

УДК 621.865

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ OLP ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

Л.А. ЛОБОРЕВА

(Могилевский государственный университет продовольствия)

Приведен обзор известных САПР и систем автономного программирования промышленных роботов, которые позволяют создавать 3D-модели, проводить предварительное тестирование путем имитационного моделирования в виртуальной среде, оптимизировать траектории и алгоритмы управления промышленными роботами.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, САПР, offline-программирование, язык программирования.

**Введение.** При разработке робототехнических комплексов требуется специализированное программное обеспечение для 3D- и динамического имитационного моделирования процессов. Создание траектории движения робота методами offline-программирования (OLP) состоит из нескольких этапов. На первом – создаются точные CAD-модели (CAD – Computer Aided Design – система автоматизированного проектирования) всех узлов роботизированной ячейки: деталей, технологической среды, робота, инструмента, оснастки и т.д. На втором этапе роботизированная технологическая ячейка моделируется в виртуальной 3D-среде. На следующем этапе рассчитываются опорные точки траектории движения робота-манипулятора для его перемещения к детали и выполнения технологических операций. Траектории должны удовлетворять ряду требований: отсутствие столкновений, оптимальность по количеству и качеству движений, обеспечение качества позиционирования, минимизация операций по времени, обеспечение должной скорости приводов робота, обеспечение точности следования необходимой траектории при контурном управлении (например, вдоль линии сварного шва с учетом его глубины и углов расположения рабочего инструмента) и т.п. После расчета и проверки траектории ее нужно перевести на язык управляющего контроллера конкретной модели робота для реализации в условиях производства.

**1. САПР для создания геометрических моделей при OLP.** САПР (система автоматизации проектных работ, система автоматизированного проектирования) – программный пакет, предназначенный для проектирования (разработки) объектов производства, а также оформления конструкторской и/или технологической документации. Чем точнее исходные данные об элементах роботизированной ячейки и рабочей среды, тем точнее планируется траектория робота. На практике достаточно сложно рассчитать все 3D-модели с большой точностью и учесть все особенности реальных объектов (рисунок).

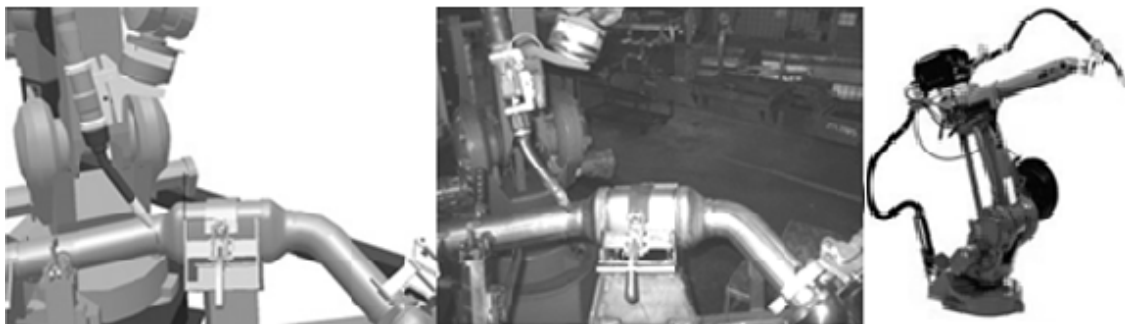


Рисунок. – Виртуальная модель и ее реальные прототипы

Особенно проблематично учитывать при моделировании расположение навесного оборудования, проводов, шлангов водо- и газоснабжения, смонтированных на роботе и изменяющих свое положение при перемещении его звеньев. Некоторые CAD-модели, служащие основой для OLP, могут создаваться на стадии разработки производственных изделий и продукции в САПР.

Компоненты многофункциональных САПР имеют три специализации: CAD, CAM, CAE. Модули CAD (Computer Aided Design) предназначены для выполнения графических работ, CAM (Computer Aided Manufacturing) – для решения задач технологической подготовки производства, CAE (Computer Aided Engineering) – для инженерных расчетов, анализа и проверки проектных решений.

В настоящее время для создания 2D- и 3D-моделей используется более 60 программных пакетов САПР разного уровня. Наиболее распространены системы для создания базовых графических модулей CAD с дополнительными приложениями. В таблице приведен перечень наиболее популярных программ-

ных продуктов с функциями создания CAD- или САМ-моделей (система контроля и автоматического управления). Разработчики указаны с учетом слияния и объединения компаний [1–11].

Таблица. – Наиболее используемые программные продукты и их разработчики

| Программный продукт         | Разработчик             | Программный продукт  | Разработчик              |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| Alphacam                    | Vero Software (HEXAGON) | NCGCAM               | NCG CAM Solutions        |
| ArtCAM                      | Delcam (Autodesk)       | NX                   | Siemens PLM Software     |
| Autodesk Mechanical Desktop | Delcam (Autodesk)       | PartMaker            | Delcam (Autodesk)        |
| BobCAD-CAM                  | BobCAD-CAM              | PEPS                 | Vero Software (HEXAGON)  |
| CAM-TOOL                    | C&G SystemsInc.         | PowerMILL            | Delcam (Autodesk)        |
| CAMWorks                    | Geometric Technologies  | SharpCam             | SharpCamLtd.             |
| CATIA                       | DassaultSystemes        | SolidCAM/InventorCAM | SolidCAM                 |
| CimatronE                   | CimatronGroup           | Space-E              | NTT DATA ENGINEERING SYS |
| Creo (Pro-E)                | PTC                     | SprutCAM             | «Спрут-Технология»       |
| DUCT                        | Delcam (Autodesk)       | SurfCAM              | Vero Software (HEXAGON)  |
| Edgecam                     | Vero Software (HEXAGON) | Tebis                | Tebis TechnischeInf. AG  |
| ESPIRIT                     | DP Technology           | Tehtran              | NIP-Informatica          |
| Featurecam                  | Delcam (Autodesk)       | T-FLEX CAD           | Топ-Системы              |
| GeMMa 3D                    | NTC Gemma               | TopSolid             | Missler Software         |
| GibbsCAM                    | CimatronGroup           | Unigraphics          | EDS                      |
| GO2cam                      | GO2cam International    | VISI                 | Vero Software (HEXAGON)  |
| I-DEAS                      | SDRC                    | VisualCAD/CAM        | MecSoftCorporation       |
| Inventor HSM/HSMWorks       | HSMWorks (Autodesk)     | WorkNC               | Vero Software (HEXAGON)  |
| HiperMILL                   | OPEN MIND               | ZW3D                 | ZWSOFT                   |
| Mastercam                   | CNC Software            | КОМПАС               | АСКОН                    |

Приведем примеры функциональных возможностей некоторых САПР.

Крупнейшим в мире поставщиком программного обеспечения для автоматизированного проектирования является компания Autodesk Inc, которая с 1982 года разрабатывает программные продукты, позволяющие создавать цифровые модели. Технологии Autodesk используются для визуализации, моделирования и анализа поведения разрабатываемых конструкций на ранних стадиях проектирования и позволяют увидеть, а также испытать модель в виртуальной среде [12].

**MicroStation** – это профессиональная, высокопроизводительная система для 2D/3D-автоматизированного проектирования и выполнения работ, связанных с черчением, конструированием, визуализацией, анализом, управлением базами данных и моделированием.

Система **CATIA** (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) – одна из самых распространенных САПР высокого уровня. Это комплексная CAD/CAM/CAE система, включающая инструменты 3D-моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации [4].

**SolidWorks** – система для автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий разной сложности и назначения.

Существуют и специализированные приложения, например, SprutCAM предназначена для разработки управляющих программ (УП) оборудования с ЧПУ, являющегося предшественниками роботов.

СПРУТ (Система проектирования универсальных технологий) – интегрированная метаинструментальная языковая среда для создания сквозных САПР по принципу RAD-технологии (RAPID APPLICATION DEVELOPMENT TOOLS).

T-FLEX CAD – первая в мире САПР с геометрической параметризацией, построена на базе ядра Parasolid фирмы Unigraphics Solutions и содержит средства 3D-проектирования, модули конечно-элементного и динамического анализа. Имеет специализированные приложения T-FLEX ЧПУ 2D и 3D (система подготовки программ для станков с ЧПУ) и T-FLEX NC Tracer (система имитации процесса обработки детали на станке с ЧПУ по готовой управляющей программе [5]

САПР верхнего уровня **Pro/ENGINEER** – это CAD/CAM/CAE система, которая охватывает все сферы проектирования, технологической подготовки производства и изготовления изделия. Наличие прямого доступа в систему поддержки жизненного цикла изделия Windchill PDMLink позволяет относить Pro/ENGINEER к PLM-системам (PLM – Plant Lifecycle Management – управление жизненным циклом промышленного объекта) [8].

**КОМПАС** – САПР, которая имеет возможности оформления проектной и конструкторской документации согласно стандартам серии ЕСКД и СПДС. Версия КОМПАС-3D предназначена для трехмерного проектирования [9].

Отметим программные продукты для комплексной автоматизации конструкторского проектирования и технологической подготовки производства, разрабатываемые компанией «Интермех» (Беларусь). Программы для автоматизированного конструкторско-технологического проектирования используются от разработки конструкторской документации (Cadmech) с последующим автоматизированным выпуском текстовых конструкторских документов СП, ВС, ВП, ПЭ (AVS) до ведения сетевого иерархического архива предприятия с возможностью ведения проектов и документооборота предприятия (Search). Система проектирования трехмерных параметрических деталей и сборок (Cadmech Desktop) позволяет решать задачи 3D-конструкторского проектирования. Приложение **CADMECH SW** предназначено для создания моделей деталей и сборочных единиц, оформления чертежей в среде SOLIDWORKS, выпуска текстовых конструкторских документов (спецификации любых форм, ведомости спецификаций и т.д.).

Многие САПР позволяют сохранить модель в файле с таким расширением, который доступен в других системах проектирования, например, ACIS, IGES, Parasolid, STEP, STL, VRML, однако при переносе модели в другой пакет часть функций может быть потеряна. Большинство создаваемых в описанных САПР моделей могут импортироваться в системы автономного программирования роботов.

Некоторые производители роботов размещают на официальных сайтах их CAD-модели. Например, фирма ABB предлагает CAD-модели своих роботов в следующих форматах: Validation, DXF/DWG 2D, SAT, SW, STEP, PARASOLID, VDA, VRML, IGES, IGRIP, STL, VRML, ROBCAD, RobotStudio, IGRIP, и CAD-модели позиционеров в форматах: ACIS, IGES, PARASOLID, SAT, SOLIDWORKS, STEP [11].

**2. Системы автономного программирования роботов.** Системы аналитического программирования роботов делятся на два типа. Первый состоит из автономных систем, ориентированных на узкий класс роботов. К таким относятся VAL (Unimation), Sigla (Olivetti), AML (IBM), MCL (McDonnell Douglas), ACRAMITIC (Cincinnati Milacron) и др. Системы второго типа входят в состав универсальных или специализированных робототехнических САПР/САТПП в виде самостоятельных модулей. Наиболее известными системами автономного программирования, используемыми при тестировании алгоритмов управления промышленных роботов, являются пакеты Tecnomatix ROBCAD, RobotStudio, CimStation, IGRIP, Robotworks, ROBOMAX, FAMOS robotic. Рассмотрим их возможности подробнее.

Tecnomatix (разработчик Siemens PLM Software) – это комплексный пакет для построения схемы производственного процесса, проектирования, моделирования, проверки и производства, основанный на принципах PLM производственной платформы Teamcenter. Tecnomatix 9 имеет функцию автоматической генерации траекторий роботов. В программное обеспечение Tecnomatix ROBCAD (другое название eM-Workplace) входит набор программ для проектирования, имитации и автономного программирования производственных роботизированных систем. Он состоит из различных специализированных модулей, включая ROBCAD/Line, ROBCAD/Spot, ROBCAD/Paint, ROBCAD/Drill, ROBCAD/Arc, ROBCAD/Fixture, ROBCAD/Man, ROBCAD/Laser и ROBCAD/Onsite. В пакет можно импортировать данные из основных промышленных САПР (CATIA, NX, Pro/Engineer), а также транслировать данные из нейтральных форматов (IGES, DXF, VDAFS, SET, SLT, STEP, JT). ROBCAD позволяет моделировать и синхронизировать работу роботов и вспомогательного оборудования, имеет инструменты для разработки траектории движения и ее оптимизации, подготовки УП робота [2].

Программный интерфейс для разработки дополнительных приложений обеспечивает доступ к функциям и алгоритмам ядра, включая геометрию, кинематику, планирование траекторий движения и графику. В дополнение к имеющейся библиотеке промышленных роботов ROBCAD позволяет создавать новые модели манипуляторов и оборудования, задавать их кинематику. При 3D-симуляции динамически осуществляется проверка столкновений для предотвращения повреждения элементов оборудования, оснастки, деталей. Механизм RRS (realistic robot simulation), основанный на использовании оригинального программного обеспечения контроллера робота, позволяет оценивать время и траекторию движения с достаточно высокой точностью.

ROBCAD содержит модуль OLP, который позволяет моделировать движение манипуляторов и загружать проверенную программу в контроллер робота. Доступны интерфейсы большинства промышленных роботов ведущих производителей. После настройки всех параметров модуль OLP генерирует УП для загрузки в контроллер. Созданная программа учитывает реальные условия эксплуатации робота (скорости и ускорения движения робота, блокировки при входе в зоны возможного столкновения с другими роботами, окружающим оборудованием и т.д.). Модуль также позволяет импортировать программы из контроллера робота для их оптимизации и повторного использования.

Модуль Calibration пакета ROBCAD предназначен для точного сопоставления положения элементов модели и реальной ячейки. После процесса калибровки программа автоматически корректируется, и робот будет достигать заданных точек без ручной корректировки их реального положения. Продукт работает и с другими средствами калибровки, в том числе Dynalog и Krypton.

Операции закладки деталей, присадки, ручной сварки, механического крепежа механизмов выполняет человек. Модуль Human служит для моделирования, анализа и оптимизации ручных операций.

Приложение Tecnomatix Human Performance позволяет помещать в виртуальную среду биомеханически точные цифровые манекены человека обоих полов и разных габаритов и анализировать их поведение. Ручные операции могут моделироваться одновременно с работой роботов и механизмов. Использование технологии цифрового манекена позволяет проверить обзорность, зоны доступности предметов, удобство их расположения, оценить вероятность травмирования людей. В ROBCAD доступно создание HTML-отчетов о ячейках и последовательности операций (SOP). Отчет включает изображения и данные, полученные из ячеек, детальные отчеты по роботам, инструменту, механизмам, моделям человека, сварным точкам, а также анимации в виде VRML. Такие функции недоступны другим пакетам.

Tecnomatix Process Simulate – программный продукт для моделирования и проверки технологических процессов в трехмерной графической среде. Результатом моделирования является «цифровой двойник» производства (Digital Twin), который используется для проверки и оптимизации техпроцесса, генерации УП роботов, виртуальной пуско-наладки автоматизированных линий, обеспечения эргономических требований. Базовый функционал пакета обеспечивает создание траекторий перемещения, анализ кинематики оборудования, проверку на столкновения с деталями, оснасткой и другим оборудованием, расчет времени цикла, выбор применяемого инструмента и др. Проверенные траектории движения могут экспортироваться в виде программного кода на языке контроллера робота. Для симуляции ручных операций применяется модуль Process Simulate Human, который использует технологию и цифровой манекен Jack.

RobotExpert – программный продукт в составе Tecnomatix, выполняющий трехмерную симуляцию отдельных промышленных роботов или небольших роботизированных комплексов, проводящий оптимизацию траекторий и генерацию УП для роботов. RobotExpert построен на ядре Process Simulate, имеет общий с ним пользовательский интерфейс и аналогичную поддержку форматов данных и контроллеров роботов. В отличие от Process Simulate, предназначен исключительно для работы на файловой системе, без использования PLM-системы управления данными [13].

Для расширения функциональных возможностей имеется открытый программный интерфейс, который позволяет разрабатывать собственные подключаемые модули. Основной функционал пакета совпадает с Process Simulate и включает:

- симуляцию работы по циклограмме;
- анализ статических и динамических столкновений;
- симуляцию кинематики оборудования;
- поддержку технологических процессов на основе траектории;
- анализ достижимости в рабочей зоне робота;
- расчет времени цикла работы (поддерживается технология RRS);
- поддержку различных типов контроллеров промышленных роботов;
- генерацию УП на основе симуляции;
- средства твердотельного моделирования;
- импорт геометрических моделей из основных форматов САПР.

Основные ограничения по сравнению с Process Simulate таковы:

- отсутствуют функции поддержки дискретных процессов (точечной контактной сварки, сверления, клепки);
- не поддерживается управление симуляцией на основе сигналов оборудования;
- отсутствуют дополнительные модули: поддержки манекена человека, виртуальной пуско-наладки и др.

Результат симуляции – проверенные траектории движения – можно экспортировать в виде программного кода на языке контроллера робота.

Аналогами RobotExpert являются программные средства симуляции от изготовителей промышленных роботов: RobotStudio компании ABB, KUKA.Sim Pro от фирмы KUKA, RoboGuide компании Fanuc.

RobotStudio – пакет для моделирования и оптимизации роботизированных ячеек, который позволяет импортировать данные в основных CAD-форматах (IGES, STEP, VRML, VDAFS, ACIS и CATIA). Используя CAD-модель обрабатываемой детали, можно автоматически сгенерировать положение робота, перемещающегося по заданной кривой. Редактор программ (ProgramMaker) генерирует программы для роботов, а также обеспечивает возможность разработки и отладки программ в режиме offline.

В RobotStudio при симуляции программы выбранные объекты автоматически проверяются на столкновения, в результате чего выводится цветовая диаграмма, которая используется для интерактивного изменения параметров и определения необходимого поворота вокруг оси инструмента в каждой конкретной точке по всей траектории движения инструмента.

RobotStudio может обнаруживать сингулярности движений робота и выдавать предупреждение для их предотвращения. Инструмент для отслеживания имитационного моделирования (Simulation Monitor) обеспечивает визуальный контроль оптимизации движений робота. Красными линиями указываются цели, которые можно оптимизировать для получения наиболее эффективной траектории движения манипулятора. Для уменьшения продолжительности рабочего цикла можно оптимизировать скорости и ускорения рабочей точки инструмента (TCP) или отдельных осей.

Для адаптации и расширения функциональности RobotStudio пользователь может создавать макросы на языке VBA.

Написанная для робота программа может без промежуточных трансляций загружаться в систему, благодаря технологии VirtualRobot компании ABB. Ее основой является ABB VirtualController – точная копия программного обеспечения, управляющего роботизированными системами на производстве.

Программа MasterCAM (разработчик CNC Software), дополненная приложением Robotmaster, позволяет осуществлять offline-программирование промышленных роботов известных производителей (KUKA, ABB, Fanuc, Motoman и др.). В системе Robotmaster (создатель приложения jabez technologies) траектория инструмента создается сначала в среде Mastercam по правилам программирования обработки на станках с ЧПУ, после этого она пересчитывается в движения сочленений робота с учетом его кинематики. При симуляции доступна проверка и оптимизация программы. С помощью постпроцессора создаются готовые УП для указанных выше роботов. В программе можно одновременно управлять 11 осями, что недоступно в других пакетах [14].

Получить исходные данные можно из файла CAD-программы в нейтральном формате или с помощью трансляторов данных для файлов IGES, Parasolid, SAT (ACIS solids), AutoCAD (DXF, DWG, и Inventor TM файлы), SolidWorks, Solid Edge, STEP, EPS, CADL, STL, VDA, и ASCII, CATIA, Pro/E.

Встроенные библиотеки конфигураций роботов обеспечивают:

- выбор производителя роботов;
- выбор и назначение операционных параметров: навесного оборудования на манипуляторе, данных о рабочей плоскости и инструментах на навесном оборудовании, параметров для выполнения рабочих и вспомогательных движений, принципа отслеживания положения основной оси инструмента;
- выбор параметров устройств, обеспечивающих дополнительные линейные перемещения и повороты (максимально допустимое количество: три управляемые линейные направляющие и 2-осевой поворотный стол, однако в современных позиционерах осей может быть больше).

Специальные средства Robotmaster позволяют подкорректировать и оптимизировать движение манипулятора, используя возможность поворота инструмента вокруг своей оси. Данный подход позволяет избежать столкновений и следующих критических ситуаций:

- соударение рабочих частей робота и навесного оборудования (между собой, с обрабатываемой деталью, с другими элементами роботизированной ячейки);
- сингулярность (неоднозначность), при которой взаимное положение суставов робота таково, что существует множество решений для обеспечения дальнейшего перемещения;
- поворот сустава на предельно допустимую величину, что исключает дальнейшее движение;
- наличие участков вне зоны досягаемости манипулятора;
- наличие участков траектории, на которых для обеспечения постоянства скорости линейного движения инструмента скорость вращения суставов достигает предельно допустимых значений [15, 16].

В среде Robotmaster создается полномасштабная модель роботизированной ячейки, которая используется для симуляции движения и отладки параметров. При симуляции траектория инструмента отображается пошагово или непрерывно. Доступно ручное управление всеми осями робота. Имеется возможность включать или выключать отображение составных элементов оборудования в ячейке при просмотре.

В Robotmaster встроен постпроцессор, который обеспечивает выпуск УП для конкретного робота. Перед генерацией УП траектория автоматически проверяется на столкновения. Если объем программы превышает максимально допустимый, то она автоматически разбивается на подпрограммы.

Robotmaster может использоваться для специализированных задач, например, получения траекторий для дуговой сварки. Траектории сварки автоматически создаются по CAD-модели с указанием минимального количества параметров для выполнения требуемого шва и правильного положения сварочной головки. Имеются возможности управления наклоном и поворотом сварочной головки для оптимального ведения процесса сварки, автоматического включения или выключения сварочной головки. Управление ориентацией инструмента позволяет оптимизировать УП, изменив вращение суставов манипулятора.

Программное обеспечение Deneb Robotics производит программы виртуального проектирования, виртуального прототипирования и имитации производственных участков и заводов. Возможные виды имитации включают визуализацию, обнаружение столкновений и оценку длительности производствен-

ного цикла. Компанией выпускаются следующие программные продукты: ENVISION (для виртуального проектирования и прототипирования), IGRIP (для проектирования роботов и планирования движения) и ERGO (для имитации и анализа эргономики и человеческого фактора) [17].

Компания SILMA производит серию модулей виртуальной инженерии: SoftAssembly обеспечивает имитацию последовательности сборки, запись оптимальной траектории и визуализацию, выявление столкновений в процессе симуляции; SoftMachine служит для имитации обработки на станке с ЧПУ; CimStation Robotics – для имитации роботизированного производственного участка [19].

Пакет CimStation Robotics (CSR) имеет средства для моделирования различных промышленных робототехнических комплексов (РТК). Он содержит подсистему калибровки, позволяющую скорректировать технологическую программу в соответствии с геометрическими размерами реального комплекса. Имеется также возможность выбрать робота из библиотеки, смоделировать его движения, обнаружить столкновения и сформировать его полную динамическую модель. Для создания пользовательских приложений предусмотрен специальный язык SIL. Имеется также возможность подключать модули, написанные на языке С. Технологическая программа робота создается на языке, совместимом с Karel. Доступны следующие функции: передача данных в форматах IGES/ ACIS; постпроцессирование робота; возможность RRS; обеспечение прямого интерфейса САПР (CATIA / Pro-E и др.); экспорт / импорт ячеек в RobCad; экспорт / импорт ячеек в Delmia [20].

Процесс имитационного моделирования РТК при помощи пакета CimStation основан на анализе вариантов, предлагаемых пользователем. Он имеет более развитые, чем RobCAD средства динамического моделирования манипуляторов, но практически не учитывает технологические особенности реальных производственных процессов. Аналогичными недостатками обладают и пакеты IGRIP, Workspace, GRASP и ROSI.

FAMOS robotic® (Carat Robotic GmbH) – система offline-программирования, которая предназначена для разработки робототехнических систем, установок и технологических процессов. Действует она на базе симулятора EASY-ROB™ Robotics. Пакет позволяет программировать и генерировать траектории движения робота на обрабатываемой детали, оценить доступность рабочего пространства, провести проверку на столкновение с периферийным оборудованием (причем может оценивать зазоры и расстояния до объектов), оценить время технологического процесса. В системе доступна симуляция роботов основных типов. Возможна работа с основными типами CAD-форматов: Step, VDAFS, IGES ACIS SAT и Parasolid XT, файлы ProENGINEER и Wildfire могут использоваться без потерь, доступны фильтры для импорта данных из CATIA V4 и V5, UNIGRAPHICS и др. Пакет работает с трехмерными моделями посредством Drag'n Drop, интегрированным Granite-Kernel от PTC. Сгенерированную траекторию движения робота на обрабатываемой детали можно изменить, используя сдвиг, поворот, зеркальное отображение и т.д. Основные параметры процессов устанавливаются функцией «ЭДИТОР». При работе можно управлять Ю-сигналами и подпрограммами. Для создания УП используются постпроцессоры роботов ABB, b + m, Fanuc, KUKA, STÄUBLI и MOTOMAN [21].

PowerMILL Robot (Autodesk) является специализированной расширенной версией САМ-системы PowerMILL, которая дает возможность комбинировать в одной УП принципы ручного и автоматизированного программирования. Пользователь, задавая последовательность промежуточных положений, может показать в виртуальной среде необходимый принцип перемещения звеньев робота в процессе обработки, а САМ-система автоматически подстроит движения робота под выполняющуюся управляющей программой для конкретной операции обработки. Такой подход востребован, если применяется нестандартная крепежная оснастка или имеются другие геометрические ограничения, которые не удастся полностью учесть на этапе разработки УП. Библиотеки конфигураций роботов такие же, как у Robotmaster, дополнительно имеется функция выбора параметров смены инструмента.

В системе PowerMILL Robot УП проверяется на столкновения. При программировании промышленного робота может оказаться, что ось его кисти ориентирована коллинеарно одной из осей кинематических звеньев. Такая функциональная сингулярность кисти характерна тем, что данное положение кисти робота в пространстве может быть реализовано при помощи широкого диапазона углов поворота его промежуточных звеньев. Возникновение сингулярности кисти робота сопровождается резкими поворотами промежуточных звеньев, что может привести к столкновениям и ухудшить качество обработки. В PowerMILL Robot 2015 реализовано автоматическое предотвращение сингулярности кисти как наиболее часто встречающегося вида сингулярности.

В PowerMILL Robot могут импортироваться управляющие программы, разработанные в других САМ-системах. Импортированные УП используются для компьютерной 3D-визуализации и могут постпроцессироваться под другой тип робота. В PowerMILL Robot имеется непосредственная поддержка на уровне G-кода (команд перемещения) промышленных роботов KUKA, ABB, Fanuc, Yaskawa Motoman, Stäubli, Hyundai, Comau, Kawasaki Robot, Nachi и Universal Robots, что позволяет не использовать программное обеспечение сторонних разработчиков для генерации УП контроллера.

PowerMILL Robot имеет доступ ко всем многоосевым стратегиям обработки, реализованных в PowerMILL. В отличие от пятиосных станков с ЧПУ, промышленные роботы обладают шестью или более степенями свободы. При работе с линейными направляющими и позиционерами, имеющими от одной до пяти осей, задача эффективного синхронного управления всеми осями усложняется. В процессе разработки УП пользователь сначала задает для конкретной детали последовательность обработки, применяя многоосевые стратегии. Затем УП передается в специальный модуль, позволяющий задавать принцип перемещения кинематических звеньев робота с учетом избыточности степеней свободы с точки зрения пятиосевой обработки.

Комплекс цифрового производства DELMIA (Dassault Systemes) предназначен для моделирования отдельных роботов и роботизированных ячеек, станков ЧПУ, измерительных устройств, потоков движения изделий в цехе. При моделировании роботизированных ячеек проводится анализ рабочих зон и проверка на столкновения. Доступна функция генерации программы управления для реального контроллера робота. Модель робота выбирается из библиотеки или создается виртуальная кинематическая модель по аналогии с твердотельным моделированием в пакете CATIA. Модуль IGRIP имеет набор инструментов для конкретных операций, например, выбор траектории при дуговой сварке. Если к движению робота предъявляются особые требования, то имеется возможность расширить стандартные функции, создав собственные макросы и подпрограммы. Предусмотрена возможность коррекции времени рабочего цикла. Имеются также инструменты генерации и контроля синхронных действий нескольких роботов. IGRIP имеет набор инструментов динамического анализа, изменения параметров ПИД-регуляторов, что позволяет провести анализ сил, ускорений и нагрузок звеньев робота [23].

MELFA-Works – расширение к пакету трехмерного CAD-программирования SolidWorks – позволяет моделировать запрограммированные последовательности операций в виртуальной среде, проводить проверку на столкновения между частями системы и оптимизировать перемещения. Траектории перемещений позволяет сохранять в файлах с расширением AVI.

Robotworks – система моделирования движения и программирования роботов, которая также функционирует в SolidWorks. Robotworks 6.5 поддерживает параметрические файлы с расширениями \*.RB4 или \*.RB6, которые используются для твердотельного проектирования роботизированной ячейки и имитации движений робота в 3D-среде. Robotworks позволяет перемещать инструмент, обнаруживать столкновения, отображать фактические общие значения и ограничения, предоставляет рамки для инструментов и пользовательские (базовые) фреймы, работает с большинством импортируемых CAD-поверхностей, считывает координаты выбранной точки XYZ и переводит их на робота, записывает внешние события и инструкции (ввод/ вывод, скорость и т. д.) для каждой точки, записывает собственные файлы для роботов FANUC, ABB, Kawasaki, Motoman, KUKA и STÄUBLI, создает точечные файлы в общей форме для большинства других роботов [24]. Исследование траектории проводится путем изменения углов в сочленениях манипулятора.

В системе автономного программирования ROBOMAX также имитируется движение манипулятора путем импорта исходных данных для роботизированной ячейки и экспорта из нее координат полученной траектории. Система ROBOMAX дополнена программными модулями на языках AutoLisp и C++ и содержит базу данных с файлами описания промышленных роботов. ROBOMAX в отличие от Robotworks имеет встроенный язык программирования SRCL (Siemens Robot Control Language), который позволяет создать технологическую программу для робота на основании импортированных данных о координатах точек рассчитанной траектории.

Отдельные производители создают специализированные программные пакеты для моделирования и программирования своих роботов. Например, программное обеспечение Fanuc RoboGuide предназначено для моделирования, симуляции и оценки работы и времени цикла робототехнических комплексов на базе роботов фирмы Fanuc, написания УП модели робота [25].

ArcWeld PowerPac (AWPP) – дополнение к RobotStudio, которое разработано специально для генерирования программ робота при электродуговой сварке. Приложение содержит набор готовых шаблонов, которые могут быть модифицированы пользователем. VirtualArc прогнозирует и настраивает параметры сварки в режиме offline. Прогнозы из симуляций используются как входные параметры для прогнозирования качества и профиля сварки, дефектов шва.

Пакет программ ROBO-PLAN предназначен для программирования сварочных роботов QIROX® на основе модели САПР для задач сварки. Генерация и адаптация макета системы проводится с помощью модуля ROBO-MOD, объединяющего импортируемые файлы CAD в форматах ACIS, CATIA, PROE, STEP и кинематические модели роботов. Функция MASTER-SLAVE позволяет синхронизировать движение двух роботов. В программе доступно сглаживание сварочных параметров путем плавного изменения до 8 сварочных параметров на отрезке шва заданной длины [22].

Задачи моделирования и оптимизации, которые решают описанные программные пакеты, имеют локальный характер и не исчерпывают всех проблем, возникающих при проектировании.

**3. Языковые средства робототехнических систем.** После компьютерного моделирования и определения оптимальной траектории движения робота ее нужно перевести на язык контроллера реального робота для выполнения технологической программы. Описанные системы автономного программирования имеют функции постпроцессирования и создания УП для роботов на разных языках. Но практически все крупные производители робототехники разрабатывают собственные языки программирования и средства вспомогательного программного обеспечения, что осложняет перенос программы, написанной для одного робота, в контроллер робота другого производителя. Если контроллер робота связан с программируемым логическим контроллером, обеспечивающим взаимодействие робота и периферийного оборудования, то программе потребуется корректировка. Большинство промышленных роботов имеет комплексную программную оболочку, в которую при необходимости интегрируются дополнительные модули расширений, например, модули коммуникаций с внешними сенсорными устройствами: системами видеонаблюдения, замера прилагаемой нагрузки, вращающего момента и т.п. Это позволяет робототехнической системе реагировать на изменение внешних условий. Однако при имитационном моделировании в большинстве систем автономного программирования функции связи с внешними устройствами не отражаются, следовательно, программу робота придется дорабатывать.

Программное обеспечение робототехнических систем состоит из языков разных уровней:

- языки общения человека-оператора с роботом через интеллектуальный интерфейс;
- проблемно-ориентированные языки для описания выполняемых технологических операций в координатах рабочей зоны робота (языки Autopass, LM-GED, Robex и др.);
- роботоориентированные языки для описания движений самого робота (языки MHI, WAVE, MINI, AL, VAL, AML, HELP, PAL, TEACH и др.);
- языки элементарных движений (SIGLA, EMILY, RCL, RPL, ANORAD);
- языки управления отдельными приводами.

Системы управления роботами в составе РТК, работают совместно с другими техническими системами, поэтому к указанным выше добавляются унифицированные промежуточные языки, предназначенные для связывания технологических систем и комплексов, использующих различные языковые средства [26–30].

**Заключение.** По сравнению с программированием в режиме обучения offline-программирование позволяет исключить или минимизировать время остановок робототехнического комплекса для перепрограммирования. С помощью систем автономного программирования и моделирования решаются следующие задачи: оптимизации компоновки оборудования, выбора роботов и инструмента, анализа достижимости роботами расчетных точек, проверки заданного времени цикла, оптимизации траекторий движения робота, перераспределения операций между роботами, анализа статических столкновений роботов с элементами РТК, анализа динамических столкновений в ячейке РТК, калибровки моделей ячеек РТК в соответствии с реальными отклонениями при изготовлении и монтаже оборудования, создания УП для контроллера робота.

Проведенный обзор показал, что виртуальное моделирование и программирование связано с рядом неразрешенных проблем, таких как:

- неполное или неточное моделирование составляющих робота или роботизированной ячейки, что в реальности может приводить к столкновениям и сбоям в работе. Например, CAD-модели не отображают проводки электро-, газоснабжения и в процессе моделирования нужно предугадать, куда они будут перемещаться при движении робота;
- сложность оптимизации траекторий движения по совокупности критериев и с учетом расположения и ориентации рабочего инструмента;
- отсутствие некоторых моделей роботов и позиционеров в базах существующих программных пакетов. Ориентация деталей позиционерами не всегда точно отображается, т.к. отсутствует возможность задавать все скорости движения звеньев позиционера и робота-манипулятора, а управление, как правило, ограничено 6 осями;
- сложность оценки одновременной работы человека, роботов, позиционеров;
- сложность создания и отладки программы для управляющего контроллера робота и общего контроллера для робота и позиционера при синхронном и асинхронном управлении;
- сложности переноса программы из системы автономного программирования в контроллер реальных роботов, связанные с разнообразием языков программирования и с отсутствием симуляции совместной работы робота и внешних систем и датчиков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пакет **AutoCAD** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autodesk.ru>.
2. Tecnomatix Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tecnomatix.com>.



3. Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bentleysoft.ru>.
4. CATIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: (<http://www.catia.ru>).
5. T-flex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tflex.ru>.
6. Pro-technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pro-technologies.ru>.
7. IRONCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ironcad.com>.
8. Solidworks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solidworks.ru>.
9. КОМПАС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kompas.ru>.
10. Обзор различных систем CAD/CAM/CAE/GIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cad.dp.ua/obzors/cads.php>.
11. Промышленные роботы АБВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-1600/irb-1600-cad>.
12. Autodesk Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://manufacturing.autodesk.com/solutions/robotics/index.asp>.
13. RobotExpert [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RobotExpert>.
14. Программное обеспечение Mastercam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mastercam-russia.ru/robotmaster\\_doc\\_128.html](http://mastercam-russia.ru/robotmaster_doc_128.html).
15. Robotmaster 6.5: новый релиз ведущей системы программирования роботов на платформе Mastercam 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cadcamcae.lv/N106/80-84.pdf>.
16. Robotmaster 6.3: новый релиз ведущей системы офлайн-программирования роботов на платформе Mastercam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mastercam-russia.ru/articles/Robotmaster\\_V6.3.pdf](http://mastercam-russia.ru/articles/Robotmaster_V6.3.pdf).
17. Программное обеспечение Deneb Robotics, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.deneb.com>.
18. Программное обеспечение DELCAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.delcam.com](http://www.delcam.com).
19. Программное обеспечение SILMA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silma.com>.
20. Cimsation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ace1.co.uk/cimstation-robotics/>.
21. Famos-robotic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.easy-rob.com/en/product/offline-programming/famos-robotic.html>.
22. Программное обеспечение Robosoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smart2tech.ru/robosoft/robo-plan>.
23. DELMIA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.delmia.ru>.
24. Robotworks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.robotworks-eu.com/products/RBWabout.htm>.
25. FANUC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fanuc.eu/uk/en/robots/accessories/roboguide](http://www.fanuc.eu/uk/en/robots/accessories/roboguide).
26. Программное обеспечение роботов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishi-automation.ru/products/robots-software>.
27. Постпроцессоры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://postprocessor.su>.
28. Козырев, Ю.Г. Промышленные роботы: основные типы и технические характеристики : учеб. пособие / Ю.Г. Козырев. – М. : КНОРУС, 2015. – 560 с.
29. Юревич, Е.И. Управление роботами и робототехническими системами / Е.И. Юревич, – СПб., 2000. – 170 с.
30. Зенкевич, С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : учеб. пособие для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.

Поступила 16.10.2017

**SOFTWARE OF OLP FOR INDUSTRIAL ROBOTS-MANIPULATORS**

**L. LOBOREVA**

*The article gives an overview of the well-known CAD systems and autonomous programming systems for industrial robots that allow creating 3D models, pre-testing by simulation in a virtual environment, optimizing trajectories and algorithms for controlling industrial robots.*

**Keywords:** robot manipulator, CAD, Offline-programming, programming language.