.** Выполнение заданных операций с помощью РТС, как правило, связано с перемещением исполнительного звена РТС из начального положения в целевое.

Исполнительный механизм (ИМ) РТС является сложным динамическим объектом, который можно характеризовать как многомерный с взаимосвязанными переменными, нелинейный и нестационарный. Динамика исполнительного механизма может быть описана в относительных координатах векторно-матричным уравнением

$$A(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{W}. \quad (2)$$

Здесь  $A(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$  – векторная функция сил инерции, пропорциональных ускорению;  $A(\mathbf{q})$  – симметричная  $n \times n$  матрица, описывающая инерционные свойства системы,  $n$  – число ее степеней

подвижности;  $\mathbf{b}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$  –  $n$ -мерный вектор скоростных сил: центробежных, кориолисовых, трения и потерь в сочленениях, зависящих от скорости;  $\mathbf{c}(\mathbf{q})$  –  $n$ -мерный вектор сил тяжести;  $\mathbf{W}$  – вектор сил, действующих по  $n$  степеням подвижности исполнительного механизма [4].

Анализ кинематических и динамических характеристик, в зависимости от постановки задачи, сводится к решению либо прямой, либо обратной задачи кинематики или динамики.

Анализ РТС включает в себя кроме классических задач расчета кинематических и динамических характеристик РТС также задачи:

- 1) планирования траектории перемещения исполнительного звена РТС [5];
- 2) определения соударений между звеньями РТС и столкновения с объектами внешней среды [6];
- 3) синтеза законов управления приводами и т.д.

**Управление РТС.** Функционирование исполнительного механизма осуществляется на основе некоторого допустимого управления  $\mathbf{u}(t)$ , переводящего исполнительный механизм РТС из начального положения в целевое. Требуется, среди всех допустимых управлений  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ , переводящих исполнительный механизм из начального положения в целевое (если такие управления существуют), найти такое, для которых функционал

$$\mathbf{J} = \int_{t_0}^{t_1} f(\mathbf{q}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (3)$$

принимает наименьшее возможное значение при выполнении физических, геометрических и информационных ограничений:

- 1) непересекаемость звеньев ИМ  $r_i$  друг с другом в процессе движения:

$$\forall r_i \in R_t \text{ и } \forall r_j \in R_t, \rho(r_i, r_j) \geq \varepsilon_g, \quad (4)$$

где  $\rho(x, y)$  – расстояние между  $x$  и  $y$ ,  $\varepsilon_g$  – заданная геометрическая точность;

- 2) отсутствие столкновений ИМ с внешними препятствиями:

$$\forall r \in R_t \text{ и } \forall p \in P_t, \rho(r, p) \geq \varepsilon_g; \quad (5)$$

- 3) отсутствие столкновений с объектами манипулирования:

$$\forall r \in R_t \text{ и } \forall m \in M_t, \rho(r, m) \geq \varepsilon_g; \quad (6)$$

4) отсутствие столкновений объектов манипулирования с препятствиями (технологическим оборудованием):

$$\forall p \in P_t \text{ и } \forall m \in M_t, \rho(p, m) \geq \varepsilon_g; \quad (7)$$

- 5) целевая точка должна принадлежать рабочему пространству УМС:

$$T_c \in R_u, \quad (8)$$

где  $T_c$  – целевая точка;

- 6) перемещения, скорости и ускорения в кинематических парах не выходят за граничные значения:

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}, \quad (9)$$

$$\dot{q}_{i \min} \leq \dot{q}_i \leq \dot{q}_{i \max}, \quad (10)$$

$$\ddot{q}_{i \min} \leq \ddot{q}_i \leq \ddot{q}_{i \max}, \quad (11)$$

где  $q_i$  – обобщенная переменная  $i$ -го звена;  $q_{i \min}$ ,  $q_{i \max}$  – граничные значения изменения обобщенной переменной  $q_i$  ( $i = 1, \dots, N$ );  $N$  – количество звеньев манипулятора;  $\dot{q}_i$  – скорость перемещения  $i$ -го звена;  $\dot{q}_{i \min}$ ,  $\dot{q}_{i \max}$  – граничные значения изменения скорости  $i$ -го звена;  $\ddot{q}_i$  – ускорение перемещения  $i$ -го звена;  $\ddot{q}_{i \min}$ ,  $\ddot{q}_{i \max}$  – граничные значения изменения ускорения  $i$ -го звена.

Информационные ограничения обусловлены полным или частичным отсутствием информации о внешней среде. В связи с этим необходимо различать три возможные постановки задачи построения плана траектории перемещения исполнительного звена РТС:

- 1) рабочая среда без препятствий;
- 2) рабочая среда с частично известным расположением препятствий;
- 3) рабочая среда с неизвестным расположением препятствий.

В первом случае планирование траектории выполняется с учетом физических и кинематических ограничений (4)–(6), (8)–(11). Во втором и третьем случаях планирование траектории выполняется в условиях неполной (или полностью отсутствующей) информации о рабочей среде РТС. Информация о рабочей среде пополняется в процессе выполнения технологической операции. Для сбора информации о местоположении препятствий используются различные типы датчиков – так-

тильные, локационные, силомоментные и т.д. Данная задача решается с учетом физических, кинематических и геометрических ограничений (4)–(11).

Неполнота информации включает незнание точных значений всех необходимых характеристик исполнительного механизма РТС, таких как размеры, массы звеньев, моменты инерции и т.д.

Задачи синтеза законов управления приводами РТС, а также моделирования функционирования РТС при выполнении заданной операции являются эффективным способом исследования алгоритмов управления реальной РТС. Этот подход позволяет отработать на модели выполнение требуемой операции при заданной внешней среде [7]. Затем, на основании синтезированных законов управления, подготовить программу работы РТС при выполнении требуемой операции. Такая технология значительно снижает время простоя РТС при перепрограммировании, позволяет избежать поломок оборудования, которые могут произойти при неправильно поданных командах оператором, оптимизировать работу РТС по заданным критериям, синхронизировать работу взаимодействующих устройств.

#### **Заключение**

В статье предлагается формальное описание основных задач, связанных с проектированием, моделированием и управлением РТС. Реализация этих задач позволит значительно снизить время проектирования РТС, оптимизировать функционирование эксплуатируемых РТС за счет оптимизации алгоритмов управления на моделях РТС и сократить время простоя РТС при смене технологического процесса за счет применения off-line программирования РТС.

#### *Литература*

1. Горитов А.Н. Синтез и анализ агрегатно-модульных управляемых механических систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 10. – С. 10–14.
2. Змитрович А.И. Интеллектуальные информационные системы. – Минск: ТетраСистемс, 1997. – 368 с.
3. Горитов А.Н. Синтез управляемых механических устройств с применением экспертной системы / А.Н. Горитов, И.В. Колотаев // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 1(19), ч. 1. – С. 72–76.
4. Юревич Е.И. Основы робототехники. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
5. Горитов А.Н. Построение плана траектории промышленного робота в условиях неполной информации о внешней среде // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 10. – С. 25–29.
6. Горитов А.Н. Определение столкновений в задаче математического моделирования управляемых механических систем / А.Н. Горитов, С.М. Алферов // Информационные системы и мониторинг окружающей среды. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – Вып. 2. – С. 99–105.
7. Горитов А.Н. Программирование промышленных роботов // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 1(19), ч. 1. – С. 61–64.

---

#### **Горитов Александр Николаевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

Goritov A.N.

#### **Technology of hardware and software development of control system**

The article covers the basic tasks of the design and simulation of robotic systems. There are given basic directions for solving these problems.

**Keywords:** robotics, synthesis, analysis and control.