



**МАТЕРИАЛЫ III ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ
ПРОДУКЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ РОСТА»
МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА**

Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении

Лагута В.С.¹, Ясиновский С.И.²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Институт производственных исследований», Москва, Россия

² Исследовательский центр «Мультител», Монс, Бельгия

АННОТАЦИЯ:

В статье обоснована необходимость изменения подхода к созданию многономенклатурных компьютерно-интегрированных производств (КИП). На основании описания характеристик динамического заказа осуществляется выбор стандарта системы управления жизненным циклом (СУЖЦ) продукции и параллельно формируются требования для заказа основного технологического оборудования. Для оценки принимаемых проектных решений предлагается использовать концепцию цифрового двойника создаваемого КИП с последовательной детализацией на основе имитационного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерно-интегрированное производство, проектирование производственной системы, динамический заказ, исполнительная производственная система (MES), цифровой двойник, кластер.

Design of computer-integrated production facilities as part of life cycle management systems for high-tech products in mechanical engineering

Laguta V.S.¹, Yasinovskiy S.I.²

¹ Institute of Industrial Research, LLC, Russia

² Multitel Ltd, Belgium

Введение

Важное значение при проектировании (реконструкции) современных многономенклатурных производственных систем приобретают требования цифровизации процессов и внедрения принципов их

построения для использования в системах управления жизненным циклом (СУЖЦ) выпускаемых изделий. Этому вопросу посвящено значительное количество публикаций, уже сформулированы стандарты, ГОСТы и другие руководящие документы. Но только сейчас в России на рынке складывается ситуация, способствующая внедрению теоретических разработок и прототипов в практику создания и эксплуатации современных действующих производств. С дальнейшим развитием IT-технологий этот процесс будет идти по нарастающей. С учетом повышения значимости информационной составляющей в процессе производства необходимо пересматривать сложившиеся традиционные подходы для использования в задачах проектирования компьютерно-интегрированных производств (КИП), ориентированных на изменяющийся характер производственных заказов.

Анализ развития технических средств машиностроительного дивизиона показывает все большее распространение компьютеризированных технологий в создании (проектирование, производство, сбыт, сопровождение) продукции. Это определяется в первую очередь доступностью соответствующих технических и программных средств на открытом рынке. И этот процесс будет идти по нарастающей. Наглядный пример – развитие аддитивных технологий на российском рынке. Пять лет назад были представлены единицы промышленных образцов и технологий (в основном на базе ABS-пластика), а сейчас эта техника продается в разряде бытовых устройств! Выбор производственного оборудования просто колоссальный с учетом вторичного рынка [1]. Позаказные системы производства (в том числе инструмента и оснастки), модуль-

ABSTRACT:

The necessity of changing the approach to creating multi-product computer-integrated productions (CIP) is proved. Based on the description of the dynamic order characteristics, the product lifecycle management system standard is selected; and requirements for ordering the main process equipment are formed in parallel. To evaluate the design decisions, it is proposed to use the digital twin concept of the created computer-integrated production with consistent detalization based on simulation modeling.

KEYWORDS: computer-integrated manufacturing, production system design, dynamic ordering, Manufacturing Execution System (MES), digital twin, cluster

JEL Classification: M11, O31, O32, O33

Received: 15.06.2020 / Published: 30.09.2020

© Author(s) / Publication: PRIMEC Publishers
For correspondence: Laguta V.S. (ipitp@mail.ru)

CITATION:

Laguta V.S., Yasinovskiy S.I. [2020] Proektirovanie kompyuterno-integrirovannykh proizvodstv v sostave sistem upravleniya zhiznennym tsiklom vysokotekhnologichnoy produktsii v mashinostroenii [Design of computer-integrated production facilities as part of life cycle management systems for high-tech products in mechanical engineering]. Voprosy innovatsionnoy ekonomiki. 10. (3). – 1245-1258. doi: 10.18334/vinec.10.3.110623

ный принцип создания технологического оборудования и повсеместное внедрение облачных технологий позволяют получить практически любой вариант реализации технической системы многономенклатурного машиностроительного производства.

На первый план выходят требования, свойственные инклюзивной модели экономики [2] (*Mamedov, 2012*). Возможность учета непрерывно изменяющихся индивидуальных требований потребителя и сопровождение изделий до вывода из эксплуатации становятся определяющими требованиями в конкурентной среде. А это означает, что и вновь создаваемые производства должны соответствовать этим требованиям. Кроме того, необходимо учитывать что продукция военного назначения (ПВН), как правило, имеет достаточно длительный срок эксплуатации или длительный период поддержания в «горячем» резерве. Это означает длительный период (возможно, десятки лет!) для обеспечения запчастями и комплектующими, а также проведения регламентных работ. За такой период времени достаточно вероятно существенное изменение оборудования и технологий производства такой продукции. То же самое относится к построению КИП. Мы аккуратно и методически качественно выбираем основное технологическое оборудование (ОТО), аппаратные и программные средства интеграции, а к моменту (даже!) получения первых изделий может прийти новое поколение станков и технологий! В качестве примера – только освоили аддитивные технологии по пластику, начали внедрение печати по металлу, а на рынок уже выходит серийное оборудование, совмещающее 3D-печать и механообработку! Или внедрение коллаборативной робототехники в производственные процессы [3].

Задачи маркетинга и управленческого менеджмента становятся основными при проектировании производств, ориентированных на широкое использование компьютерных технологий. И речь прежде всего об организационной стороне производственного процесса, поскольку именно успешное решение вопросов управления информационными потоками жизненного цикла продукции позволяет обеспечить надежность функционирования производственной системы в процессе эксплуатации. Этот момент требует пояснения.

При классическом подходе используется следующая парадигма создания (*рис. 1*) и эксплуатации (*рис. 2*) производственной системы [4, 5, 6 и многие другие] (*Yampolskiy E.S. et al., 1974; Tomiyama, Gu, Jin, Lutters, Kind, Kimura, 2009; Ovsyannikov, Shiryayeva, 2020*).

ОБ АВТОРАХ:

Лагута Виктор Степанович, генеральный директор, кандидат технических наук (jipilp@mail.ru)

Ясиновский Сергей Иванович, менеджер проектов, руководитель группы имитационного моделирования (iassinovskii@multitel.be)

ЦИТИРОВАТЬ СТАТЬЮ:

Лагута В.С., Ясиновский С.И. Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Том 10. – № 3. – С. 1245-1258. doi: [10.18334/vinec.10.3.110623](https://doi.org/10.18334/vinec.10.3.110623)

ПРОЕКТ: детали (детали-представители, условные детали) – маршрутная (операционная) технология – расцеховка – выбор оборудования – расчет количества станков по приведенной программе выпуска (условной приведенной программе) – компоновка (привязка к энергетическим и логистическим сетям).

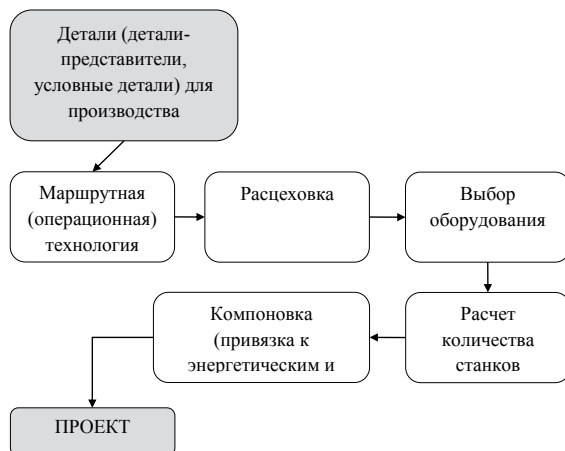


Рисунок 1. Классический подход к созданию проекта производственной системы

Источник: составлено авторами.

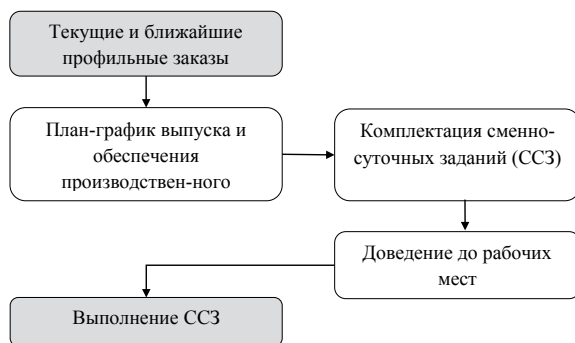


Рисунок 2. Классический подход к эксплуатации производственной системы

Источник: составлено авторами.

СТАДИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ: текущие и ближайшие профильные заказы – план-график выпуска и обеспечения производственного процесса – комплектация сменнo-суточных заданий (ССЗ) – доведение до рабочих мест – выполнение ССЗ.

Примерно так же проектируются соответствующие подсистемы инструментального и технологического обеспечения. Основные критерии – производительность и минимизация затрат.

Такое производство великолепно работает в случае соответствия заказа выбранному оборудованию и заложенному производственному резервированию (по персоналу и оборудованию).

Реальная ситуация многономенклатурного производства – сезонное изменение потребления, нестабильность запланированных заказов, появление конкурента, непредвиденные обстоятельства (неперекрываемый выход из строя оборудования, персонала, сбои в поставках сырья, инструмента), срочные заказы на полуфабрикаты и комплекты и т.д.

В этом случае от производственной системы **требуются другие свойства:**

Первое – возможность сохранения работоспособности.

Второе – управляемость производственными возможностями по номенклатуре и производительности – увеличение/сокращение без потерь экономического потенциала.

Третье – скорость реакции на изменения.

А это, в свою очередь, требует принципиально другого подхода к созданию таких производств. Выделим его основные черты:

1. Компьютерная интеграция процессов – в информационном плане прежде всего позволяет осуществить контроль и управление процессами в режиме «реального времени» [7] (*Iassinovski, Abdelhakim, Christophe, 2008*) и придает им управляемость, гибкость и скорость реакции на изменения, которых невозможно добиться традиционными методами.

2. Построение организационной системы по принципам виртуального производства как на прием, так и выдачу заказов [8] (*Laguta, 2017*).

3. Изначальная ориентация на «динамический» характер производственного заказа.

4. Открытая система, ориентированная на развитие – возможность запланированного последовательного наращивания производственно-технологических возможностей – по управлению, автоматизации, роботизации и т.п. [9] (*Laguta, Malyhin, Filippov, 2015*).

Соответствующая парадигма создания такого производства будет другой (*рис. 3*):

ПРОЕКТ: набор базовых и перспективных конструкторско-технологических требований, определенных на множестве планируемых к производству деталей и изделий – описание свойств динамического заказа – выбор стандарта системы управления жизненным циклом (СУЖЦ) продукции – определение степени автоматизации рабочих мест – определение требований для заказа оборудования – далее по классике.

Важный момент – при формировании заказа на оборудование учитываются все полученные на предыдущих этапах требования и ограничения, в том числе с перспективой наращивания технических и технологических возможностей.

СТАДИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ: функционирование КИП в СУЖЦ продукции, расширение производственных возможностей по мере продвижения на профильных рынках.



Рисунок 3. Предлагаемый подход к созданию проекта производственной системы

Источник: составлено авторами.

На стадии эксплуатации функционирование и расширение производственных возможностей КИП осуществляется уже в рамках СУЖЦ продукции. Имеется в виду не только приобретение дополнительного оборудования, но и широкое использование аутсорсинга [10] (*Laguta, 2013*).

Существенное значение в предлагаемом подходе занимает понятие «динамический заказ». Как уже было показано, ориентир на фиксированный состав будущих объектов КИП – конкретные детали, узлы, детали-представители – в отрыве от соответствующих реальных план-графиков запуска/выпуска не позволяет сформировать эффективный состав технической системы КИП для рассматриваемой постановки задачи. С другой стороны, создание абстрактной производственной системы даже при условии наличия некоторых ориентирующих ограничений и стандартов, ранее сформулированных для разработки СУЖЦ, не имеет смысла в практическом плане. Это противоречие и призвано разрешить использование «динамического заказа» для формирования технической системы КИП. Подчеркнем в том числе не только выбор оборудования, но и выделение групп операций, выносимых на сторонних исполнителей.

Для этого необходимо представить планируемые производственные заказы набором требуемых технических и технологических возможностей, предъявляемых к оборудованию будущего КИП. Тогда можно говорить не о конкретном оборудовании (это локальный вариант), а о некоей совокупности производственных возможностей в целом. Например, не характеристики конкретного зуборезного станка, а «возмож-

ность изготовления зуба произвольного профиля от модуля 0,5 до 5». Или «возможность получения шероховатости от 0,25 Ra для тел вращения от 10 мм до 350 мм» и т.п. В настоящее время активно развивается направление разработки и совершенствования информационного обеспечения производственных процессов. Речь идет об использовании в производственной сфере методов искусственного интеллекта, нечетких множеств, мягких вычислений и т.п. – этой проблематикой в МГТУ им. Н.Э. Баумана активно занимался профессор Емельянов В.В. (1949–2004 гг.). Такие подходы и позволяют «строить» варианты технологических процессов, базирующихся на возможностях не конкретного оборудования, а определенной производственной системы (или систем, если иметь в виду в том числе виртуальные производства).

На этапе проектирования будущие план-графики запуска/выпуска КИП могут быть представлены (интерпретированы) интенсивностями (частотой переходов) используемых наборов технических и технологических возможностей. Соответствующая информация может быть опять же получена на начальных этапах проектирования производственной системы в целом.

Для рассмотренной постановки перспективным оказывается использование метода онтологий [11] (*Evgenev, 2009*), поскольку многие наработки в этом направлении доведены до программной реализации. Особенно успешно этот метод используется в задачах конструкторско-технологической подготовки производства, что, собственно, и позволяет уверенно говорить о возможности интерпретации располагаемой информации в СУЖЦ в качестве «динамического заказа» для проектирования КИП в ее составе.

При проектировании (модернизации, реконструкции) общей производственной системы в целом целесообразно выделение критических, универсальных и общих технологий [8] (*Laguta, 2017*). Это позволит корректно осуществить распределение функций в СУЖЦ (аутсорсинг, резервирование и «страхование» производственных возможностей). Здесь же необходимо включение «рыночной» составляющей производственной системы, если таковая определена на этапе маркетинговых исследований. Таким образом, оказывается возможным сформировать «динамический заказ» для проектирования КИП в составе выпускающего дивизиона.

Достаточно очевидно, что должна быть некоторая (возможно, формализованная) канва, на которую собираются («нанизываются») технические решения. Для получения которых, в свою очередь, используются методы, методики, программные средства, формализованный опыт (например, в экспертных системах) и т.п. И все это базируется на информационном пространстве (цифровых платформах), доступных пользователю в целом (например, Интернет) или в его специализированных разделах (облачные технологии «закрытых» процессов). И вот в качестве такой канвы, по мнению авторов, и выступает СУЖЦ изделия (изделий), которые только предполагается выпускать или осваивать.

Из концептуальных направлений, которые можно (и нужно!) использовать в предложенном подходе, выделим:

- параллельный инжиниринг (concurrent engineering) – предполагает выполнение процессов разработки и проектирования одновременно с моделированием изготовления и эксплуатации. При этом многие проблемы, которые могут возникнуть на более поздних стадиях ЖЦ, выявляются и решаются на стадии проектирования [12] (*Ma, Chen, Thimm, 2008*);
- процессный подход в проектировании – он ориентирован в первую очередь не на организационную структуру предприятия, не на функции подразделений, а на бизнес-процессы, конечными целями выполнения которых является создание продуктов или услуг, представляющих ценность для внешних или внутренних потребителей. При этом система *управления* компанией ориентируется как на *управление* каждым бизнес-процессом в отдельности, так и всеми бизнес-процессами предприятия в целом [13] (*Meyer, Creux, Weber, 2006*);
- концепция реконфигурируемых производственных систем (Reconfigurable manufacturing system), обладающих возможностью изменения (адаптации) пространственно-временной организации (архитектуры) производственной системы к изменениям рыночного спроса на продукцию [14] (*Bi, Lang, Shen, Wang, 2008*).

Поскольку излагаемый подход к проектированию КИП может быть использован не только при создании нового производства, но в задачах реконструкции, модернизации, перепрофилирования действующего, необходимо упомянуть также:

- реинжиниринг бизнес-процессов (Business process reengineering), суть которого в определении оптимального вида бизнес-процесса и определении наилучшего (по средствам, времени, ресурсам и т.п.) способа перевода существующего бизнес-процесса в оптимальный;
- непрерывный инжиниринг – стратегия повторного использования ранее разработанных изделий, стирание границ по доступу к проектной документации в смежных областях проектирования и постоянная верификация как требований, так и проектных решений [15] (*Romanov, 2017*);
- риск-менеджмент [ГОСТ Р 56275-2014 Менеджмент рисков. Руководство по надлежащей практике менеджмента рисков проектов].

В проектировании производства, особенно механообработки, наименее формализуемым этапом является концептуальное проектирование архитектуры, в частности организации производственного процесса и «внутренней» логистики. Реально единственным средством (кроме аналогии и здравого смысла) здесь является имитационное моделирование [16] (*Emelyanov, Laguta, Ovsyannikov, Yasinovskiy, 1990*) или, как теперь модно говорить в рамках концепции «Индустрия 4.0», использование «цифровых двойников» (за исключением специфических производств, для которых соответствующие методы существуют, таких как производство полупроводников, сборка автомобилей и т.п.). Программных средств для имитационного моделирования производств и на российском и на европейском рынках в настоящее время представлено доста-

точное количество, проблемой однако остается то, что эти имитаторы не предлагают какой-либо методологии, алгоритма проектирования. Все определяется квалификацией пользователя.

Другой особенностью проектирования современных производственных систем является осознание того факта, что программное обеспечение является неотъемлемой частью производства и в значительной степени определяет его гибкость и реактивность, эффективность использования оборудования и персонала. Здесь основную роль, помимо уже прочно вошедших в практику программ SCADA и ERP, играют исполнительные производственные системы – MES [17]. В российской, так же как и в зарубежной практике достаточно много публикуется практических материалов по этому вопросу. Но основная их цель, к сожалению, – показать уровень осуществляемых разработок и расширение клиентской базы. Методические вопросы получения проектных решений КИП на их основе остаются ноу-хау, а публикации представляют в основном конечный коммерческий продукт для возможного пользователя.

Таким образом, предлагаемая концепция ориентирована на значительную неопределенность исходных данных, а это означает, что существенное место должна занять оценка качества принимаемых решений. Поэтому необходимо широкое использование моделирования производственной системы на различных этапах проектирования и эксплуатации. Начиная от вариантов построения СУЖЦ до цифрового двойника производства в целом – имитационной модели производственных потоков, включая внешнюю и внутреннюю логистику. Попутно отметим важную особенность излагаемого подхода – в идеальном случае это должна быть модель виртуального предприятия, реализующая функции управления реальными (эксплуатируемыми) программно-аппаратных систем либо включающая сами эти системы. То есть оценку проектных решений КИП необходимо осуществлять на уже принятой ранее модели, реализующей функции управления (правила, алгоритмы, информационные стандарты и т.п.) в СУЖЦ изделия. Таким образом, одновременно с проектированием архитектуры КИП происходит выбор, конфигурирование и настройка MES. В свою очередь, модель производства (цифровой двойник) используется MES для анализа последствий принимаемых решений (оптимизации) при оперативном управлении производством.

Заключение

Опыт внедрения элементов СУЖЦ представлен и описан достаточно широко. Еще больше представлено приложений (в основном рекламного характера) разработчиками соответствующего ПО. Есть и примеры завершенных работ как на опытном производстве, например для производственного модуля [18] (*Ovsyannikov, Podkopaev, Bukhanov, 2016*), так и на крупных объединениях, например концерна «Калашников» [19] (*Bukharov, 2018*). Анализ показывает, что реальная ситуация «созрела» для перехода к цифровому производству как стандарту современной производственной системы. Для этого есть технические, информационные и организационные предпосылки.

Изложенный подход может быть особенно действенным в решении проблем реформирования предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) – для задачи существенного увеличения доли выпускаемой гражданской продукции. Это дает возможность дезинтеграции производственных компонент технической системы без потерь общего производственного потенциала в рамках существующей системы СУЖЦ ПВН. И наоборот, включение в производственный цикл поставщиков комплектующих и полуфабрикатов в рамках единой СУЖЦ ПВН. Это соответствует современной тенденции развития машиностроения (техническая компонента) – цифровизации производств и децентрализация производственных систем. В то же время очевидно сохраняется ориентация на использование установившихся производственных связей и расширение возможной кооперации, но не в рамках принудительного объединения в виде очередной госкорпорации, а по принципам производства продукции в кластере, где рыночная целесообразность является определяющей. Это позволит найти компромисс между самостоятельностью отдельных производств и объединением при решении практических вопросов выпуска конечной продукции в кластере в целом на основе унифицированных принципов и систем управления жизненным циклом ПВН.

ИСТОЧНИКИ:

1. База данных поставщиков оборудования, машин и технологий из России. Oborudunion. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oborudunion.ru/catalog> (дата обращения: 07.07.2020).
2. Мамедов О.Ю. Инвазивная экономика (Россия: от постсоветской экономики – к «квазипостсоветской»?) // Terra Economicus. – 2012. – № 3. – с. 4-8.
3. Итоги выставки «Металлообработка-2019». Пресс-служба АО «Экспоцентр». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.expoctr.ru/ru/press-center/press-releases/itogi-vystavki-metalloobrabotka-2019> (дата обращения: 15.04.2020).
4. Ямпольский Е.С. и др. Проектирование машиностроительных заводов и цехов. / Т. 1: Организация и методика проектирования. – М.: Машиностроение, 1974. – 296 с.
5. Tomiyama T., Gu P., Jin Y., Lutters D., Kind Ch., Kimura F. Design methodologies: Industrial and educational applications // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2009. – № 2. – p. 543-565.
6. Овсянников В.Е., Ширяева А.Н. Совершенствование проектирования производственных единиц в условиях многономенклатурного производства // Актуальные вопросы технических наук: материалы VI Междунар. науч. конф. Краснодар, 2020. – с. 6-12.
7. Iassinovski S., Artiba Abdelhakim, Fagnart Christophe SDBuilder®: A production rules-based tool for on-line simulation, decision making and discrete process control // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2008. – № 3. – p. 406-418. – doi: 10.1016/j.engappai.2007.05.005.

8. Лагута В.С. Производственно-технологический потенциал предприятия. Виртуальное производство // Компетентность. – 2017. – № 5(146). – с. 18-21.
9. Лагута В.С., Малыхин А. Ю., Филиппов А.А. Концепция открытого проекта цеха по изготовлению газобетонных блоков // Компетентность. – 2015. – № 8. – с. 22-25.
10. Лагута В.С. Размещение сторонних заказов в структуре военно-промышленного комплекса (рыночный подход) // Машиностроитель. – 2013. – № 9. – с. 12-18.
11. Евгеньев Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.
12. Ma Y., Chen G., Thimm G. Paradigm shift: unified and associative feature-based concurrent and collaborative engineering // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2008. – № 19. – p. 625-641. – doi: 10.1007/s10845-008-0128-y.
13. Urs B. Meyer, Simone E. Creux, Andrea K. Weber Process Oriented Analysis: Design and Optimization of Industrial Production Systems. , 2006. – 521 p.
14. Bi Z.M., Lang S.Y.T., Shen W., Wang L. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art // International Journal of Production Research. – 2008. – № 4. – p. 967-992. – doi: 10.1080/00207540600905646.
15. Романов А.А. Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – № 2. – с. 68-84. – doi: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.68.
16. Емельянов В.В., Лагута В.С., Овсянников М.В., Ясиновский С.И. Интеллектуальная система моделирования дискретных производственных систем и процессов. / В сб.: Технология. Серия Гибкие производственные системы и робототехника. Вып. 1., 1990. – 11-22 с.
17. International. Manufacturing information. Manufacturing Enterprise Solutions Association. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mesa.org/en/index.asp> (дата обращения: 07.07.2020).
18. Овсянников М.В., Подкопаев С.А., Буханов С.А. Облачная система поддержки жизненного цикла опытного единичного производства // Инженерный вестник. – 2016. – № 11. – с. 7.
19. Бухаров В. Опыт внедрения системы управления производством // РИТМ машиностроения. – 2018. – № 8. – с. 27-29.

REFERENCES:

- Bi Z.M., Lang S.Y.T., Shen W., Wang L. (2008). *Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art International Journal of Production Research*. 46 (4). 967-992. doi: 10.1080/00207540600905646.
- Bukharov V. (2018). *Opyt vnedreniya sistemy upravleniya proizvodstvom* [Experience in the implementation of production control system]. *RITM mashinostroeniya*. (8). 27-29. (in Russian).

- Emelyanov V.V., Laguta V.S., Ovsyannikov M.V., Yasinovskiy S.I. (1990). *Intellektualnaya sistema modelirovaniya diskretnykh proizvodstvennykh sistem i protsessov* [Intelligent system for modeling discrete production systems and processes] (in Russian).
- Evgenyev G.B. (2009). *Intellektualnye sistemy proektirovaniya* [Intelligent systems of design] M.: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana. (in Russian).
- Iassinovski S., Artiba Abdelhakim, Fagnart Christophe (2008). *SDBuilder®: A production rules-based tool for on-line simulation, decision making and discrete process control* *International Journal on Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 21 (3). 406-418. doi: 10.1016/j.engappai.2007.05.005.
- International. Manufacturing information Manufacturing Enterprise Solutions Association. Retrieved July 07, 2020, from <http://www.mesa.org/en/index.asp>
- Laguta V.S. (2013). *Razmeshchenie storonnikh zakazov v strukture voenno-promyshlennogo kompleksa (rynochnyy podkhod)* [Tihrd-party order placing in military-industrial complex (market approach)]. *Mashinostroitel*. (9). 12-18. (in Russian).
- Laguta V.S. (2017). *Proizvodstvenno-tekhnologicheskiiy potentsial predpriyatiya. Virtualnoe proizvodstvo* [Production and technological potential of the enterprise. Virtual manufacturing]. *Kompetentnost*. (5(146)). 18-21. (in Russian).
- Laguta V.S., Malyhin A. Yu., Filippov A.A. (2015). *Kontseptsiya otkrytogo proekta tsekha po izgotovleniyu gazobetonnykh blokov* [Concept of an open project for the production of autoclaved aerated concrete blocks]. *Kompetentnost*. (8). 22-25. (in Russian).
- Ma Y., Chen G., Thimm G. (2008). *Paradigm shift: unified and associative feature-based concurrent and collaborative engineering* *Journal of Intelligent Manufacturing*. (19). 625-641. doi: 10.1007/s10845-008-0128-y.
- Mamedov O.Yu. (2012). *Invazivnaya ekonomika (Rossiya: ot postsovetskoy ekonomiki — k «kvazipostsovetskoy»?)* [Invasive economy (Russia: from the post-Soviet economy to the quasi post-Soviet?)]. *Terra Economicus*. 10 (3). 4-8. (in Russian).
- Ovsyannikov M.V., Podkopaev S.A., Bukhanov S.A. (2016). *Oblachnaya sistema podderzhki zhiznennogo tsikla opytnogo edinichnogo proizvodstva* [Cloud-based life cycle support system for pilot unit production]. *Inzhenernyy vestnik*. (11). 7. (in Russian).
- Ovsyannikov V.E., Shiryayeva A.N. (2020). *Sovershenstvovanie proektirovaniya proizvodstvennykh edinit v usloviyakh mnogonomenklaturnogo proizvodstva* [Improving the design of production units in multiproduct manufacturing] *Topical issues of technical sciences*. 6-12. (in Russian).
- Romanov A.A. (2017). *Smena paradigmy razrabotki innovatsionnoy produktsii: ot razroznennykh NIOKR k tsifrovym proektam polnogo zhiznennogo tsikla* [Paradigm shift in the development of innovative products: from disparate r&d to full life cycle digital projects]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 4 (2). 68-84. (in Russian). doi: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.68.

- Tomiyama T., Gu P., Jin Y., Lutters D., Kind Ch., Kimura F. (2009). *Design methodologies: Industrial and educational applications CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58 (2). 543-565.
- Urs B. Meyer, Simone E. Creux, Andrea K. Weber (2006). *Process Oriented Analysis: Design and Optimization of Industrial Production Systems* Taylor & Francis Inc.
- Yampolskiy E.S. i dr (1974). *Proektirovanie mashinostroitelnyh zavodov i tsekhov* [Design of machine-building plants and workshops] M.: Mashinostroenie. (in Russian).

