

3. **Kwon D. S., Book W. J.** An inverse dynamic method yielding flexible manipulator state trajectories, *In Proceedings of American Control Conf.*, 1990, pp. 186–193.

4. **De Luca A., Di Giovanni G.** Rest-to-rest motion of a one-link flexible forearm, *In Proceedings of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2001, pp. 923–928.

5. **De Luca A., Caiano V., Del Vecovo D.** Experiments on rest-to-rest motion of a flexible arm, *In Robotics VIII, Springer Tracts in Advanced Robotics*, B. Siciliano, P. Dario (Eds.), Berlin, Springer Verlag, 2003, vol. 5, pp. 338–349.

6. **Pereira E., Aphale S. S., Feliu V.** Integral Resonant Control for Vibration Damping and Precise Tip-Positioning of a Single-Link Flexible Manipulator, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 232–240.

7. **Gu D.-W., Petkov P. Hr., Konstantinov M.** Robust Control Design with Matlab, London, Springer Verlag, 2005, 389 p.

8. **Krasnoshchechenko V. I.** *Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli gibkogo odnozyennogo manipulyatora s ispol'zovaniem principa naimen'shego dejstvija Gamil'tona* (Development and investigation of mathematical model of a flexible single-link manipulator by using of the Hamilton's principle), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 383–390 (in Russian).

9. **Lyuboshic M. I., Ickovich G. M.** *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* (Handbook on strength of materials), Minsk, Vyshehshaya shkola, 1969, 464 p. (in Russian).

10. **Dorf R. C., Bishop R. H.** Modern Control Systems. Ninth Edition, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001, 822 p.

УДК 621.0:004.82

DOI: 10.17587/mau.18.660-664

**А. Г. Лютов**, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru,  
**Ю. В. Рябов**, канд. техн. наук, доц., ryabov\_yuri\_atp@mail.ru,  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## Синтез технологического процесса для роботизированного комплекса на основе знаний

*Рассмотрен новый подход к синтезу технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов, выполняемых роботизированным комплексом. Гибкость процесса технологической подготовки для роботизированного комплекса достигается выбором наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. Предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем, базирующийся на создании элементов знаний для технологических объектов и переходов.*

**Ключевые слова:** робототехнологический комплекс, структурный синтез, технологический процесс, элементы знаний, цепочки исполняемых переходов

### Введение

Использование робототехнологических комплексов (РТК) позволяет изготавливать детали в любом порядке и варьировать их выпуск в зависимости от производственной программы, сокращает затраты и время на подготовку производства, повышает коэффициент использования оборудования.

Опыт эксплуатации промышленных роботов в различных производственных условиях позволил определить основные особенности и принципы построения технологических процессов в случае автоматизации отдельных операций с помощью промышленных роботов. При этом надо учитывать особенности их применения как при обслуживании технологического оборудования, так и при использовании робота в качестве технологического оборудования при выполнении процессов сварки, окраски, сборки, зачистки облоя и т. п.

Проектирование технологического процесса (ТП) РТК можно разделить на четыре уровня [1]:

- принципиальная схема процесса;
- маршрут обработки деталей;
- операционная технология;
- управляющие программы.

Первому уровню свойственны наибольшая степень абстракции и определение только принципиальных особенностей структуры и функции ТП. От

уровня к уровню степень детализации проектных решений возрастает.

Задачи автоматизированного проектирования ТП можно эффективно решать методом синтеза проектных решений. Процесс формирования технологического процесса представляет собой совокупность процедур структурного и параметрического синтеза. Структурный синтез реализуется на уровнях формирования операций и переходов, а параметрический — на уровне выбора базы, определения межпереходных размеров, расчета режимов обработки и т. д. [1].

В данной работе рассматривается синтез ТП РТК с применением знаний технологических переходов. Знания включают навыки и опыт технологов и операторов, участвующих в различных ТП изготовления изделий, и представлены в виде элементов знаний.

### Предлагаемый подход

Для формирования ТП РТК предлагается метод структурного синтеза технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов.

Синтез исполнительных переходов по обработке и сборке изделия — это последовательность методов обработки, необходимых для достижения требуемых атрибутов, определенных чертежом изделия. Такими атрибутами являются:

- геометрический тип поверхности;

- точность размера;
- шероховатость;
- вид термообработки и т. д.

Формирование последовательности операций выполняется путем выявления признаков технологической совместимости и преемственности. Две операции попарно совместимы, если состояние детали на выходе одной операции может быть исходным для другой операции.

Синтез структуры операций необходим для создания цепочки исполняемых переходов (рис. 1), последовательность которых определяет целостность операции, выполняемой на выбранном оборудовании.

Метод структурного синтеза предусматривает формирование различных цепочек исполняемых переходов (ЦИП) технологической операции на основе элементов знаний и в соответствии с условиями ТП РТК.

Для технологической операции, не говоря уже о ТП в целом, характерна многовариантность, которая предполагает выбор наилучшего решения, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации. В итоге необходима гибкость технологической подготовки, достигаемая методом синтеза технологических операций в виде цепочки исполняемых переходов, которые предлагается представлять в виде элементов знаний (ЭЗ).

Для решения данной задачи предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем. Предложено разбивать знания на элементы с дальнейшим гибким формированием цепочек знаний.

Элементы знаний создаются как для технологических объектов и деталей, так и для технологических переходов (рис. 1). Последние определяют отношение между объектами.

Вновь созданные ЦИП помещаются в базу знаний для длительного хранения. В дальнейшем их можно использовать для моделирования ТП РТК и выполнять их редактирование. В настоящее время можно проводить моделирование таких процессов, как литье, штамповка, механообработка, сварка и термообработка.

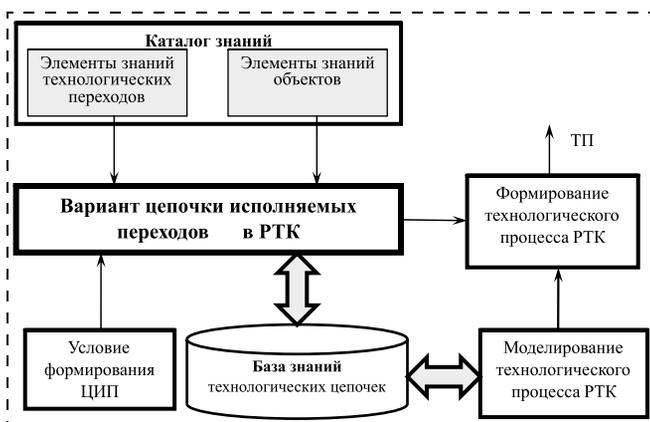


Рис. 1. Синтез технологического процесса РТК с применением знаний

Эффективно можно моделировать процесс штамповки, когда программный комплекс (например, DEFORM) имеет виртуальные штампы, прессы и печи, входящие в РТК. При этом осуществляется моделирование сложных трехмерных процессов пластического деформирования металлов [2]. При моделировании литейных процессов используются такие специальные программные средства, как SOLIDCast или WinCast. Технолог наблюдает процесс кристаллизации отливки до начала производства и анализирует различные варианты ТП литья [3].

Моделирование ТП механообработки можно проводить в САМ-системе, позволяющей выполнять анимацию съема металла различным режущим инструментом и показывать возможные столкновения инструмента с объектами станка и приспособлениями [4]. Моделирование РТК механообработки стало возможным в связи с применением трехмерных моделей промышленных роботов, металлорежущего станка, инструмента и применяемого зажимного приспособления. Технолог может моделировать процесс обработки детали на любом станке, предварительно созданном на основе его кинематической схемы и твердотельной модели. Данные возможных ЦИП можно брать из базы знаний (рис. 1) для создания различных вариантов моделируемой обработки [5]. Обмен данными между САМ-системой и базой знаний можно осуществлять с помощью технологии XML [6].

Моделирование сборочных процессов, выполняемых РТК, можно проводить с помощью САД-системы. Данные сборочных переходов также можно брать из базы знаний для реализации различных вариантов сопряжений деталей сборочного процесса.

Элементы знаний технологических объектов определяются основными характеристиками технологического оборудования, инструмента, оснастки (приспособления, штампы, пресс-формы, литейные формы), промышленных роботов, накопителей деталей, приспособлений для крепления и перемещения деталей в РТК и т. д.

Характеристики следует описывать такие, которые необходимы для разработки ТП РТК. Например, для РТК механообработки описание металлорежущего станка с числовым программным управлением должно включать в себя такие характеристики, как выполняемые операции, число управляемых координат, класс точности, диапазон скоростей главного движения, диапазон подач, размеры рабочей зоны.

Описание промышленного робота включает такие основные характеристики, как число степеней подвижности, грузоподъемность, зона обслуживания, габаритные размеры, погрешность позиционирования. Кроме того, указываются характеристики манипулятора, приводов, системы управления, информационной системы.

Элементы знаний технологических переходов определяют технологические действия, связанные с обработкой элементарных поверхностей детали или связанные с выполнением вспомогательных пере-

ходов. В качестве примера рабочими переходами в РТК механообработки могут быть следующие:

- подрезать торец;
- точить поверхность, выдерживая определенный размер;
- обрабатывать канавку;
- сверлить отверстие;
- фрезеровать поверхности, выдерживая определенные размеры.

Рабочие переходы имеют такие свойства (атрибуты), как номер перехода, скорость главного движения, величина подачи, время перехода, вид обрабатываемой поверхности. При описании перехода необходимо указывать обрабатываемые поверхности, материал детали и способ выполнения перехода.

Вспомогательные переходы определяют такие операции, как установка и снятие детали, выверка и закрепление детали, переустановка детали. В ТП РТК создаются элементы знаний, описывающие перемещение детали в зону захвата роботом, манипулирование деталью роботом в рабочей зоне технологического оборудования и манипулирование деталью роботом после ее обработки при перемещении в накопитель.

Использование РТК в машиностроении накладывает свой отпечаток на создание операционного ТП на основе исполняемых переходов, формируемых из ЭЗ. В тех РТК, где промышленные роботы играют роль вспомогательного устройства, операционная технология дополняется только вспомогательными переходами, связанными с подачей заготовки в зону захвата накопителя, установкой и снятием детали в рабочей зоне. Кроме того, добавляются ЭЗ, которые включают основные характеристики следующих технологических объектов:

- промышленных роботов;
- накопителей заготовок;
- накопителей готовых деталей;
- захватных устройств робота;
- накопителей инструментов.

В том случае, когда промышленный робот выполняет роль технологического оборудования, знания об исполняемых переходах создаются для технологических действий, выполняемых роботом. К таким относятся технологические операции сварки, сборки, термической обработки, шлифования, нанесения покрытий, зачистки, контроля и т. п.

### Метод представления знаний

Описание ЭЗ предлагается выполнять на языке XSD, так как XML-схемы содержат метаданные и с их помощью можно создавать базу знаний [7]. Ниже приведен пример графического описания XML-схемы ЭЗ перехода "точить поверхность" со всеми необходимыми элементами и их атрибутами (рис. 2).

Главный элемент "точить\_поверхности" включает атрибуты, определяющие его свойства, и атрибуты входящих объектов: обрабатываемая деталь, металлорежущий станок, инструмент. Для всех атрибутов определены также типы данных.



Рис. 2. Элемент знаний перехода "точить поверхность"

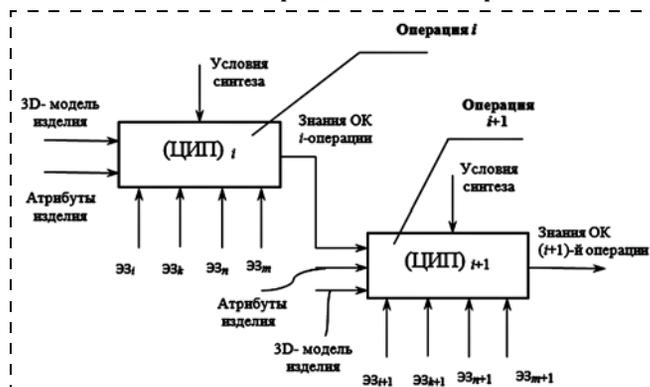


Рис. 3. Синтез структуры операций технологического процесса

Разработка операционной технологии в соответствии с требованиями текущей производственной ситуации выполняется поэтапно:

1. Синтез очередного варианта операции.
2. Анализ варианта.
3. Принятие решения о замене ранее выбранного варианта на новый вариант или о прекращении синтеза новых вариантов.

Синтез структуры операций ТП показан на рис. 3.

Формирование *i*-й операции с помощью цепочки исполнительных переходов (ЦИП)<sub>*i*</sub>, составленной из элементов знаний ЭЗ<sub>*j*</sub>, ЭЗ<sub>*к*</sub>, ЭЗ<sub>*п*</sub>, ЭЗ<sub>*м*</sub>, проводится на основе данных 3D-модели изделия и ее атрибутов. Вариант формирования очередной операции определяется соответствующим условием текущей производственной ситуации. Условие синтеза переходов на основе элементов знаний указывается сверху блока операции и является управляющим воздействием синтеза очередной операции. На выходе блока операции формируются знания для *i*-й операции.

Условие синтеза исполнительных переходов осуществляется не только за счет влияния атрибутов чертежа изделия и визуализации 3D-модели, но и таких атрибутов, как:

- максимальное значение припуска, определяющее тип перехода (черновой, получистовой или чистовой);
- марка обрабатываемого материала;
- марка материала инструмента;
- класс точности станка;
- необходимое число одновременно управляемых координат движения инструмента.

Число возможных вариантов ЦИП для конкретной операции может быть достаточно велико. На предприятии оно ограничивается возможностями существующего оборудования и применяемого инструмента. Это сокращает число альтернативных ЦИП, но проблема синтеза конкретной ЦИП для обработки поверхностей детали остается.

### Заключение

1. Для поиска наилучшего решения в построении ТП, удовлетворяющего требованиям текущей производственной ситуации, предложен метод структурного синтеза технологических операций на основе последовательных цепочек знаний переходов, выполняемых РТК.

2. Предложен новый метод представления знаний на основе XML-схем, основанный на представлении знаний в виде элементов технологических объектов и переходов.

3. Создание базы знаний позволяет сохранять проверенные варианты ТП после их моделирования в CAD/CAM-системах и повысить эффективность разработанного ТП с учетом моделирования и выбора наилучшего варианта цепочки исполняемых переходов в РТК.

4. Выбор последовательных цепочек рабочих и вспомогательных переходов позволит провести синтез управляющей программы работы РТК.

5. Для организации информационных потоков между различными программными средствами це-

лесообразно использовать технологию XML. Обмен информацией через XML-документы между программными средствами организуется с помощью SOAP-сообщений.

6. Предлагаемый подход к структурному синтезу ТП позволяет значительно сократить время на подготовку, генерацию и корректировку управляющих программ для РТК.

### Список литературы

1. САПР в технологии машиностроения / В. Г. Митрофанов, О. Н. Калачев, А. Г. Схиртладзе и др. Ярославль; Ярославский государственный технический университет, 1995. 298 с.
2. Сидоров А. А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением // САПР и графика. 2007. № 10. С. 78—79.
3. Вольнов И. Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов — состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. 2007. № 6. С. 14—17.
4. Лютов А. Г., Рябов Ю. В., Полезин С. А. Повышение эффективности автоматизированного управления технологическими процессами производства авиационной техники на основе интеллектуальных технологий // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 3 (69). С. 1—4.
5. Лютов А. Г., Рябов Ю. В. Модель комплексного автоматизированного управления процессами в машиностроении // СТИН. 2016. № 5. С. 2—7.
6. Ryabov S. U., Lyutov A. G., Ryabov Yu. V., Vavilova A. V. Метод обмена информацией между программными системами автоматизации технологических и производственных процессов / Программные продукты и системы. 2016. № 4. С. 113—117.
7. W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures W3C Recommendation 5 April 2012. URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>

## Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge

A. G. Lutov, [lutov1@mail.ru](mailto:lutov1@mail.ru), Y. V. Ryabov, [ryabov\\_yuri\\_atp@mail.ru](mailto:ryabov_yuri_atp@mail.ru)  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author: Lutov Aleksey G., D. Sc., Professor,  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation,  
e-mail: [klimina@imec.msu.ru](mailto:klimina@imec.msu.ru)

Received on March 20, 2017

Accepted on April 14, 2017

*A new approach to the synthesis of technological operations is based on the sequential combinations of the knowledge action actionaction, which are implemented by the robotic complex. Synthesis of the executive actions on processing and assembly of a product it is the sequence methods processing for achievement of the required attributes determined by the drawing of a product. The flexibility of the process for preparation of a robotic complex is achieved by selection of the best solutions, which meet the requirements of the current production situation. A new method of knowledge representation is based on XML schema for creation of the knowledge elements for the technological objects and actions. Creation of a knowledge base allows us to save the tested variants of the technological processes after their modeling in CAD/CAM systems and to improve their performance. Formation of  $i$  — operation by chaining the executive actions, is composed of the elements of knowledge of EK<sub>i</sub>, EK<sub>k</sub>, EK<sub>n</sub>, EK<sub>m</sub>, and is based on the data of the 3D model of the product and its attributes. The option of formation of the next operation is determined by the state of the current production situation. Condition of synthesis of the executive actions it is carried out due to influence of attributes of the drawing of a product and visualization 3D — models, also due to the following attributes: the maximal amount of the allowance; grade of the processed material; grade of the tool material; accuracy class of a machine; and necessity to use a number of simultaneously controllable axes of movement of a tool. Serial combinations of the working and auxiliary passages will make possible a synthesis of the control of the program of work of the robot technology complexes (RTC). The pro-posed approach to the structural synthesis of the technological process can significantly reduce the preparation time, generation and adjustment of the control programs for RTC.*

**Keywords:** robot technology complex, structural synthesis, technological process, elements of knowledge, chain of executable transitions

For citation:

**Lutov A. G., Ryabov Y. V.** Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 660–664.

DOI: 10.17587/mau.18.660-664

#### References

1. **Mitrofanov V. G., Kalachev O. N., Skhirtladze A. G.** CAD in engineering technology, Yaroslavl, Yaroslavl state technical University, 1995, 298 p. (in Russian).

2. **Sidorov A. A.** The Present and future of modeling of processes of processing of metals by pressure, *CAD and Graphics*, 2007, no. 10, pp. 78–79 (in Russian).

3. **Volnov I. N.** *Russian Foundryman*, 2007, no. 6, pp. 14–17 (in Russian).

4. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Polesin S. A.** *Vestnik USATU*, 2015, vol. 19, no. 3 (69), pp. 1–4 (in Russian).

5. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V.** Model of complex automated process control engineering, *STIN*, 2016, no. 5, pp. 2–7.

6. **Ryabov S. U., Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Vavilova A. V.** The Method of information exchange between software systems of automation of technological and production processes, *Software Products and Systems*, 2016, no. 4, pp. 113–117.

7. **W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures** W3C Recommendation 5 April 2012, available at: URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>

УДК 62-529

DOI: 10.17587/mau.18.664-669

**О. Н. Крахмалев**, канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,

**Д. И. Петрешин**, д-р техн. наук, директор института, atsys@tu-bryansk.ru,

**Г. Н. Крахмалев**, аспирант, atsys@tu-bryansk.ru,

Брянский государственный технический университет

## Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов\*

*Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Процедуры по калибровке выполняются при оснащении промышленного робота новым инструментом. Калибровка инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (ТСП — Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в ТСП. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента.*

**Ключевые слова:** промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления

### Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того, чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью, сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента, создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной

памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота в системе управления задается устанавливаемый на роботе инструмент путем присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента.

Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (*ТСП — Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *ТСП*. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки нового инструмента.

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твердыми телами. Такие многозвен-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Брянского ГТУ в рамках внутреннего гранта № 135 за 2016 г., выделенного на разработку программно-математического обеспечения для моделирования и управления промышленными роботами и многокоординатными станками по программе развития научного направления "Мехатроника и робототехника".