

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ "ИНДУСТРИЯ 4.0"

**Шахнов В.А.,
Курносенко А.Е.**

Кафедра проектирования и технологии производства электронных устройств
Московский государственный технический университет им. Баумана
г. Москва

Аннотация. Работа посвящена разработке подхода к созданию цифровой модели производства электронной аппаратуры, объединяющей конструкторскую информацию об изделии и технологическую информацию о его производстве. Общая задача декомпозирована на последовательность подзадач, для решения каждой из которых предложен программный модуль из состава существующих систем подготовки и оптимизации производства.

Ключевые слова: цифровая трансформация промышленности, индустрия 4.0, цифровой двойник, электронная аппаратура, система подготовки производства.

MODELING OF DIGITAL PRODUCTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT WITHIN THE CONCEPT OF "INDUSTRY 4.0"

**Shakhnov V.A.,
Kurnosenko A.E.,**

Department of Design and Production Technology of Electronic Devices
Moscow State Technical University Bauman
Moscow, Russia

Annotation. The work is devoted to the development of an approach to creating a digital model for the production of electronic equipment, combining design information about a product and technological information about its production. The general task is decomposed into a sequence of subtasks, for the solution of each of which a software module is proposed from the existing training and optimization systems.

Keywords: digital transformation of industry, industry 4.0, digital double, electronic equipment, production preparation system.

Электронное приборостроение – одна из важнейших отраслей современной промышленности, отличающаяся высокой динамикой происходящих изменений, жесткой конкуренцией, насыщенностью современными технологиями, постоянным сокращением сроков выхода на рынок новой продукции. В такой среде значительно возрастает роль не только сугубо технологических, но также управленческих, экономических, социально-психологических знаний и решений [1]. Чтобы реализовать конкурентные преимущества, отраслевому предприятию необходимо рассматривать процессы технико-экономического анализа рынка, разработки технического задания, проектирования, подготовки производства, изготовления, сбыта, эксплуатации, технического обслуживания и утилизации изделия не как изолированные этапы, но как составляющие жизненного цикла продукции (PLM – Product Lifecycle Management), объединенные двунаправленными связями – потоками данных, материально-

логистическими цепочками и пр. Такой подход можно реализовать в рамках современной концепции цифровой трансформации промышленности [2], проведя цифровизацию указанных составляющих жизненного цикла – составив математические, физические и имитационные модели объектов с соответствующими наборами параметров, входами/выходами, управляющими воздействиями, критериями, ограничениями и переменными оптимизации. На основе этих моделей возможно проведение процедур имитационного моделирования, прогнозирования характеристик, отбора перспективных вариантов, оптимизации параметров как самого изделия, так и средств и механизмов его производства и прочих составляющих жизненного цикла, без необходимости проведения дорогостоящих испытаний опытных образцов, натуральных экспериментов и внесения дорогостоящих изменений в уже сформированную производственную, сбытовую, сервисную и пр. инфраструктуру.

Еще десятилетие назад была распространена точка зрения, что для решения перечисленных выше задач достаточно создать цифровую модель изделия – объекта проектирования/производства. Такой подход позволял эффективно решать задачи конструкторского проектирования (CAD) и инженерного анализа (CAE) и частично – задачи подготовки производства (CAM), в основном – машиностроительного, ориентированного на операции литья, штамповки, обработки резанием и пр. Связь с производством при таком подходе реализуется в виде однонаправленного процесса, позволяющего лишь оценить, насколько данное изделие подходит для встраивания в уже сложившуюся производственную структуру. Гибкая переналадка, адаптация, вариативность производства здесь существенно ограничены.

Специфика производства электронной аппаратуры (ЭА) в части модулей на печатных платах и блоков предусматривает большое количество сборочных операций с созданием неразъемных соединений пайкой, сваркой, склеиванием и т.д., многономенклатурный мелко- и среднесерийный характер производства, быструю переналадку на выпуск новых изделий, широкий набор автоматизированного сборочного оборудования, объединенного в технологические линии и гибкие производственные участки [3], определенную долю ручных операций сборки, контроля и ремонта. Чтобы учесть эту специфику необходимо, помимо цифровой модели изделия, также обладать и цифровой моделью производства с учетом всех его технико-экономических аспектов – оборудования, оснащения, персонала, комплектующих, технологических процессов и маршрутов, материально-логистических потоков в пределах участка/склада, показателей производительности, точности, безотказности, минимизации времени переналадки, вынужденных простоев оборудования, оптимизации технологических маршрутов, количества обслуживающего персонала и т.д.

Такой претерпевающий изменения «цифровой двойник» (Digital Twin) реального производства лежит в основе современной концепции Индустрии 4.0 (Industry 4.0), предполагающей внедрение различных киберфизических систем в производственные структуры. При этом одним из ведущих факторов эффективного развития становится экономический и социальный аспекты управления в тесной связи с предметными и операционными техническими знаниями [4 – 9].

Объединение моделей изделия, технологических процессов и производства в рамках единой комплексной структуры представлено на рисунке 1.

Цель работы – разработка подхода к созданию цифрового производства ЭА с выделением подсистем, решающих частные задачи информационного наполнения, имитационного моделирования и оптимизации указанного производства.

Методы решения. Общая задача создания цифровой модели производства ЭА сложна, объемна и содержит ряд взаимозависимых параметров. Предлагаемый подход

предусматривает ее декомпозицию на последовательность частных подзадач, каждая из которых будет решаться с помощью существующего программного модуля. При этом каждый из производственных компонентов жизненного цикла находит свое отражение в единой информационно-управляющей производственной инфраструктуре, что обеспечивает информационную прозрачность, воспроизводимость, управляемость и надежность всей производственной системы в целом [6].

Для реализации подхода необходима единая среда автоматизированного проектирования, моделирования и подготовки производства, объединяющая приведенные выше модели в едином информационном поле. Анализ рынка САПР и PLM-систем показал, что в качестве такой среды может выступить система Tecnomatix компании Siemens PLM, работающая под управлением PLM-системы Teamcenter [10, 11]. Это модульная система, декомпозирующая задачу создания цифрового производства на ряд подзадач, решаемых индивидуальными модулями [12]. Выделим набор подзадач, специфичных для сборочного производства ЭА (см. рисунок 2). Рядом с соответствующими задачами на рисунке отмечены модули системы Tecnomatix, отвечающие за их решение.

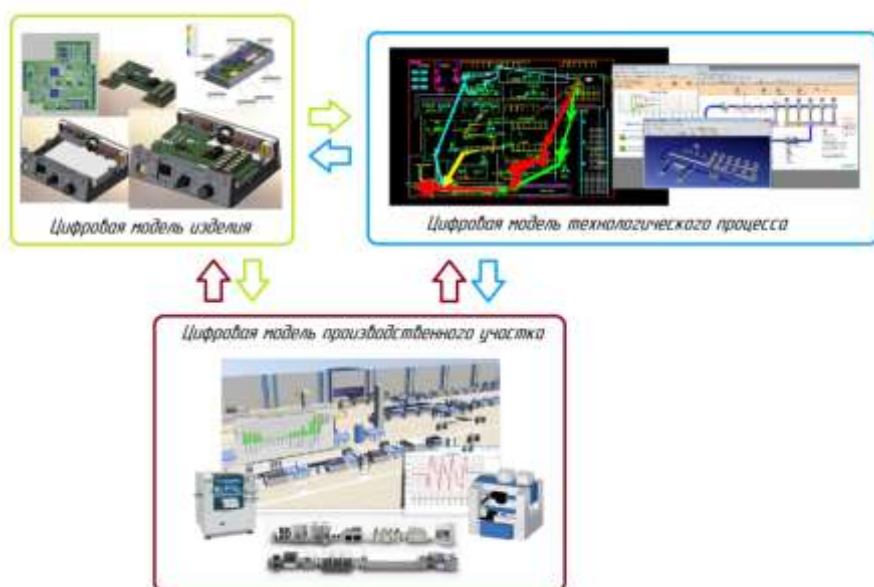


Рисунок 1 – Взаимодействие цифровых моделей изделия, технологического процесса и производства в рамках единой комплексной структуры

Далее рассмотрим содержание подзадач более подробно.

Информационное наполнение БД Tecnomatix/Teamcenter. Предварительно, до создания модели производства, необходимо заложить в БД информацию о производимом изделии, применяемых технологиях, оборудовании, оснащении и т.д.

Выделим основные группы данных, относящихся к типовому изделию – электронному модулю I уровня на печатной плате:

- комплект КД на изделие в электронном виде, в том числе законченный проект печатной платы в ECAD-системе с выполненной трассировкой, назначением и расстановкой компонентов, конструкторская 3D-модель изделия, перечень элементов, рабочий чертеж печатной платы, сборочный чертеж изделия, спецификации;
- данные по номенклатуре (если есть варианты исполнения) и программе выпуска изделия;

- данные по комплектующим (электронным компонентам), включая размеры, допуски, виды упаковки для автоматизированной сборки, рекомендуемые технологические материалы и режимы пайки и пр.;

Информация об изделии хранится в БД PLM-системы Teamcenter.

В свою очередь, в БД системы Tecnomatix должна быть заложена следующая информация:

- типовые и групповые технологические процессы (ТП) по данному классу изделий;
- типовые планировки производственных участков с подведенными коммуникациями;

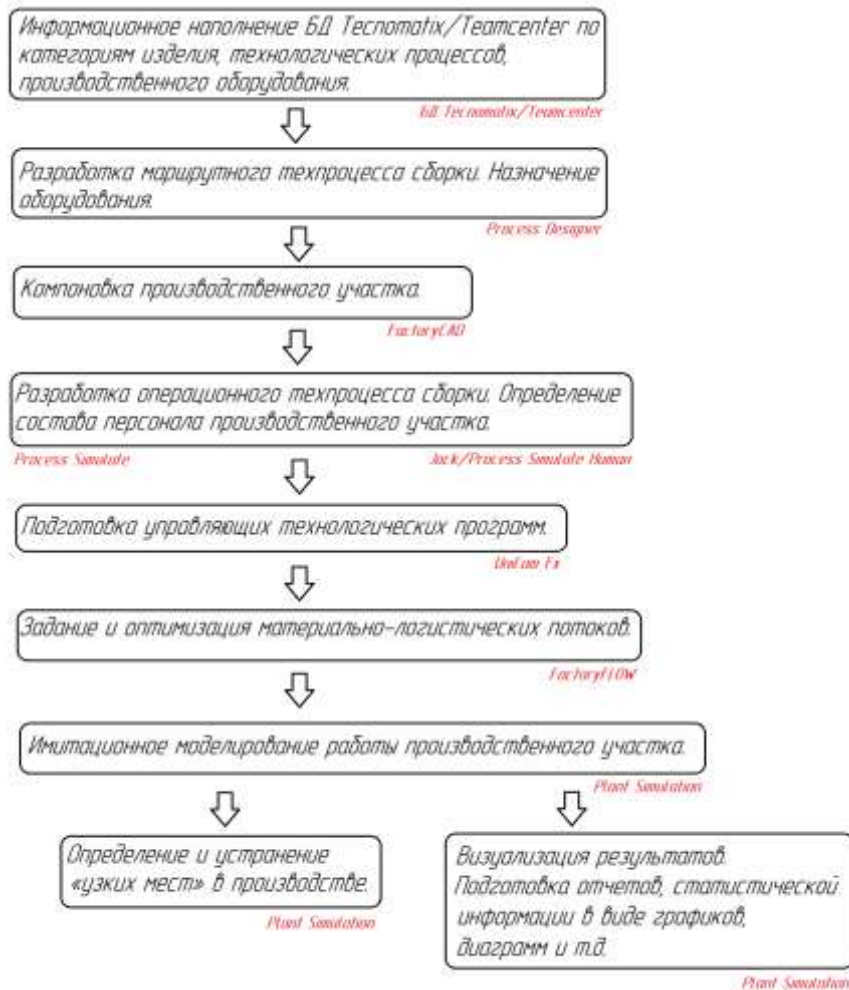


Рисунок 2 – Последовательность задач создания модели цифрового производства электронной аппаратуры на базе систем Tecnomatix/Teamcenter

- модели (в том числе и 3D) технологического оборудования в составе групповых ТП с заданной кинематической схемой и набором характеристик (габаритных размеров, производительности, точности, надежности, времени переналадки и пр.) и элементов электрического/механического сопряжения для работы в составе автоматизированной технологической линии;

- модели типового технологического оснащения – тележки питателей, питатели (ленточные, вибрационные, поддоны) и вакуумные насадки сборочных головок для автоматов установки компонентов, монтажные рамы и трафареты для нанесения

пасты, паллеты для пайки волной и селективной пайки, адаптеры типа «ложе гвоздей» для установок функционального контроля и пр.;

- модели рабочих мест, ручного инструмента и приспособлений (для формовки, вязки жгутов и пр.);
- модели технологической тары;
- модели технологических материалов в соответствующих упаковках – припой и паяльная паста (бруски, катушки, банки, шприцы, картриджи и пр.), флюс (шприцы, канистры и пр.), жидкости для отмывки и пайки в паровой фазе (канистры), влагозащитные материалы (шприцы, канистры) и пр.;
- данные по организации производства, производственным нормативам, охране труда.

Дополнительно следует задать модели неавтоматизированных и автоматизированных складов комплектующих, готовых изделий, технологических материалов, оснастки, в том числе шкафов сухого хранения компонентов и плат и т.д.

Ограничим типовой набор задействованных операций, характерных для производства ЭА – модулей I уровня на печатных платах:

- трафаретная печать/дозирование;
- установка компонентов;
- пайка (волной, оплавлением, парофазная, селективная и пр.);
- автоматическая оптическая инспекция;
- отмывка/сушка;
- нанесение влагозащитных покрытий;
- визуальный контроль;
- рентгеновский контроль;
- функциональный контроль;
- вспомогательные операции – транспортировка, накопление/выдача, переворот плат и пр.;
- ручные/полуавтоматические операции – подготовка паяльной пасты, формовка выводов, дозирование, монтаж, визуальный контроль, упаковка.

В качестве примера рассмотрим модель оборудования для установки компонентов – гибкий сборочный автомат Topaz компании Philips/Assembleon. Предварительно спроектированная в конструкторской САПР Solid Edge модель оборудования представлена на рисунке 3.

Цифровая модель построена таким образом, что узлы автомата (конвейер, сборочная головка, питатели), а также собираемая печатная плата и компоненты работают/перемещаются в соответствии с заданной в системе Tecnomatix кинематической схемой оборудования. Для каждой кинематической оси автомата (рис. 3б) настраиваются скорости и ускорения, что вместе с заданием времени ручной переналадки (смены питателя, смены насадки и пр.) позволяет реализовать циклограмму его работы и впоследствии определять производительность при сборке конкретного изделия.

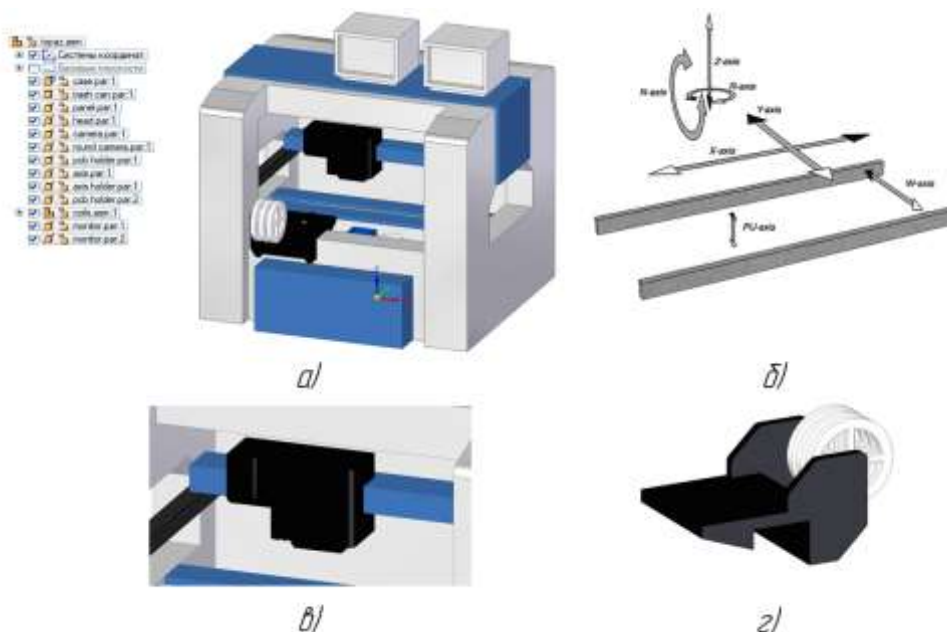


Рисунок 3 – цифровая модель гибкого сборочного автомата Toraz компании Philips/Assembleon: а) модель сборки в САПР Solid Edge; б) схема перемещения исполнительных механизмов по осям; в) модель сборочной головки; г) модель блока питателей с катушками

Разработка маршрутного техпроцесса сборки. Назначение оборудования. Данные задачи выполняются в модуле *Process Designer* – 3D-среде планирования производственных процессов. Основой является автоматическая генерация схемы сборки и маршрутного техпроцесса на базе типовых/групповых ТП из БД. Возможна генерация нескольких альтернативных структур с выбором наилучшего варианта по критериям. При создании моделей операций производится их разделение на автоматизированные и выполняемые вручную. Назначаемое оборудование объединяется в технологическую линию.

Компоновка производственного участка. Далее в 3D-среде с использованием модуля *FactoryCAD* создается и визуализируется топология производственного участка, выполняется 3D-компоновка оборудования и прочих объектов производственной среды, осуществляется сопряжение с коммуникациями (в нашем случае это электроэнергия, сжатый воздух, азот, вытяжная вентиляция).

Разработка операционного техпроцесса сборки. Определение состава персонала производственного участка. Здесь выполняется 3D-проектирование и моделирование операций и переходов всего процесса сборки изделия с учетом оборудования, инструмента и приспособлений. Для каждой операции выбирается технологическое оснащение и материалы, определяется требуемое количество рабочего персонала для каждой операции или групп операций и выполняется его расстановка, определение зон ответственности. Эти задачи решает модуль **Process Simulate**. Для каждой операции выполняется кинематическое 3D-моделирование, что позволяет обнаруживать различные коллизии – статические и динамические столкновения исполнительных механизмов оборудования с прочими объектами – и оперативно разрешать их.

Ручные операции (прежде всего, сборки, контроля, межоперационной транспортировки и работы со складом, загрузки/выгрузки, упаковки, переналадки питателей) моделируются с привлечением специализированных модулей Jack и Process Simulate Human. С их помощью выполняется моделирование действий оператора на

антропометрически и биометрически точной модели человеческой фигуры, производится анализ рабочих условий, производительности, эргономики, травмоопасности, комфорта, зон прямой видимости, затрат энергии, пределов нагрузки с анализом угла и поля зрения и построением зон достижимости для быстрой проверки качества организации рабочего места.

Подготовка управляющих технологических программ. Важный этап подготовки любого сборочного производства ЭА – автоматическое программирование оборудования (в первую очередь – автоматов установки компонентов). С помощью модуля UniCam Fx возможно импортировать проект из ECAD-системы и автоматически сгенерировать управляющую программу. Для ручных операций монтажа модуль генерирует технологическую документацию и инструкции. Также модуль оптимизирует последовательность установки компонентов, выполняет окончательную оптимизацию наладок питателей и сборочных головок.

Задание и оптимизация материально-логистических потоков (комплектующих, материалов, технологического оснащения, незавершенного производства, готовой продукции, газов, энергии и пр.) выполняет модуль FactoryFLOW. По результатам выполняемого автоматизированного анализа технолог может оптимизировать компоновку производственных площадей, исходя из распределения, частоты и стоимости материальных потоков. Модуль, в частности, решает такие задачи, как оптимизация материальных потоков и выявление «проблемных участков» производства, расчет требований к транспортному оборудованию, анализ и проверка путей перемещения операторов, построение маршрутов на основе требований к перемещению материалов, оптимизация используемой тары и способа складирования.

После завершения описанных выше процедур возможно приступить к *имитационному моделированию работы производственного участка*. Эту задачу в системе Tecnomatix решает модуль Plant Simulation – инструмент дискретного имитационного моделирования. С его помощью выстраиваются структурированные, иерархические модели производственных объектов, линий и процессов, а также выполняются эксперименты и прорабатываются сценарии вида «что, если» без вмешательства в работу существующих производственных систем. Проводится автоматизированная калькуляция времен (основного, вспомогательного, технологического обслуживания и пр.), определяются штучные, подготовительно-заключительные, калькуляционные времена по операциям, что дает на выходе картину общей производительности технологической линии.

Модуль снабжен набором аналитических инструментов, направленных на *определение и устранение «узких мест» в производстве*. Например, оценивается целесообразность разделения оборудования для установки компонентов на быстрый чип-шутер и гибкий многофункциональный автомат, использования печи пайки оплавления с двойным конвейером, интеграции системы автоматической оптической инспекции в технологическую линию либо использования ее в качестве отдельно стоящего оборудования.

Еще одной важной задачей является внесение изменений в структуру техпроцесса, производственного участка, материальных и людских ресурсов и пр. с последующим анализом отклика производственной системы на эти изменения.

Этот же модуль осуществляет и *визуализацию результатов*, т.е. подготовку отчетов, статистических данных, графиков и диаграмм, включая коэффициент использования оборудования, времена простоя, обслуживания и ремонта оборудования для оценки различных сценариев производства. При этом такие графики и диаграммы могут интегрироваться непосредственно в 3D-среду для лучшей наглядности (см. рисунок 4).

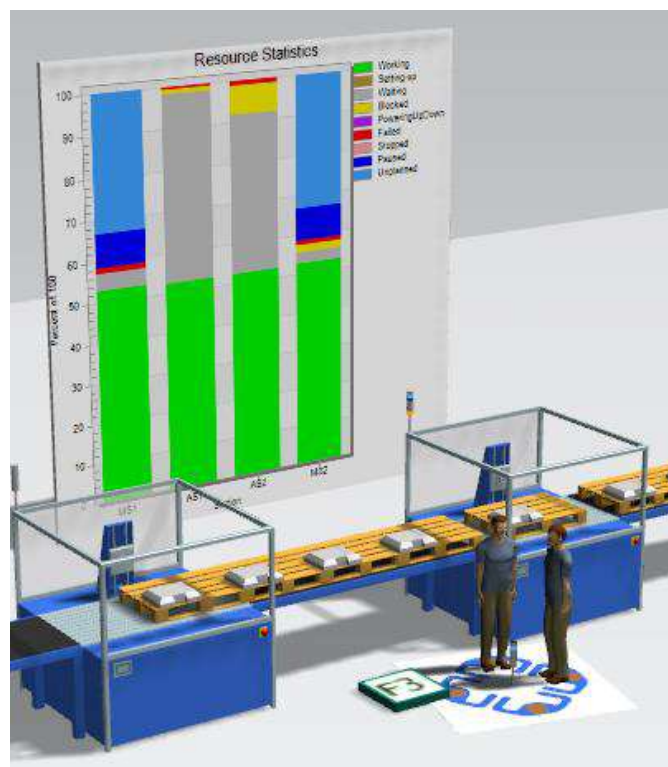


Рисунок 4 – 3D-диаграмма использования ресурсов оборудования, интегрированная в трехмерную модель производства (Plant Simulation) [13]

Таким образом, в результате работы всех перечисленных выше модулей будет сформирован «цифровой двойник» реального производства. Пример визуализации производственной 3D-структуры представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Пример производственной 3D-структуры, сформированной в модуле Plant Simulation [13]

Заключение. Разработан подход, позволяющий выполнять цифровое моделирование систем производства электронной аппаратуры на базе решений Tecnomatix с выполнением декомпозиции общей задачи на ряд частных подзадач, решаемых отдельными программными модулями. Полученный в результате «цифровой двойник» реального производства учитывает конструкторскую информацию о выпускаемом изделии, а также данные по существующим технологическим процессам

и оборудованию. Его возможно использовать в целях подготовки, анализа и оптимизации производства электронной аппаратуры как на этапе создания нового производства, так и при запуске в существующее производство новых изделий.

Благодарность

Исследование проводилось при поддержке Министерства науки и образования России в рамках проекта по Соглашению № 24176.2017 / ПЧ. / The research was conducted with the support of the Ministry of Science and Education of Russia within the framework of the project under the Agreement No.2.4176.2017/PCh

Список источников

1. Berduygina O.N., Vlasov A.I., Kuzmin E.A. Investment capacity of the economy during the implementation of projects of public-private partnership // Investment Management and Financial Innovations. 2017. Т. 14. № 3. С. 189-198.
2. Akberdina V.V., Kalinina A.V., Vlasov A.I. Transformation stages of the Russian industrial complex in the context of economy digitalization // Problems and Perspectives in Management. 2018. Т. 16. № 4. С. 201-211.
3. Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Программный комплекс "Контур" для проектирования роботизированных комплексов сборки электронной аппаратуры в многономенклатурном производстве // Инженерный вестник. 2013. № 3. С. 4.
4. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3D MID assembly process // Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic. "KnE-Engineering". 2018. С. 311-321.
5. Demin A.A., Vlasov A.I., Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering // ACM International Conference Proceeding Series, 2017, N. 3166098, DOI: 10.1145/3166094.3166098.
6. Demin A.A., Vlasov A.I. Application of hexagonal conceptual model for solving problem of synchronization by visual designing of complex systems // Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic "KnE-Engineering" 2018. С. 266-273.
7. Popova I.N., Vlasov A.I., Nikitina N.I. Optimization of inventory distribution logistics in industrial enterprises // Espacios. 2018. Т. 39. № 24.
8. Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А. "Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования", Информационные технологии в проектировании и производстве, 2015, № 4 (160), С. 19-24.
9. Карпунин А.А., Власов А.И. обработка данных с распределенным реестром в концепции "Индустрия 4.0" // В сборнике: Энергосбережение и эффективность в технических системах Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов. 2018. С. 120-121.
10. Курносенко А.Е., Харитонов К.П. Применение PLM- системы Teamcenter для управления жизненным циклом электронных изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2 (170). С. 56-62.
11. Курносенко А.Е., Харитонов К.П. Применение системы управления данными об изделии Teamcenter при технологической подготовке производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 4 (172). С. 42-48.
12. Левин И.В., Курносенко А.Е., Машина Н.А. Решения для проектирования, моделирования и оптимизации производств электронной аппаратуры //

Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1 (169). С. 26-32.

13. Dr. Georg Piepenbrock. Tecnomatix Plant Simulation. Validation of Plant Performance and Plant Control. Siemens Industry Software // URL: https://www.plm-europe.org/admin/presentations/2017/2013_PLMEurope_24.10.17-13-30_GEORG-PIEPENBROCK_SPLM_validation_of_plant_performance_and_plant_control_with_tecnomatix_plant_simulation.pdf