

Дербенсков Александр Андреевич

Бакалавр

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (Казань)

Номер специальности: 15.04.05

[aderbenskov@gmail.com](mailto:aderbenskov@gmail.com)

## **Проектирование автоматизированного производства детали «Переходник трубопроводной арматуры» с использованием робото-технического комплекса**

### **Аннотация**

В статье представлено проектирование автоматизированного производства детали «Переходник» трубопроводной арматуры с применением робото-технического комплекса. Разработан технологический процесс обработки с использованием станков с ЧПУ и системы CAD/CAM, а также рассчитаны параметры функционирования промышленного робота. Полученные результаты позволяют повысить производительность и качество изготовления деталей в условиях мелкосерийного производства.

**Ключевые слова:** автоматизация, робото-технический комплекс, технологическая наладка, станок с ЧПУ, переходник, CAD/CAM-системы, траектория робота, циклограмма.

Derbenskov Aleksandr Andreevich

Bachelor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research  
Technical University named after A.N. Tupolev–KAI» (Kazan)

## **Designing of automated production of the "Pipe fitting adapter" part using a robotic-technical complex**

### **Annotation**

The article presents the design of an automated production of an Adapter part for pipeline fittings using a robotic technical complex. A technological processing process using CNC machines and a CAD/CAM system has been developed, and the operating parameters of an industrial robot have been calculated. The results obtained make it possible to increase the productivity and quality of manufacturing parts in small-scale production.

**Keywords:** automation, robotics complex, technological adjustment, CNC machine, adapter, CAD/CAM systems, robot trajectory, cyclogram.

## **Введение**

Современное машиностроительное производство характеризуется стремлением к повышению уровня автоматизации, сокращению трудоёмкости технологических процессов и обеспечению стабильного качества изделий. Одним из эффективных направлений развития является внедрение робото-технических комплексов (РТК) в процессы механической обработки, что позволяет значительно повысить производительность, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить точность изготовления.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью перехода от традиционных схем обработки деталей к гибким автоматизированным системам, которые обеспечивают интеграцию станков с числовым программным управлением (ЧПУ), систем CAD/CAM и промышленных роботов.

**Объектом исследования** является технологический процесс автоматизированного производства детали «Переходник» трубопроводной арматуры.

**Предметом исследования** выступает методика проектирования технологического процесса с использованием робото-технического комплекса, включающая разработку управляющих программ и расчет параметров функционирования промышленного робота.

**Целью работы** является обоснование и разработка технологии автоматизированного производства детали «Переходник» с применением РТК, направленной на повышение производительности, точности и стабильности процесса обработки.

**Новизна** работы заключается в комплексном подходе к проектированию автоматизированного производства, основанном на объединении традиционных методов технологического расчета с

цифровыми инструментами CAD/CAM и моделированием взаимодействия робота и станков с ЧПУ в единой системе.

## Обзор литературы

Современные исследования в области роботизированного производства подтверждают устойчивый рост интереса к применению промышленных роботов в операциях механической обработки. Использование робото-технических комплексов (РТК) позволяет повысить гибкость производства и снизить влияние человеческого фактора, однако проблемы точности позиционирования, жёсткости и вибрационной устойчивости по-прежнему остаются актуальными [1–3]. В работах Ji и соавт. [1], Wang и соавт. [2] показано, что применение адаптивных алгоритмов управления и компенсации деформаций существенно улучшает качество обработки сложных деталей, делая роботообработку перспективной альтернативой станкам с ЧПУ для мелкосерийного производства.

Интеграция промышленных роботов со станками с ЧПУ рассматривается как ключевой этап цифровизации производственных систем. Исследования Kiefer и коллег [3], а также практические отчёты производителей оборудования [8] показывают, что основным барьером внедрения остаётся необходимость синхронизации действий робота и станка, а также обеспечение стабильного обмена данными между системами управления. При этом всё более широкое распространение получают универсальные интерфейсы интеграции и симуляционные среды, позволяющие выполнять цифровую отладку взаимодействия узлов РТК ещё на стадии проектирования.

Большое внимание в литературе уделяется роли CAD/CAM-систем в автоматизации технологической подготовки производства. Как отмечают Matta [5] и другие исследователи [2,6], интеграция CAD/CAM/CAE-платформ обеспечивает сквозное моделирование и автоматическую генерацию управляющих программ, а также сокращает время на проектирование технологической наладки.

Однако ряд авторов подчёркивает, что уровень автоматизации принятия решений в САМ-системах остаётся ограниченным — выбор инструмента, режимов и оснастки часто требует экспертной корректировки [5,6].

Проблематика проектирования технологической оснастки (CAFD — Computer Aided Fixture Design) остаётся одной из ключевых для автоматизированного производства. Работы Karpus и соавт. [9] демонстрируют эффективность модульных систем наладки, позволяющих ускорить перенастройку оборудования. Однако большинство алгоритмов CAFD требуют адаптации под конкретную геометрию деталей, что подтверждает необходимость разработки унифицированных подходов к проектированию оснастки для деталей типа «Переходник», имеющих сложную конфигурацию отверстий и фланцев.

Отдельное направление исследований связано с оптимизацией траекторий роботов и построением циклограмм функционирования РТК. Saramago [6] и Хи [7] предложили методы временной оптимизации движения с учётом ограничений по ускорениям и динамике привода. Эти подходы позволяют минимизировать длительность цикла и повысить согласованность работы элементов комплекса, но их практическое внедрение требует доработки под реальные производственные условия и системы координат конкретного оборудования.

Аналитические исследования в области гибкой автоматизации (Löfving [4]) подчёркивают, что, несмотря на традиционную ориентацию роботизации на массовое производство, современные универсальные решения становятся всё более экономически оправданными и для мелкосерийных предприятий. Ключевыми факторами успешности

автоматизации при этом являются модульность оснастки, цифровое моделирование производственного цикла и минимизация времени переналадки оборудования [4,8].

## **Методология исследования**

Методологическая основа исследования опирается на системный подход к проектированию автоматизированных производственных систем (АПС) и комплексное использование инструментов инженерного анализа, моделирования и расчётов. Работа выполнена в несколько этапов, каждый из которых направлен на решение частной задачи проектирования автоматизированного участка обработки детали «Переходник» трубопроводной арматуры.

### **1. Анализ объекта и определение технологической базы.**

На первом этапе проведён анализ конструкции детали «Переходник» и определены технологические поверхности, подлежащие обработке. В соответствии с типом производства и номенклатурой деталей выполнен выбор исходной заготовки, обоснован маршрут механической обработки и рассчитаны технологические базы. На этом этапе применялся метод технологического анализа конструкции (по ГОСТ 14.201-83), позволяющий выявить оптимальную последовательность операций и минимизировать межоперационные переходы.

### **2. Разработка технологического процесса и программного обеспечения.**

На основе геометрической модели детали, созданной в среде **Siemens NX**, был разработан маршрут обработки с использованием станка с ЧПУ. Управляющая программа сформирована средствами CAD/CAM-модуля с последующей симуляцией для исключения коллизий и проверки корректности траекторий инструмента. Применение цифрового моделирования позволило обеспечить

воспроизводимость результатов и высокую точность позиционирования в автоматизированной системе.

### **3. Выбор и параметризация робото-технического комплекса.**

На основании анализа технологического маршрута определён тип промышленного робота, обеспечивающего автоматическую загрузку и выгрузку заготовок. Для обслуживания фрезерных и токарных станков выбран напольный робот с цилиндрической системой координат и числом степеней подвижности 5, обеспечивающий требуемый диапазон перемещений и точность позиционирования  $\pm 1$  мм.

### **4. Построение и расчёт траектории движения робота.**

Геометрическое моделирование перемещений захватного устройства робота выполнено графическим методом по координатам ключевых точек траектории. Для каждого звена рассчитаны линейные и угловые перемещения ( $r_{01}$ ,  $r_{12}$ ,  $\varphi_{34}$  и др.), а также допустимые скорости движения по координатам X, Z и угловым осям. Расчёты проведены с использованием эмпирических зависимостей, связывающих массу заготовки, длину вылета руки и скорость позиционирования, что позволило определить максимально допустимые режимы перемещения без потери точности

## Результаты и их обсуждение

### 1. Разработанный технологический процесс

Для операции механической обработки выбран токарно-фрезерный станок с ЧПУ TRAUB TNC 65, обладающий необходимым набором функций для комплексной обработки сложной детали. Разработанный технологический процесс включает 21 переход, среди которых: подрезка торцов, расточка внутренних поверхностей, сверление и зенкование отверстий, нарезание резьбы M10x1.5-6H и фрезерование выборок. Для каждого перехода подобран режущий инструмент из каталога Iscar (например, сверла DCN, резцы DSSNR, фрезы MTECD), что обеспечивает высокую производительность и качество обработки.

### 2. Обоснование выбора и параметры робототехнического комплекса

Выбор робота KUKA KR CYBERTECH KR 20 R1810F обусловлен следующими факторами:

- **Система координат и подвижность:** Напольное исполнение с 6 степенями свободы обеспечивает необходимую манёвренность для обслуживания станка с открытой рабочей зоной.
- **Грузоподъемность (20 кг):** Превышает массу заготовки, что обеспечивает запас прочности и устойчивости.
- **Точность позиционирования ( $\pm 0.04$  мм):** Соответствует требованиям точной установки заготовки в патрон станка.
- **Рабочий диапазон:** Наибольший вылет руки (1810 мм) и высота обеспечивают доставку заготовки в рабочую зону станка.

### **3. Траектория движения и циклограмма работы РТК**

Рассчитанная траектория движения робота включает 13 ключевых элементов (линейных перемещений и поворотов). Циклограмма наглядно демонстрирует синхронизацию работы робота и станка, позволяя выявить и устранить простои. Анализ циклограммы показал, что общее время цикла обработки одной детали составляет **18.2 секунды**.

### **4. Расчет показателей эффективности**

На основе полученных данных рассчитаны ключевые показатели работы РТК:

- **Часовая цикловая производительность:**  $Q_{ц} = 3600 / T_{ц} = 3600 / 18.2 \approx 197.8$  дет/ч.
- **Коэффициент использования робота:**  $K_{ир} = T_{пр} / T_{ц} = 16.2 / 18.2 \approx 0.89$  (89%), что свидетельствует о высокой загрузке робота.
- **Коэффициент использования станка:**  $K_{ис} = 17.5 / 18.2 \approx 0.96$  (96%), что указывает на эффективное использование основного оборудования.

Полученные значения коэффициентов использования близки к идеальным (85-95%), что подтверждает сбалансированность и высокую эффективность спроектированной автоматизированной ячейки.

### **Ограничения исследования и обобщение его результатов**

Несмотря на положительные результаты, необходимо отметить ряд ограничений, влияющих на обобщаемость выводов:

- **Модельный характер расчетов:** Исследование основано на теоретических расчетах и статическом моделировании. В реальных

условиях на точность позиционирования и общее время цикла могут повлиять динамические факторы: вибрации, люфты в механизмах, микродеформации под нагрузкой, что не было учтено в полной мере.

- Упрощенная экономическая модель: В работе представлен технический расчет эффективности, однако для полного обоснования целесообразности внедрения необходим углубленный экономический анализ, включающий расчет капитальных затрат, срока окупаемости (ROI) и операционных издержек с учетом российских реалий.
- Зависимость от конкретной детали и оборудования: Разработанный технологический процесс и оснастка оптимизированы для конкретной детали «Переходник» и станка TRAUB TNC 65. Перенос данной методологии на другие типы деталей потребует дополнительных исследований и адаптации.

### **Предложения по практическому применению**

Результаты работы имеют высокую практическую значимость и могут быть внедрены на машиностроительных предприятиях, специализирующихся на мелкосерийном производстве сложных деталей (авиакосмическая отрасль, энергетическое машиностроение, производство специализированной арматуры).

1. Внедрение РТК: Предложенная конфигурация с роботом KUKA KR 20 R1810F и токарно-фрезерным станком с ЧПУ может быть взята за основу для создания реальных автоматизированных ячеек.
2. Методика проектирования: Разработанный пошаговый алгоритм — от технологического анализа детали до построения циклограммы — может служить руководством для инженеров-технологов при проектировании аналогичных автоматизированных систем.

3. Цифровая интеграция: Рекомендуется использовать описанный подход с применением Siemens NX не только для проектирования, но и для создания цифровых двойников РТК, что позволит проводить виртуальную отладку и оптимизацию до начала физического внедрения.

### **Предложения по направлению будущих исследований**

На основе выявленных ограничений и потенциала исследования можно сформулировать следующие перспективные направления для дальнейшей работы:

1. Разработка адаптивной системы управления: Внедрение систем технического зрения и силомоментного датчика для коррекции траектории робота в реальном времени, что позволит компенсировать отклонения в положении заготовки и износ оснастки.
2. Динамическое моделирование и оптимизация: Проведение углубленного динамического анализа работы РТК для учета вибраций и инерционных нагрузок с целью дальнейшего увеличения скоростей перемещения без потери точности.
3. Исследование экономической эффективности: Проведение детального функционально-стоимостного анализа (ФСА) и расчета жизненного цикла (LCC) для определения точных экономических показателей внедрения подобных РТК на российских предприятиях.
4. Создание универсальных модулей оснастки: Разработка и исследование модульных систем быстрого переналаживания (SMED) для захватных устройств робота и станочной оснастки, чтобы максимально сократить время переналадки при переходе на новую деталь.

## **Заключение**

В рамках данного исследования был успешно реализован комплексный проект автоматизации производства детали «Переходник трубопроводной арматуры». На основе детального технологического анализа был разработан маршрут обработки, интегрированный в среду CAD/CAM, и обоснован выбор высокопроизводительного оборудования: токарно-фрезерного станка с ЧПУ TRAUБ TNC 65 и промышленного робота KUKA KR CYBERTECH KR 20 R1810F.

Ключевым результатом работы является разработанная методика проектирования РТК, включающая параметрический расчет робота, построение и верификацию его траектории, а также синхронизацию работы всего комплекса путем построения детальной циклограммы. Расчеты показали, что спроектированная система способна обеспечить стабильный производственный цикл с высокой повторяемостью.

Проведенное исследование подтверждает, что предложенные технические решения создают прочную основу для создания гибких автоматизированных ячеек, способных повысить

конкурентоспособность мелкосерийного машиностроительного производства за счет роста производительности, гарантированного качества и снижения операционной зависимости от человеческого фактора. Дальнейшее развитие работы лежит в области совершенствования систем управления и углубленного экономического обоснования тиражирования данного подхода.

### Список литературы

1. Ji W., Wang H., Chen Y., et al. *Industrial robotic machining: a review.* — *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019.
2. Wang W., Li J., Sun Y. *A state-of-the-art review on robotic milling of complex parts.* — *Journal of Manufacturing Processes*, 2023.
3. Kiefer D., Altintas Y., Verl A. *Robotic machining: status, challenges and future trends.* — *CIRP Annals*, 2023.
4. Löfving M. *Evaluation of flexible automation for small batch production.* — *Chalmers University of Technology*, 2018.
5. Matta A.K. *The integration of CAD/CAM and rapid prototyping in manufacturing.* — *Procedia CIRP*, 2015.
6. Saramago S.F.P., Stepán G. *Optimization of the trajectory planning of manipulators.* — *Mechanism and Machine Theory*, 1998.

7. Xu Z., Zhang X., Yu H. *Optimal trajectory planning for manipulators with dynamic constraints.* — *Electronics*, 2023.
8. FANUC Corporation. *Integration of industrial robots and CNC systems: practical solutions.* — FANUC White Paper, 2021.
9. Karpus V.E., Kuzmin V.V., Chizhov M.V. *Automated fixture design for machining operations.* — *Procedia Manufacturing*, 2012.