

А. Н. Горитов, д-р техн. наук, проф., ang@asu.tusur.ru,
Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Алгоритм синтеза промышленных роботов на основе заданного набора модулей

Рассматривается метод синтеза промышленных роботов, ориентированных на выполнение заданной технологической операции. Синтез выполняется на основе типового ряда унифицированных модулей, параметров выполняемой операции и параметров рабочей среды, в которой предполагается функционирование синтезированного робота. Рассмотрен алгоритм автоматизированного синтеза роботов на основе агрегатно-модульного метода построения роботов.

Ключевые слова: промышленные роботы, агрегаты, модули, синтез

Введение

Одним из перспективных направлений развития робототехники является агрегатно-модульный метод построения промышленных роботов (ПР) [1, 2]. Преимуществом этого метода является значительное сокращение времени на разработку и выпуск роботов по сравнению с традиционным подходом [3–5]. Кроме того, для агрегатно-модульных роботов повышается ремонтпригодность, а наличие модулей с различными энергомассогабаритными характеристиками позволяет получать роботы, имеющие различную стоимость и требующие различные эксплуатационные затраты.

Положительным фактором агрегатно-модульного подхода к построению роботов является тот факт, что становится возможным формализовать процесс проектирования робота. В связи с этим одной из актуальных задач является разработка методов и алгоритмов синтеза и анализа ПР на основе агрегатно-модульного подхода.

В работах [1, 6] рассмотрены общие алгоритмы синтеза и анализа агрегатно-модульных ПР. Базовой процедурой автоматизированного синтеза ПР является формирование структуры ПР. С помощью этого алгоритма разрабатываются различные варианты компоновки робота, которые должны обеспечить выполнение заданной технологической операции ПР. В общем случае этот алгоритм формирует множество вариантов проектируемого робота, которые будут анализироваться на последующих этапах. В работе предлагается рекурсивный алгоритм синтеза структуры роботов-манипуляторов при построении робота на основе агрегатно-модульного подхода. Вычислительная сложность предложенного алгоритма оценивается произведением числа звеньев робота на число различных типов модулей, используемых при синтезе роботов.

Решение задачи

Синтез робота, предназначенного для выполнения заданной операции, можно выполнить путем проектирования всех возможных вариантов роботов из заданного набора модулей и агрегатов с последующим анализом каждого из них. Такой подход

позволяет выбрать конструкцию робота, наиболее подходящую для выполнения заданной технологической операции, но требует больших ресурсных затрат. Так, синтез m -звенного робота с использованием n различных типов модулей без ограничений на соединение звеньев приведет к необходимости проанализировать $n(n-1)(n-2)\dots(n-m-1) = n! - m!$ вариантов. Наличие ограничений на типы используемых звеньев и приводов позволит сократить число рассматриваемых вариантов синтезируемого робота. Тем не менее, число вариантов, которые потребуются проанализировать, остается достаточно большим.

Сокращения ресурсных требований можно добиться путем использования методов, обеспечивающих исключение из рассмотрения вариантов, заведомо не удовлетворяющих заданным техническим требованиям, путем формирования набора правил, которые определяют условия, при которых допускается соединение модулей друг с другом.

Для описания предложенного метода ограничения одним классом синтезируемых роботов. Пусть синтезируемые роботы относятся к классу роботов-манипуляторов с разомкнутой кинематической цепью.

Рассмотрим алгоритм синтеза. Алгоритм основан на последовательном переборе модулей из числа доступных и контроле на соответствие синтезируемого робота техническому заданию.

Алгоритм СИНТЕЗ

Вход:

- техническое задание, содержащее технические характеристики требуемого робота;
- ограничения на синтезируемый вариант робота — число звеньев, типы кинематических узлов, особенности стыковки звеньев и т.д.;
- множество компонентов, которые могут использоваться при синтезе робота.

Выход:

- синтезированный вариант робота, удовлетворяющий заданным условиям.

1. Из заданного множества модулей — основной выбрать первый неиспользуемый модуль. Отметить модуль как используемый.

2. Проверить ограничения на первый модуль робота. Если модуль не удовлетворяет ограничениям, заданным в технических требованиях, то отметить, что модуль нельзя использовать в качестве первого, и вернуться на первый шаг. Иначе перейти на шаг 3.

3. Из заданного множества модулей выбрать неиспользуемый модуль. Отметить, что этот модуль уже используется. Перейти на шаг 4.

4. Проверить ограничения на включение этого модуля в синтезируемый робот. Если модуль не удовлетворяет условиям технического задания, то отметить, что модуль нельзя использовать, и вернуться на шаг 3. В противном случае перейти на шаг 5.

5. Проверить, достигнуты ли заданные параметры синтезируемого устройства. Если да, то перейти на шаг 6. Иначе сформировать вектор доступных модулей для включения в синтезируемый робот на этой итерации и перейти на шаг 3.

6. Если по техническому заданию робот должен включать хват, то выбрать из множества схватов тот, который соответствует техническому заданию.

Конец алгоритма.

Описание алгоритма

Синтез по предложенному алгоритму предполагает, что все данные об используемом алгоритме занесены в таблицы. Предполагается использование четырех основных таблиц — с данными об основаниях робота, с данными о звеньях, с данными о кинематических узлах и с данными о схватах.

В процессе синтеза робота для каждого нового элемента робота эти таблицы позволяют сформировать множество модулей, которые могут быть установлены на месте этого элемента. Например, на месте кинематического узла вращения может быть установлен любой кинематический узел вращения, информация о котором есть в таблице с данными о кинематических узлах. С каждым элементом сформированного множества модулей связывается атрибут, который может принимать три значения: "не выбран", "выбран" и "выбрать нельзя".

Синтез робота начинается с выбора основания робота. Выбранное основание помечается как "выбранное". Если дальнейший анализ покажет, что выбранное основание не удовлетворяет техническому заданию, то среди не выбранных оснований выбирается новое основание, а текущее отмечается как "выбрать нельзя".

После успешного выбора основания выполняется проверка технического задания и затем выбирается звено или кинематический узел. Выбранное звено или кинематический узел в соответствующем списке помечается как "выбран". Если в процессе дальнейшего анализа будет установлено несоответствие выбранного элемента техническому заданию или каким-либо ограничениям, то параметр выбора заменяется на "выбрать нельзя", а среди невыбранных элементов выполняется поиск нового элемента.

Процесс синтеза заканчивается после достижения заданных значений параметров.

Анализ вычислительной сложности алгоритма

Алгоритм начинает синтез робота с выбора основания. Затем, перебирая модули, выбирает среди них те, которые удовлетворяют техническим условиям. Синтезируемый робот постепенно наращивается до ограничений, заданных в техническом задании. Сложность алгоритма в этом случае составляет mn , где m — число звеньев робота, а n — число различных типов модулей.

Формализованное описание структуры синтезированного робота

Формально структура синтезируемого манипулятора будет описываться следующим образом:

[COMPONENT],

где COMPONENT — это пара, состоящая из имени элемента и списка присоединенных к нему элементов. Эта пара представлена следующим образом:

(COMP_NAME, NEXT_COMPONENTS),

где COMP_NAME — имя элемента, NEXT_COMPONENTS — список присоединенных элементов к данному. Список имеет следующий вид:

[C1, C2, ...],

где C_i — пара компонент—список, как описано выше. Список может быть пуст.

Компонентное представление исследуемого объекта

Для математического описания исследуемого объекта воспользуемся методом компонентных цепей. Компонентная цепь синтезируемого робота-манипулятора в этом случае представляется в виде дерева. Корень дерева — это специальный компонент, связанный с неподвижной системой координат. Узлы дерева — это компоненты, задающие звенья и кинематические узлы робота. Ветви дерева являются направленными (рис. 1). Корень дерева обозначен 0, узлы дерева — C1, C2, C3, C4, C5.

Формализованное представление синтезируемого устройства легко отображается в компонент-

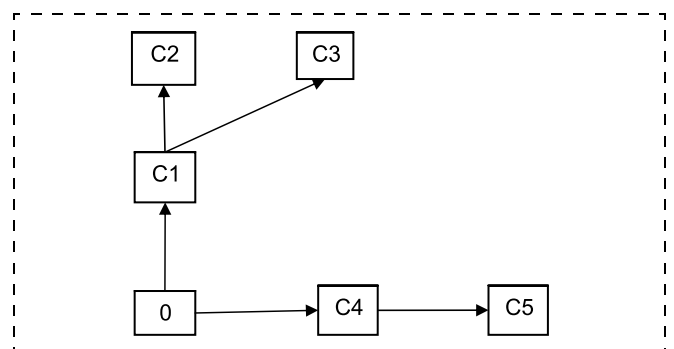


Рис. 1. Пример компонентной цепи

ное представление, которое в дальнейшем используется на этапе анализа синтезированного робота. Таким образом, компонентная цепь, представленная на рис. 1, в данном представлении будет выглядеть следующим образом:

$$\{(0, [(C1, [(C2, []), (C3, [])]), (C4, [(C5, [])])])\}$$

Здесь можно сделать следующие замечания:

1) компонент в начале цепи (начальный, первый компонент цепи) — компонент, который стоит в корне дерева;

2) компонент в конце цепи (конечный, последний компонент цепи) — компонент, который является листом дерева;

3) соседние компоненты в цепи — любые два компонента в любом пути от корня дерева к листьям, связанные одной ветвью (один такой путь для примера выделен на рис. 1, соседними в этом пути будут компоненты 0 и C1, C1 и C3).

Генерация компонентной цепи проводится с помощью алгоритма синтеза на основе информации о модулях и правилах их стыковки.

Исходные данные и ограничения

Исходные данные на проектирование робота берутся из технического задания. Минимальный набор требований, предъявляемых к проектируемому изделию, включает:

- число степеней подвижности;
- зону обслуживания робота;
- грузоподъемность;
- типы кинематических узлов.

При синтезе ПР на кинематическую цепь могут накладываться следующие условия и ограничения:

- 1) ограничение на длину кинематической цепи;
- 2) ограничение на тип модуля в начале цепи (не имеет смысла ставить в начале цепи кинематический или информационный модуль);
- 3) ограничения на тип модуля в конце цепи;
- 4) ограничение на число присоединенных модулей;
- 5) ограничения на соседние модули:
 - а) не ставить подряд два модуля одного типа;
 - б) не ставить подряд два одинаковых модуля.

Вышеописанные условия делятся на два типа: те, что проверяются непосредственно при генерации кинематической цепи (все, кроме третьего), и те, что проверяются после того, как цепь сгенерирована (третье условие из списка выше).

Анализ синтезированного робота

В процессе автоматизированного синтеза по заданному техническому заданию в общем случае может быть получено несколько вариантов роботов. Оценка и принятие решения по выбору окончательного варианта

синтезированного робота выполняется на основе результатов моделирования функционирования робота в предполагаемой внешней среде, включая расчет кинематических и динамических характеристик роботов при выполнении заданной операции.

Для этого синтезированный вариант робота конвертируется в компонентную цепь и передается в моделирующую программу. Моделирующая программа позволяет представить синтезированный вариант робота в трехмерном виде, задать внешнюю среду, в которой предполагается функционирование робота и оценить функционирование робота с учетом ограничений, накладываемых внешней средой [7, 8]. Для этого выполняется планирование траектории перемещения робота в сформированной внешней среде и расчет кинематических и динамических характеристик при выполнении заданной операции.

Пример

Рассмотрим пример работы модуля синтеза.

Для примера попытаемся сгенерировать роботоманипулятор, состоящий из трех звеньев и имеющий две степени свободы. В качестве рабочего органа (схвата) будем принимать компонент шар, в качестве остальных звеньев — цилиндр.

Условия синтеза

Основные требования к синтезируемому манипулятору задаются на главной форме проекта (рис. 2). Таким образом, имеем следующие условия синтеза:

- компоненты, участвующие в синтезе:
 - два твердотельных: цилиндр, шар;
 - один кинематический: вращение;
- число последующих компонентов за:
 - цилиндром: 1;
 - элементом вращения: 1;
 - шаром: 0;
- начинать и заканчивать цепь должны твердотельные компоненты;
- два подряд идущих элемента цепи не должны быть одинаковыми или одного типа;
- длина синтезированной цепи: не более пяти элементов.

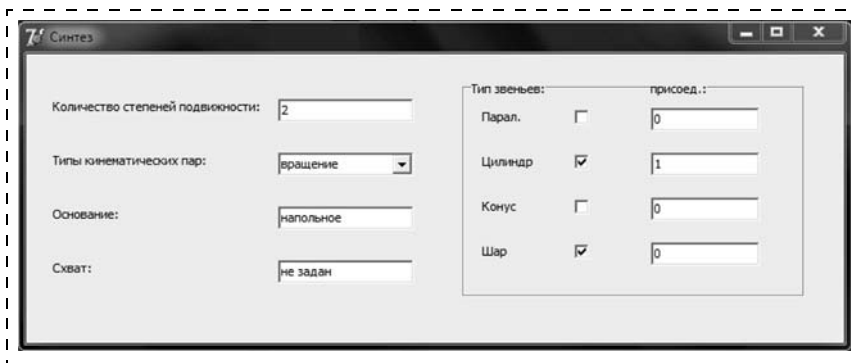


Рис. 2. Главная форма проекта

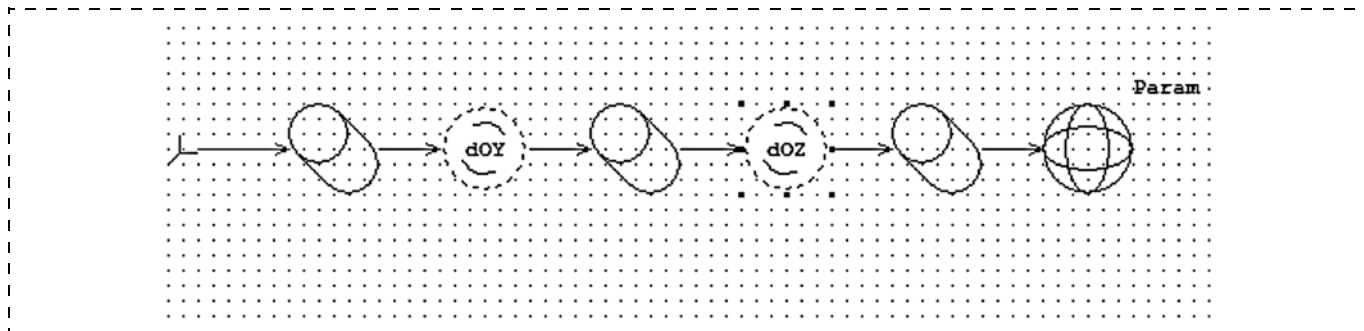


Рис. 3. Синтезированная цепь в структурном редакторе

Компонентная цепь

В результате были получены следующие конфигурации компонентных цепей:

- 1) [cSHAR,[]];
- 2) [cCYLINDER,[]];
- 3) [cCYLINDER,[cSHAR,[]]];
- 4) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cSHAR,[]]];
- 5) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[]]];
- 6) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[cSHAR,[]]]];
- 7) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cSHAR,[]]]]]];

- 8) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[]]]]]];
- 9) [cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[cFree_Rotate_Move,[cCYLINDER,[cSHAR,[]]]]]]]].

Видно, что они удовлетворяют условиям синтеза.

Очевидно, наиболее интересным является последний вариант.

Импортированная конфигурация

На рис. 3, 4 показан последний вариант синтезированного робота в окне редактора: структурного (рис. 3) и трехмерного (рис. 4).

После незначительной доработки в специализированном графическом редакторе модель робота принимает вид, показанный на рис. 5.

Дальнейший контроль результатов синтеза и оценка характеристик робота выполняется с помощью системы автоматизированного моделирования [7, 8], которая обеспечивает моделирование выполнения заданной технологической операции.

Заключение

В статье рассмотрена задача синтеза роботов на основе агрегатно-модульного метода построения роботов. Предложен алгоритм, который позволяет выполнить синтез устройства, удовлетворяющего заданным техническим требованиям. Сборка модулей в готовое изделие выполняется на основе

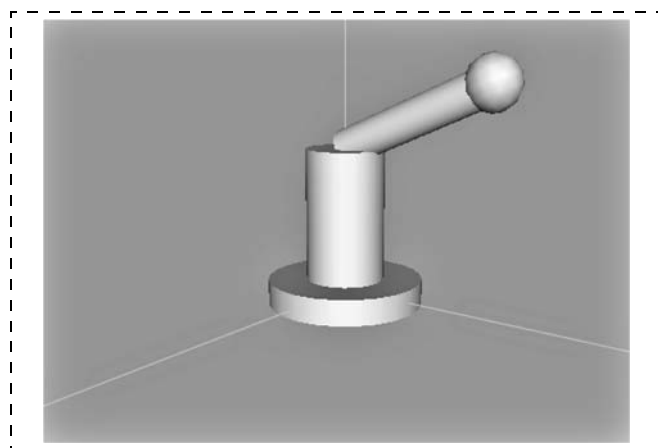


Рис. 4. Синтезированная модель в трехмерном редакторе

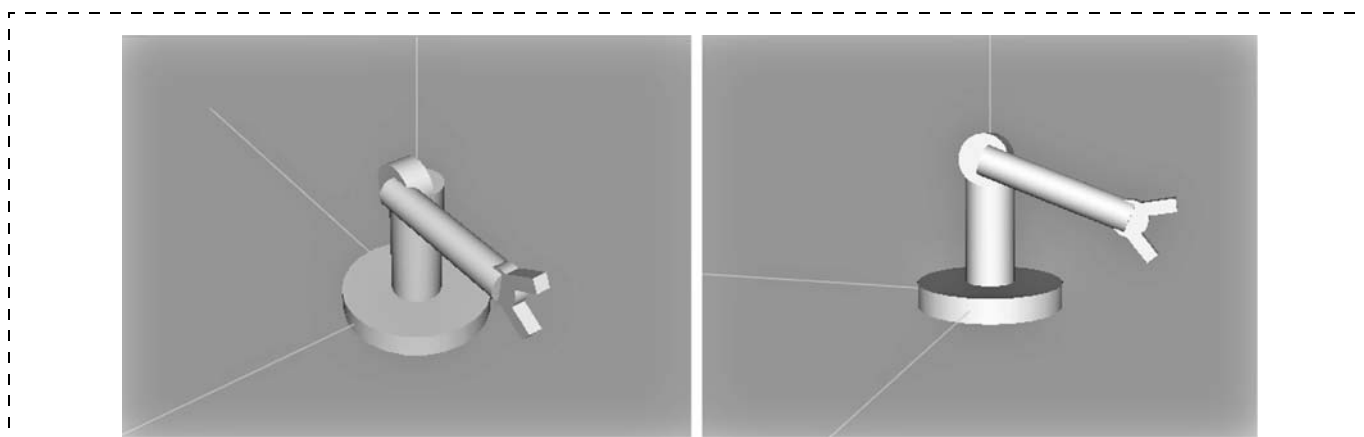


Рис. 5. Доработанная модель робота

правил стыковки модулей между собой. Вся информация о модулях хранится в базе данных.

Одним из важных моментов рассматриваемого метода синтеза является тот факт, что синтез робота выполняется с учетом параметров внешней среды и характера выполняемой операции.

Для оценки кинематических и динамических характеристик синтезированных вариантов роботов они передаются в моделирующую программу, где проводится расчет геометрических, кинематических и динамических характеристик синтезированных роботов и выполняется окончательный отбор робота.

Список литературы

1. **Воробьев Е. И., Козырев Ю. Г., Царенко В. И.** Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

2. **Челпанов И. Б.** Устройства промышленных роботов. СПб.: Политехника, 2001. 203 с.

3. **Бурдаков С. Ф., Дзяченко В. А., Тимофеев А. Н.** Проектирование манипуляционных промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособ. для студ. вузов. М.: Высшая школа, 1986. 264 с.

4. **Khalil W., Dombre E.** Modeling, Identification and Control of Robots, 2004. 500 p.

5. **Zhao J., Feng Z., Chu F., Ma N.** Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robot Mechanisms. Academic Press, 2013. 496 p.

6. **Горитов А. Н.** Синтез и анализ агрегатно-модульных управляемых механических систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 10. С. 10—14.

7. **Горитов А. Н.** Имитационное моделирование управляемой механической системы и ее рабочего пространства // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 5. С. 11—13.

8. **Горитов А. Н.** Архитектура системы автоматизированного моделирования робототехнических комплексов // Программные продукты и системы: Приложение к журналу "Проблемы теории и практики управления". 2001. № 2, С. 17—19.

Synthesis Algorithm for Industrial Robots Based on a Given Set of Modules

A. N. Goritov, ang@asu.tusur.ru✉,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation

Corresponding author: **Goritov Aleksandr N.**, D. Sc., Professor,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation
e-mail: ang@asu.tusur.ru

Received on June 09, 2016

Accepted on June 27, 2016

One of the promising directions of robotics is the aggregate-modular method of construction of the industrial robots. The aggregate-modular method of construction of the industrial robots has many advantages. One of the positive factors of the aggregate-modular approach to construction of robots is a possibility to formalize the design process of robots. In this connection, one of the urgent tasks is development of the methods and algorithms for synthesis and analysis of the industrial robots on the basis of the aggregate-modular approach. The basic algorithm for an automated synthesis of the industrial robots is the synthesis of the structure of an industrial robot. The synthesis is performed on the basis of a model range of the standard modules, settings, operations and settings of the working environment, in which the functions of a robot are synthesized. The author proposes a recursive algorithm for a structure synthesis of the robot manipulators for building a robot based on the aggregate-modular approach. The proposed synthesis algorithm allows us to reduce the computing resources procedure required for the synthesis compared with a full search of all the possible variants and selection of the most suitable option of a robot. The results of the synthesis are converted into a format, readable by a dedicated system of simulations. This allows us to evaluate the synthesized version of the robot when performing scheduled operations in the external environment.

Keywords: industrial robots, design, units, modules, design automation, synthesis, algorithm

For citation:

Goritov A. N. Synthesis Algorithm for Industrial Robots Based on a Given Set of Modules, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 769—773.

DOI: 10.17587/mau.17.769-773

References

1. **Vorob'ev E. I., Kozыrev Ju. G., Carenko V. I.** *Промышленные роботы агрегатно-модульного типа* (Industrial robots aggregate-modular type), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p. (in Russian).

2. **Челпанов И. Б.** *Устройства промышленных роботов* (The device for industrial robots), SPb., Politehnika, 2001, 203 p. (in Russian).

3. **Burdakov S. F., D#jachenko V. A., Timofeev A. N.** *Проектирование манипуляционных промышленных роботов и роботизированных комплексов* (Design of manipulation of industrial robots and robotic systems), Moscow, Vysshaja shkola, 1986, 264 p.

4. **Khalil W., Dombre E.** Modeling, Identification and Control of Robots, 2004, 500 p.

5. **Zhao J., Feng Z., Chu F., Ma N.** Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robot Mechanisms, Academic Press, 2013, 496 p. (in Russian).

6. **Goritov A. N.** *Sintez i analiz agregatno-modul'nyh upravlyaemyh mehanicheskikh sistem* (Synthesis and analysis of aggregate-modular controlled mechanical systems), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2005, no. 10, pp. 10—14 (in Russian).

7. **Goritov A. N.** *Imitacionnoe modelirovanie upravlyaemoj mehanicheskoy sistemy i ejo rabocheho prostranstva* (Simulation-driven mechanical system and its workspace), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2000, no. 5, pp. 11—13 (in Russian).

8. **Goritov A. N.** *Arhitektura sistemy avtomatizirovannogo modelirovanija robototekhnicheskikh kompleksov* (Architecture computer aided modeling of robotic systems), *Programmnye produkty i sistemy: Prilozhenie k zhurnalu "Problemy teorii i praktiki upravlenija"*, 2001, no. 2, pp. 17—19 (in Russian).