

## ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

*Киприянов Кирилл Васильевич, ассистент, Университет ИТМО, Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, e-mail: [142739@niuitmo.ru](mailto:142739@niuitmo.ru)*

*Падун Борис Степанович, к.т.н., доцент, Университет ИТМО, Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, e-mail: [bsp.tps.ifmo@mail.ru](mailto:bsp.tps.ifmo@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматривается методика построения автоматизированной производственной системы изготовления высокоточных оптических изделий с применением современного оборудования на основе анализа и унификации конструкции и технологии изготовления изделия. Работа, адаптация и мобильность поведения автоматизированной производственной системы поддерживается программными системами управления технологическим оборудованием, проектирования технологических процессов изготовления деталей и сборки изделия, анализа незавершенного производства, коррекции управляющих программ изготовления деталей, складского учета. Между компонентами автоматизированной производственной системы организованы материальные и информационные связи, позволяющие рассматривать производственную систему как киберфизическую систему, а компоненты – как агенты, которые общаются между собой по правилам технологии общения интернет-вещей. Описана организация программной среды, поддерживающей функционирование автоматизированной производственной системы в нормальном, переходном и аварийном состоянии при интеграции процессов сборки изделия, механической обработки заготовок и подразделениями управления качеством. Проектирование программных и информационных систем осуществлялось так, чтобы в условиях отсутствия полных знаний о действиях по изготовлению деталей и сборке изделия

обеспечивать качественное функционирование производства. Поэтому взаимодействие компонентов автоматизированного производства реализуется на высоких уровнях управления как взаимодействие «сильных» интеллектуальных агентов, а на нижних уровнях управления – как взаимодействие «слабых» интеллектуальных агентов.

**Ключевые слова:** прогнозирование, алгоритм, фильтрация, технически сложные объекты.

## **INDUSTRIAL CYBER PHYSICAL SYSTEM FOR OPTICAL DEVICE MANUFACTURING**

*Kipriianov Kirill, assistant, ITMO University, Russia, 197101, Saint Petersburg, Kronverksky pr., 49, e-mail: [142739@niuitmo.ru](mailto:142739@niuitmo.ru)*

*Padun Boris, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, ITMO University, Russia, 197101, Saint Petersburg, Kronverksky pr., 49, e-mail: [bsp.tps.ifmo@mail.ru](mailto:bsp.tps.ifmo@mail.ru)*

**Abstract.** Article tells about technic of creating automated production system for manufacturing of precision optical devices. It uses modern equipment and based on analyses and unification of constructions and processes of device manufacturing. Work, adaptation and mobility of the automated production system are supported by software systems that control equipment, design manufacturing and assembling processes, analyze unfinished assemblies, perform corrections on plc-programs and manages storage. Components of automated production system have physical and information connections that makes this system - cyber-physical system. Parts of this system can be called agents that works by rules of internet of things. Article describes scenarios how to maintain functioning of the production system in stable, unstable and emergency states with integration of manufacturing, assembling processes and quality managing. Software components and information links designed to be able perform their goals in uncertainty conditions with required quality. Different types of component interactions achieve it. On high-control level, they interact as strong intelligent agents, but on low-control level, they interact as weak intelligent agents.

**Keywords:** forecasting, algorithm, filtering, technically difficult objects.

**Актуальность.** В оптической промышленности сложилась ситуация, когда функциональная точность прибора на порядок превышает возможности обрабатывающего оборудования отдельных деталей. Проблема состоит в том, что для достижения заданного качества изображения надо обеспечить точное взаимное расположение оптических осей разных оптических деталей и обеспечить рассчитанные воздушные промежутки между оптическими элементами. Для решения этой проблемы конструкторы вводят специальные компенсаторы, а технологи применяют специальное оборудование, которое предполагает обработку уже собранных узлов. Первое приводит к снижению производительности и увеличению себестоимости изготовления оптических изделий, второе – к потере качества изделия или к увеличению незавершенного производства, т. е. к увеличению себестоимости.

Решить проблему можно внедрением информационных технологий в процесс изготовления оптических изделий или созданием принципиально новой технологии изготовления оптических изделий, либо и тем и другим одновременно. Предлагаемый вариант должен позволять добиться требуемого качества изделий при наименьшей себестоимости и высокой производительности при выпуске изделий небольшими партиями и тиражироваться на различные изделия и производственные условия. Ниже будет рассматриваться первый вариант решения проблемы.

**Сборка микрообъективов.** Первоначально была поставлена задача: исследовать

сборку микрообъективов (МО) и построить прототип будущей автоматизированной линии сборки (АЛС) МО [1 - 3].

*Первый шаг* – проектирование технологической системы АЛС МО. Опираясь на основы организации группового производства [4], работы проводились по следующей схеме [5].

1) анализ и унификация конструкций МО. Была создана модель универсального (базового) МО, который можно адаптировать к любому варианту его исполнения путем незначительного изменения комплектующих его деталей и узлов, а также разработан ряд деталей и узлов, входящие в унифицированный ряд МО;

2) анализ и унификация технологических процессов сборки МО. Были разработаны типовые технологические процессы и типовые компоненты типовых технологических процессов;

3) проектирование станций АЛС. На основе типовых компонентов технологических процессов были определены состав и назначение станций, выбраны или разработаны оборудование и технологическая оснастка, разработаны системы управления станциями.

Станции проектировались так, чтобы можно было провести подналадку этих станций для выпуска любого объектива из сформированного ранее ряда.

*Второй шаг* – обеспечение качества изображения МО. Для обеспечения качества изображения необходимо выдерживать воздушные промежутки между оптическими деталями. Это достигается согласованием размеров сборочных единиц (например, «линза в оправе»), деталей (например, втулками) и, в случае необходимости, компенсаторами (например, прокладными кольцами). Подбор комплектующих для конкретного собираемого МО обеспечивается:

1) двумя дополнительными станциями измерений: станцией измерения оптических деталей и станцией измерения неоптических деталей и узлов «линза в оправе»;

2) разработкой системы автоматизированного проектирования виртуальной сборки МО, с помощью которой подбираются детали для сборки конкретного МО;

3) введением в АЛС стационарного склада (промежуточного накопителя), в котором накапливаются измеренные и скомплектованные оптические и неоптические детали и узлы.

Система автоматизированного проектирования виртуальной сборки МО пользуется данными, которые хранятся в базе данных. Все станции АЛС выполняют стохастические процессы.

*Третий шаг* – организация материальной связи между станциями. Для обеспечения материальной связи в АЛС вводятся:

1) система автоматизированного проектирования технологических процессов сборки конкретных МО на АЛС. Технологические процессы формируются из типовых компонентов;

2) система моделирования одновременно выполняемых на АЛС технологических процессов. Эта система должна согласовывать по времени выполнения технологические процессы сборки конкретных МО, которые выполняются одновременно на технологическом оборудовании. Каждому типовому компоненту технологического процесса поставлен в соответствие типовой компонент модели. Следовательно, конкретная модель технологического процесса сборки МО формируются из типовых компонентов моделей [6]. Моделирование позволяет избежать тупиковых ситуаций;

3) транспортные линии и робот-штабелёр, которые соединяют станции материальными потоками;

4) автоматизированная система управления технологической системой (АСУ ТС) АЛС МО;

Все данные, необходимые для функционирования система автоматизированного проектирования и моделирования и АСУ ТС организуются в единый в банке данных АЛС МО.

*Четвертый шаг* – проектирование программного обеспечения станций. Для функционирования технологической системы станции АЛС разрабатываются:

- 1) диспетчеры, обеспечивающие управление программным обеспечением станции;
- 2) программные компоненты приёма и анализа сообщений, поступающих на станцию;
- 3) программные компоненты формирования сообщений о нормальном или аварийном завершении процессов, а также заданий для доставки новых объектов (деталей или пустых тар) на станцию или съёма тар со станции;
- 4) программные компоненты управления оборудованием, необходимые для выполнения предписанных технологических процессов. Программные компоненты привязаны к типовым технологическим процессам, а типовые технологические процессы к типовым компонентам технологического оборудования. Поэтому для станций создается библиотека типовых программных процедур, которые используются на различных станциях;
- 5) программные компоненты предсказания, обнаружения и ликвидации тупиковых или предаварийных ситуаций;
- 6) программные компоненты распознавания аварийных ситуаций.

Программное обеспечение станции позволяет ей автономно работать по полученному заданию и общаться с АСУ ТС по мере необходимости.

*Пятый шаг* – организация информационной связи между компонентами АЛС (станциями, транспортными линиями, программными системами). Для обеспечения информационной связи в АЛС используются стандартные протоколы и универсальные средства, обеспечивающие возможность обмена информационными сообщениями между элементами сетевых систем независимо от конкретных разработчиков этих систем, применяемого оборудования и области применения [7 - 10].

*Шестой шаг* – уменьшение объёма незавершенного производства. Применение при сборке метода виртуальной сборки [5] может привести к увеличению объёма незавершенного производства. Для снижения объёма незавершенного производства было предложено использовать метод адаптивно-селективной сборки [11], который состоит в том, чтобы во время сборки оценивать собираемость поступающих деталей и оперативно по результату анализа корректировать поля допусков изготовления неоптических деталей на оборудовании механических цехов.

*Седьмой шаг* – выход из аварийных ситуаций. Для восстановления работоспособности АЛС после возникновения не фатальной аварийной ситуации предусмотрена специальная система — автоматизированная система управления анализом состояния технологической системы после аварийного отключения энергии (рисунок 1).

Модель технологической системы показана на рисунке 2.

**Интеграция сборки и механической обработки.** Как показали исследования, применение метода адаптивно-селективной сборки для интеграции управления сборочным и механическим производствами при выпуске изделий небольшими партиями неэффективно. Этот метод предполагает, что все детали, поступившие на сборку и от которых зависит функциональная точность, измеряются и строятся законы распределения размеров [11]. Но для этого необходимо накопить статистику на достаточно большом количестве деталей, которое не совместимо с малыми партиями деталей.

Предлагается использовать принципиально новую организацию механического и сборочного производства, которую назовем организацией перспективного прогноза [12]. В этом случае функционирование технологической системы механического и сборочного производств строится так, чтобы стало возможным на основе анализа функционирования

оборудования механического производства построить зависимости изменения его свойств. При этом оценивается поведение оборудования во время изготовления разных изделий. Следовательно, можно во время работы механического оборудования через определенные интервалы времени корректировать программу обработки не дожидаясь данных, поступающих от сборки по обратной связи. Как мы видим, здесь обеспечивается интеграция САПР и управления технологическими процессами механического и сборочного производств (рисунок 3).

Доставка комплектующих из механических цехов на АЛС обеспечивается интеллектуальными мобильными складами.

**Интеграция производственных процессов.** В Университете ИТМО накоплен большой опыт по комплексному решению производственных задач, по формализации и автоматизации принятия решений, автоматизации технологических процессов, унификации объектов и средств производства, специализации производственных подразделений, повышению производительности труда и т.д. Разработаны инструментальные средства САПР и АСУ ТП, теоретические положения и программные системы организации группового производства и проектирования технологических процессов.

На основании имеющегося опыта ведется работа по созданию интегрированной системы, в которой совместно рассматриваются процессы проектирования и изготовления изделий, а также выполняется адаптация не только автоматизированных систем подготовки производства (конструкторской (АСКПП), технологической (АСТПП) и организационной (АСОПП)), но и управление процессами развития текущих и проектируемых технологических процессов в зависимости от состояния технологической системы и изготавливаемого изделия (рисунок 4).

**Основные результаты проекта.** Исследования ещё раз показали, что основой проектирования и эффективной эксплуатации производственной киберфизической системы является анализ и унификация конструкций изделий и технологических процессов. Формирование типовой и быстроперенастраиваемой технологической оснастки позволяет быстро переходить к изготовлению изделий одной группы. Типовые компоненты технологических процессов обеспечивают унификацию моделей дискретных систем и программных компонентов. Применение универсального метода синтеза [13, 14] позволило проектировать их типовых элементов технологические процессы, дискретные модели и программы управления, что позволяет оперативно перейти не только к изготовлению другого изделия, но и к новым производственным ситуациям.

Проект АЛС МО ещё раз подтвердил правило: эффективная поддержка производственной киберфизической системы, как и группового производства, при частой сменяемости изготавливаемых изделий при обслуживании стохастической внешней среды возможны только при использовании систем автоматизированного проектирования ТПП, где функции анализа, унификации и проектирования технологических процессов и оснастки, моделей и программ реализуются с помощью информационных технологий.

Технологическая система АЛС МО рассматривается, в общем случае, как пятиуровневая система. Четвертый уровень – это уровень всей технологической системы АЛС МО, где рассматривается взаимодействие двух зон, стационарного склада и внешней среды. Это самый старший уровень. Материальные потоки между указанными компонентами мало предсказуемы. Поэтому во время сборки (для обеспечения высокой эффективности функционирования АЛС и даже сохранения работоспособности) возникает необходимость оперативно менять объёмы и направление материальных потоков. Для оценки новых ситуаций используются специальные программы, которые, в случае необходимости, меняют технологические процессы сборки. Третий уровень – это уровень зоны, на котором организуется взаимодействие станций. Из-за временной неопределенности работы станций возникают ситуации, когда изменяются пути движения тар с деталями и узлами. Второй уровень – это уровень станции, где выполняются технологические операции

по сборке. Из-за временной неопределенности выполнения сборочных действий необходимо некоторых действия задерживать или менять их последовательность, что выполняется программой «диспетчер» с использованием специальных данных или датчиков. Первый уровень – это уровень конкретного технологического оборудования. На этом уровне выполняются ожидаемые действия исключительно по заданным данным. Нулевой уровень – это элементов технологического оборудования, который работает точно по заданным данным. Это самый младший уровень.

Проведенный анализ показал, что программные средства АЛС не всегда обладают полными знаниями о действиях по сборке. Поэтому в некоторых случаях необходимо менять выполняемые сборочные действия либо одним программным компонентом самостоятельно, либо при взаимодействии с другими программными компонентами. Таким образом, на четвертом, третьем и втором уровнях реализуется взаимодействие «сильных» интеллектуальных агентов, а на первом и нулевом уровнях – взаимодействие «слабый» интеллектуальных агентов [15, 16].

Вычислительный процесс при безаварийном функционировании выполняется либо АСУ ТП, либо САПР технологической подготовки линии сборки (рисунок 1). Управляющая роль между этими системами в зависимости от ситуации меняется. При решении задач по проектированию и оптимизации технологических процессов сборки она закреплена за САПР, а при решении задач изменения поведения АЛС при сборке — за АСУ ТП.

Интеграция сборки и механической обработки, которая обеспечивается методом адаптивно-селективной сборкой или методом перспективного прогноза, повышает важнейшие свойства производственных киберфизических систем — оперативную адаптивность (или иначе, гибкость) и эффективность производства.

**Заключение.** Интеграция производства с применением автоматизированных систем его подготовки обеспечивает достаточный уровень интеллектуализации всех процессов, что является базой для создания самоорганизующейся системы, которая может находить оптимальные решения задач без внешнего вмешательства. Кроме этого производственная система приобретает способность к самовосстановлению и обладает высокой устойчивостью к сбоям, благодаря достаточному запасу компонентов и самоорганизации.

Особо следует отметить, что для повышения переносимости систем с одного предприятия на другое необходимо создавать специальную программную среду проектирования и развития производственных киберфизических систем.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Latyev S.M., Padun B.S. Яблочников Е.И., Theska R., Zocher K.-P. Laboratorium zur automatisierten Montage von Mikroskopobjektiven./ Workshop «Flexible»/ Technische Universität Ilmenau Труды 53 итернационального научного коллоквиума 8.-12.09.2008/ - TU Ilmenau, 2008, p. 5-8.
2. Латыев С.М., Падун Б.С., Воронин А.А., Смирнов А.П., Фролов Д.Н., Табачков А.Г. Учебно-научная лаборатория автоматизации сборки микрообъективов/ Сборник трудов, том 1. Международная конференция «Прикладная оптика – 2008». - Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008 г. - p. 81
3. Латыев С.М., Смирнов А.П., Воронин А.А., Падун Б.С., Яблочников Е.И., Фролов Д.Н., Табачков А.Г., Тезка Р., Цохер П. Концепция линии автоматизированной сборки микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов/ Оптический журнал, том 76, № 7, июль 2009. - С 79-83.
4. Митрофанов С.П. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. - Л.: Машиностроение, 1976. - 712 с., с ил.
5. Падун Б.С., Латыев С.М. Интегрированная система автоматизации сборки микрообъективов // Приборостроение, № 8, август 2010. С. 35-39.
6. Алиев Т.И., Падун Б.С. Оптимизация процессов сборки микрообъективов//

Приборостроение, № 8, август 2010. С. 39-46.

7. Разработка рекомендуемых систем на основе интеллектуальных пространств. Учебное пособие для студентов математических и технических специальностей вузов/ А.М. Кашевник, Д.Ж. Корзун, С.И. Баландин, А.В. Пономарев – Петрозаводск, Изд-во «ПетрГУ», 2015.- 71 с.

8. Kashevnik A.M., Teslya N., Padun B.S., Kipriyanov K., Arckhipov V. Industrial Cyber-Physical System for Lenses Assembly: Configuration Workstation Scenario // Proceedings of the 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT - 2015, pp. 62-67

9. Kashevnik A., Teslya N., Yablochnikov E., Arckhipov V., Kipriyanov K. Hybrid Automated Line Workstations Interaction Scenario for Optical Devices Assembly // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association FRUCT - 2016, pp. 92-99

10. Kashevnik A., Teslya N., Yablochnikov E., Arckhipov V., Kipriyanov K. Development of a prototype Cyber Physical Production System with help of Smart-M3 // 42nd Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 2016 - 2016, pp. 4890-4895

11. Zocher K-P. Adaptive und Selektive Montage in der flexiblen Fertigung // Informationsmaterial TU Ilmenau. 2002. Februar. S. 423-424.

12. Падун Б. С. Взаимодействие процессов механического и сборочного производства // Изв. Вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 12-15.

13. Технологическая подготовка гибких производственных систем/С.П.Митрофанов, Д.Д.Куликов, О.Н.Миляев, Б.С.Падун; Под общей ред. С.П.Митрофанова. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд.-ние, 1987. - 352с., ил.

14. Падун Б. С., Киприянов К. В., Шеманаев А. С. Метод синтеза технологических процессов изготовления изделий // Приборостроение, № 4, апрель 2015. С. 289-293.

15. Petrie C. «What is an agent?» // Intelligent Agents III. Proc. of ECAI-96 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ALAL, Budapest, The Hungary, August 12-13, 1996)// Ed. by J.-P. Muller, M. Wooldridge, N. Jennings. - Berlin: Springer Verlag, 1996. - P.41-43.

16. Wooldridge M., Jennings N.//«Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey//Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages//Berlin: Springer Verlag, 1995. – P. 1-22