

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.3.038

doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-4

ВИЗУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. И. Власов¹, Г. А. Волков², К. В. Селиванов³

^{1, 2, 3} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

¹vlasovai@bmstu.ru, ²egor1234567890ego@mail.ru, ³selivanov_kv@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются методики применения визуальных инструментов системной инженерии на примере процессов аддитивных технологий. *Материалы и методы.* Проанализированы тенденции создания несущих конструкций электронной аппаратуры на основе аддитивных технологий. Систематизированы возможности аддитивных технологий и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями производства типовых деталей несущих конструкций. Основное внимание уделено принципам визуального моделирования аддитивных технологий. Предложена методика синтеза модельного ряда деталей несущих конструкций электронной аппаратуры, изготовление которых возможно при использовании аддитивных технологий. Проанализированы преимущества и недостатки использования технологий визуального моделирования сложных систем. *Результаты и выводы.* Обобщены преимущества и недостатки проектных процедур системной инженерии с использованием визуальных методов и средств на примере анализа аддитивных технологий. Даны рекомендации по применению визуального инструментария системного анализа в условиях цифровой трансформации проектных процедур перспективной электронной аппаратуры.

Ключевые слова: аддитивные технологии, визуальные модели, системный анализ, системная инженерия, структурно-функциональные модели, концептуальные модели, предиктивное управление, энергоресурсы, возобновляемые источники энергии

Финансирование: отдельные результаты получены в проекте «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» по Программе развития МГТУ им. Н. Э. Баумана в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Власов А. И., Волков Г. А., Селиванов К. В. Визуальные модели системной инженерии процессов аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 32–51. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-4

VISUAL MODELS OF SYSTEMS ENGINEERING OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES

A.I. Vlasov¹, G.A. Volkov², K.V. Selivanov³

^{1,2,3} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ vlasovai@bmstu.ru, ² egor1234567890ego@mail.ru, ³ selivanov_kv@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper discusses methods for using visual systems engineering tools using the example of additive manufacturing processes. *Materials and methods.* The trends in creating load-bearing structures of electronic equipment based on additive technologies are analyzed. The capabilities of additive technologies and their advantages compared to traditional technologies for the production of standard parts of load-bearing structures are systematized. The main attention is paid to the principles of visual modeling of additive technologies. A method for synthesizing a model range of parts for supporting structures of electronic equipment, the production of which is possible using additive technologies, is proposed. The advantages and disadvantages of using technologies for visual modeling of complex systems are analyzed. *Results and conclusions.* The advantages and disadvantages of systems engineering design procedures using visual methods and tools are summarized using the example of the analysis of additive technologies. Recommendations are given for the use of visual systems analysis tools in the context of digital transformation of design procedures for advanced electronic equipment.

Keywords: additive technologies, visual models, system analysis, systems engineering, structural and functional models, conceptual models, predictive control, energy resources, renewable energy sources

Financing: some results were obtained in the PRIOR/CH/NU/22/SP2/5 project under the Bauman Moscow State Technical University Development Program within the framework of the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

For citation: Vlasov A.I., Volkov G.A., Selivanov K.V. Visual models of systems engineering of additive manufacturing processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(2):32–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-4

Введение

Решение задач системного проектирования предполагает наличие моделей предметной области. Модель – это формализованное описание, пригодное для цифровой обработки и обладающее гибкостью, полнотой, структурированностью и непротиворечивостью [1, 2].

В условиях цифровой трансформации промышленности современные производственные системы следует рассматривать как сложные системы, т.е. такие системы, в модели которых недостаточно информации для эффективного управления такой системой [3]. Сложные системы состоят из большого числа частей и большого количества связей между ними. Чем количество связей больше, тем сложнее сформулировать закономерности функционирования данного объекта с целью обеспечения эффективности его деятельности.

Методы системного анализа и проектирования сложных систем направлены на решение проблем анализа протекающих в них процессов, трудоемкости построения моделей их формального описания, хранения и обработки знаний об объектах и процессах таких систем. Для решения данных проблем на всех этапах системного проекта возможно использовать методы, модели и инструменты визуального проектирования [4, 5]. Актуальность реализации совокупности обоснованных, воспроизводимых и системных методов и средств построения визуальных моделей сложных систем, обусловлена требованиями цифровой трансформации промышленности, сокращением сроков проектирования и распределенным характером современных методов цифрового проектирования [6–8].

Построение визуальных моделей сложных систем реализуется с использованием различных нотаций визуального моделирования (ментальные карты [9], IDEF (Integrated DEFinition) [1, 2, 10], BPMN (Business Process Model and Notation) [11–14], ARIS (Architecture of Integrated Information Systems) [15, 16], Archimate (Моделирование архитектуры предприятия) [17, 18], RUP (Rational Unified Process) [19, 20] и т.п.). Основной проблемой их совместного применения в рамках единого системного проекта является разнородность формального представления характеристик моделей [21–23].

Цифровая трансформация производственных технологий требует использования эффективных инструментов системного проектирования на всех этапах. Методы и модели визуального моделирования позволяют эффективно решать задачи иерархической декомпозиции, детализации и синхронизации производственных процессов при обеспечении семантического единства понятий предметной

области [24]. В настоящей работе объектом исследования являются аддитивные технологии создания несущих конструкций объектов электронной аппаратуры (ЭА) [25, 26]. Применение аддитивных технологий позволяет более быстро и эффективно изготавливать детали и компоненты несущих конструкций ЭА. Они также позволяют производить более сложные детали, которые сложнее и дороже изготовить традиционными методами [27, 28].

Современные аддитивные технологии реализуются в рамках концепции бережливого производства, которая обеспечивает минимизацию отходов, сокращение времени и затрат на производство продукции, экономию ресурсов и устранение излишеств [29–38]. Аддитивные технологии позволяют создавать детали с высокой точностью и качеством, что уменьшает количество брака и необходимость повторных производственных циклов.

Целью настоящей работы является отработка методики применения визуальных моделей сложных систем для комплексного решения проблем их системного проектирования, путем построения синхронизированных иерархически-связанных эволюционных, компонентных, визуальных моделей (упорядоченной совокупности метаобъектов и отношений между ними) процессов аддитивных технологий.

На основе комплексного подхода к системной инженерии на всех этапах жизненного цикла, от синтеза идей, их формализации, проектирования процессов до объектного моделирования системы в целом, в работе предложен подход построения их визуальных моделей, а также шаблоны формального представления компонентов моделей разного класса.

В работе реализуется системный подход визуального проектирования и системного анализа сложных систем на примере аддитивного производства несущих конструкций ЭА. Рассматривается проектная среда, включая средства онтологической связи диаграмм разного уровня детализации, редактирования диаграмм, трансформации моделей, генерации документации и программного кода и т.п. Предложенная методика направлена на решение основных проблем системного проектирования: когнитивности (сложность идентификации понятий при переходе с одного уровня абстракции на другой), конвергенции (размывание границ между отдельными уровнями абстракции) и инкапсуляции (фрагментарность классических визуальных языков и изолированность имеющихся инструментов).

Предлагаемая методика визуального системного проектирования производственных процессов на примере аддитивных технологий, представленная в виде совокупности визуальных моделей различного уровня детализации, объединенных единой компонентной методологией, реализованной с учетом требований системности, истинности, а также сложности и многовариантности представления знаний о компонентах, объектах и процессах социально-производственных систем, обеспечивает единство и синхронность процедур системного проекта вне зависимости от используемых методов.

В основе такой интеграции лежит система принципов визуального проектирования, построенная на основе целесообразности, преемственности и синхронности, охватывающая все этапы жизненного цикла. На ее основе реализуется интегрированная методика визуального проектирования, сочетающая в себе базовые инструменты для формализации, хранения и обработки знаний о сложных системах.

Результаты приведенных исследований могут быть полезны как проектировщикам и инженерам, работающим в области разработки электронной аппаратуры, так и широкой аудитории, интересующейся современными технологиями цифрового производства и проектирования.

Анализ структуры и состава стенда предиктивного управления энергоресурсами

Стенд предиктивного управления энергоресурсами [39–41] реализуется по модульной структуре, каждый из модулей располагается на специализированном шасси (рис. 1). Центральным элементом стенда является микроконтроллерный блок управления на базе ESP32, который осуществляет связь с сервером. Блок управления способен взаимодействовать с сервером, передавая и принимая данные о текущем состоянии стенда. Микроконтроллер управляет энергопотреблением стенда посредством модулей реле, подключенных через логические преобразователи уровня для согласования напряжений сигналов.

Для каждого потребителя и источника электроэнергии предусмотрены датчики напряжения и тока, обеспечивающие контроль производства и потребления электроэнергии. В стенде предусмотрены основной и резервный аккумуляторы. Резервный аккумулятор необходим в случае непредвиденных ситуаций и увеличивает максимальный запас электроэнергии. В цепь электропитания включены контроллер заряда и разряда аккумуляторов, а также стабилизаторы напряжения для обеспечения энергией различных модулей: датчиков, нагрузок, микроконтроллера, релейных модулей и т.д. Стенд

реализует алгоритмы управления, которые управляют подачей электроэнергии на выходные группы потребителей. Имеется возможность мониторинга системы: текущего состояния генерации электроэнергии, текущего потребления мощности и заряда АКБ (аккумуляторной батареи), графическое представление информации о предыдущих периодах работы Стенда, и предиктивный прогноз потребления и генерации мощности.

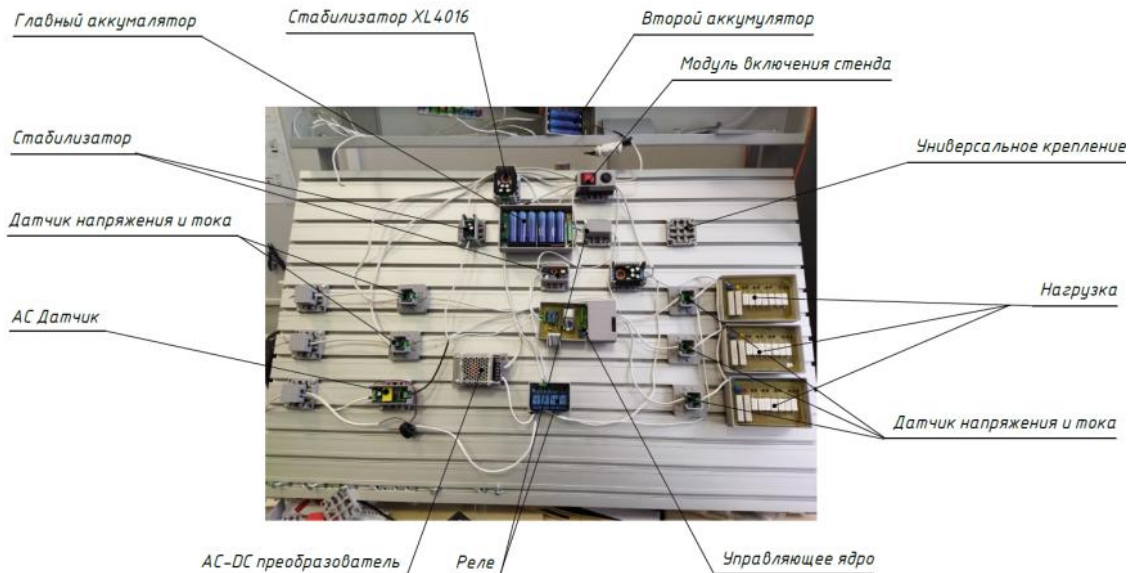


Рис. 1. Стенд предиктивной аналитики и управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии

На рис. 1 представлен стенд предиктивной аналитики с реализованными методами аддитивных технологий базовыми несущими конструкциями (БНК) и электронными блоками. Исследуем процессы изготовления блоков БНК методами аддитивных технологий средствами визуального моделирования.

Визуальные методы и модели системного анализа сложных систем

Под визуализацией проектирования сложных систем понимается способ формального описания процессов проектирования и готового объекта в виде универсального каллиграфа с возможностью иерархической декомпозиции их элементов [1]. Термин «Визуальное моделирование» подразумевает использование в процессе анализа визуальных выражений (графиков, рисунков, пиктограмм, таблиц), которые являются элементами графического языка. Этот термин относится к таким способам, которые позволяют представлять знания об объекте проектирования в дву- (или более) мерном виде.

В основе визуальных методов проектирования лежат визуальные языки и методики разработки моделей на их основе [1–4]. Визуальный язык определяется как язык, систематически использующий визуальные значения для описания своих основных объектов в текстовой и графической нотациях [5]. Традиционная классификация визуальных языков подразделяет их на [22]:

- диаграмматические языки, служащие для того, чтобы реализовывать схемы и диаграммы;
- иконические языки, применяющие естественные образы (пиктограммы) для представления объектов и действий;
- формулярные языки, опирающиеся на использование в модели формуляров и бланков документов.

Основными направлениями в области перспективных визуальных языков являются следующие:

- создание визуальных языков поддержки когнитивного проектирования;
- создание визуальных языков поддержки функционального проектирования;
- создание визуальных языков поддержки объектно-ориентированного проектирования;
- создание универсальных визуальных языков группового (параллельного) проектирования.

В общем случае объектом представления с помощью визуальных методов являются знания и данные по конкретной предметной области, описывающие проектируемую сложную систему в формальной форме.

Методы использования визуального моделирования предписывают правила применения визуальных языков для решения тех или иных задач. Методы реализованы в программных инструментах, позволяющих удобно работать с визуальными языками и пользоваться тем или иным методом их применения. В состав подобных программ входят прежде всего графические редакторы, а также средства валидации моделей, генераторы конечного кода по диаграммам и т.д.

Различные визуальные методы различаются не только составом и характером моделей, которые разрабатываются в ходе проекта, но и подходами к их формализации. Каждая модель визуального проекта включает, как правило, текстовую и графическую нотации. На каждом этапе проектирования требования к составу, структуре и полноте графической и текстовых нотаций должны быть сформированы исходя из принципа «минимальной достаточности», так как это определяет скорость и трудоемкость разработки.

Иницирующим этапом является концептуально-абстрактная визуализация. Здесь применяются наименее формализованные методики, поскольку его основная задача – сделать максимально простым моделирование для специалистов предметных областей, максимально раскрыть их творческие способности. Применение абстрактного моделирования на ранних стадиях позволяет с наименьшими затратами перейти к моделированию бизнес-процессов (т.е. уже на начальном этапе в процессе изучения предметной области, еще до начала формализации, задается система понятий и декомпозиционных схем, наиболее адекватных исследуемой предметной области).

Следующий этап связан с разработкой структурно-функциональных моделей с точки зрения структурно-функционального и процессного подходов. Особенно важным для моделирования является повышение уровня адекватности модели, для этого в цикл вводятся такие этапы, как имитационное моделирование и оптимизация бизнес-процессов по интегральным и дифференциальным критериям, которые позволяют оценивать результаты полученных решений.

На системном этапе реализуется объектно-ориентированная модель, построенная с помощью, например, RUP, которая позволяет создать на ее базе каркас цифрового представления предметной области, который далее развивается.

В результате системного проектирования строится совокупность синхронизированных визуальных моделей различного уровня детализации, реализованных с учетом требований системности и адекватности знаний о компонентах, объектах и процессах предметной области.

Анализ объекта системного проектирования

В качестве объекта системного проектирования рассмотрим процесс применения аддитивных технологий для изготовления БНК блоков стенда предиктивного анализа и управления энергосистемами различного назначения. Данный стенд является основой для построения цифрового двойника [6, 7] системы управления энергосистемой, которая реализована на основе возобновляемых источников энергии [39–41]. Разработка БНК стенда требует минимизации их себестоимости и сроков разработки при широкой номенклатуре возможных БНК при единичном производстве. Такие требования возможно удовлетворить, используя технологии аддитивного производства.

Аддитивные технологии – это технологии, при которых изделия создаются путем нанесения множества слоев материала на основе цифрового преобразования топологии [25–38]. Такие технологии находят все более широкое применение во многих отраслях, в том числе в производстве несущих конструкций электронной аппаратуры. Аддитивные технологии получили широкое развитие начиная с середины 80-х годов прошлого века. Обобщенная классификация основных аддитивных технологий представлена на рис. 2 [33].

Для размещения на стенде функциональных модулей используется линейка специализированных БНК. БНК применяют в ЭА, построенных по модульному принципу. Они предназначены для обеспечения:

- конструктивной совместимости;
- размерной взаимозаменяемости по габаритам и монтажным размерам (фиксирующие отверстия, контуры и т. д.) электронных модулей;
- рационального использования площади и объема носителей;
- технологичности конструкций.

Система построения и входимости БНК по ГОСТ 51623–2020 предусматривает три уровня разукрупнения: БНК1, БНК2 и БНК3. Схема построения ЭА может быть двух видов:

- двухуровневая (Ячейка – Шкаф);
- трехуровневая (Ячейка – Блок – Шкаф; Ячейка – Контейнер – Рама и т.д.).

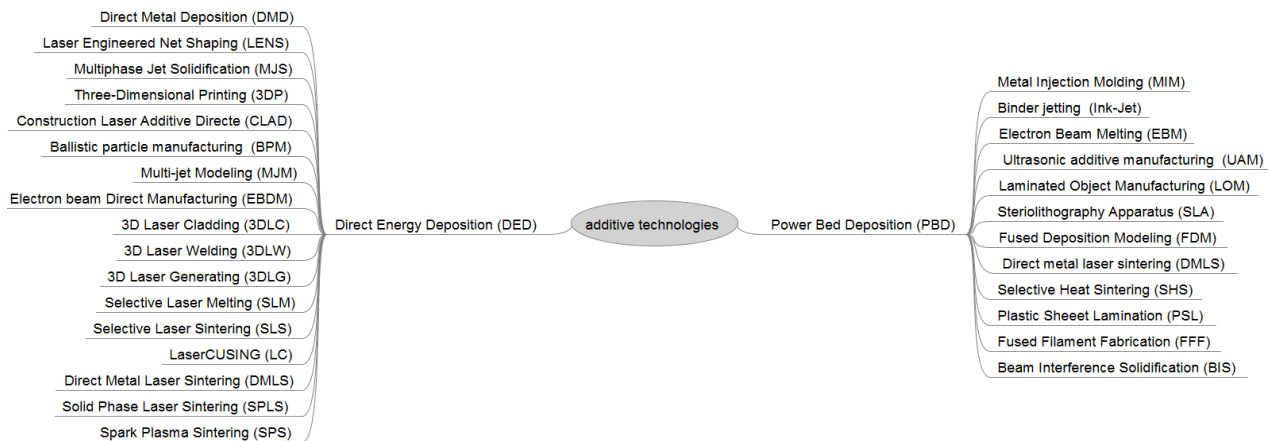


Рис. 2. Классификация видов аддитивных технологий

БНК первого уровня предназначены для создания электронных модулей первого уровня (ЭМ1) цифровых и аналоговых электронных средств (ЭС), а также модулей системы вторичного электропитания и управления. Для всех видов модулей применяют типовые электрические соединители, обеспечивающие заданные требования к ЭС. Допускается установка дополнительных электрических соединителей на передних панелях БНК1.

БНК 1 бывают каркасного и бескаркасного типа. БНК 1 может иметь защитный экран, радиатор. БНК 1 устанавливают в конструкции более высокого уровня разукрупнения по направляющим: в корпус вставного блока – параллельно лицевой панели или параллельно боковым стенкам, в блочный каркас (или корпус шкафа) – параллельно боковым стенкам.

Координационные размеры БНК1 определяются размером печатной платы (ПП). По модульному принципу размеры БНК1 могут превышать размеры ПП на значение, кратное 2,5 мм.

Блоки второго уровня предназначены для создания электронных модулей второго уровня (ЭМ2). Они базируются на сборочной единице, состоящей из боковых рам, соединенных профилями и стяжками, или монолитных конструкций.

Блочный каркас выполняет функцию размещения БНК1 или корпусов вставных блоков и служит промежуточным элементом между этими конструктивами и БНК3. Он обладает боковыми монтажными фланцами для крепления в БНК3 с использованием винтов на лицевых сторонах вертикальных профилей или через дополнительную крепежную арматуру. БНК1 размещают в корпусе вставного блока в один или два ряда по высоте, устанавливая корпус вставного блока в блочный каркас или непосредственно в БНК3.

Электрические соединения ЭМ1 в БНК2 осуществляются через соединительные печатные платы, включая многослойные варианты, и кабельные соединения. Вывод внешних электрических связей из БНК2 определяется ее компоновкой в БНК3, а при агрегатировании в составе ЭА используются в основном плоские кабели. Линейные размеры БНК2 зависят от размеров БНК1 и БНК3.

БНК третьего уровня предназначены для создания электронных модулей третьего уровня (ЭМ3) и имеют конструктивную основу, состоящую из вертикальных и горизонтальных профилей. БНК3 может включать в себя стойки, корпуса шкафов, пульта, моноблоки, стеллажи, тумбы, секции, приборные столы и монтажные рамы. Стойка представляет собой конструкцию на основе вертикальных профилей с элементами межэтажного разделения, а корпус шкафа отличается наличием передней и иногда задней двери. Корпус пульта характеризуется наличием вертикальных, горизонтальных и наклонных панелей, а также специальных элементов крепления для размещения элементов управления и отображения информации.

Стеллаж – это стойка без задней и боковых стенок, оснащенная сплошными горизонтальными перегородками для размещения блоков в настольном и переносном исполнении. Электрические соединения между электронными модулями третьего уровня (ЭМ3) обычно выполняются с использованием плоских кабелей. Графическое изображение БНК1–3 представлено на рис. 3.

Для обеспечения защиты и надежного соединения электронных ячеек стенда предиктивной аналитики и управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии требуется разработка БНК модулей стенда с креплением на вертикальный направляющий профиль (см. рис. 1).

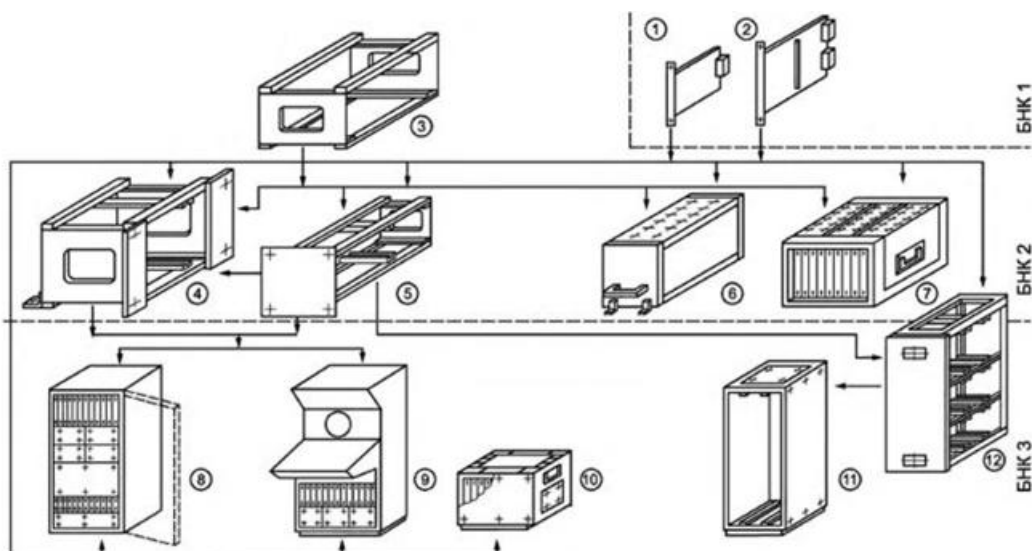


Рис. 3. Система построения БНК:


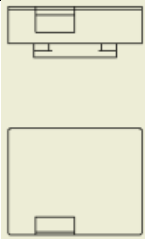

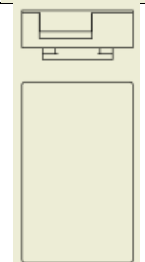
- 1, 2 – ячейки; 3 – корпус блока; 4 – блочный каркас; 5 – корпус вставного блока;
- 6 – корпус блока; 7 – корпус контейнера; 8 – корпус шкафа; 9 – корпус пульта;
- 10 – корпус моноблок; 11 – корпус шкафа для выдвижной стойки; 12 – выдвижная стойка

В качестве технологического процесса производства этих корпусов применены аддитивные технологии, которые обеспечивают быстрое производство прототипов и как правило не требуют последующей обработки деталей.

Для стенда были разработаны корпуса (тип БНК2) для каждого функционального блока. Эти корпуса крепятся к основанию стенда (тип БНК3) с использованием универсального крепежного элемента. Конструкции корпусов также адаптированы для последующего производства с использованием аддитивных методов. Основные размеры электронных ячеек (тип БНК1) были использованы для создания корпусов. В табл. 1 приведен анализ сборочного состава стенда БНК2, а в табл. 2 представлен анализ сборочного состава всех корпусов стенда. Все размеры и характеристики соответствуют стандартам ГОСТ Р 51623-2000, определяющим уровни разукрупнения ЭА по функциональной и конструктивной сложности.

Таблица 1

Анализ сборочного состава стенда БНК2

Наименования электронной ячейки	Вид	Эскизы	Размер,мм	БНК
1	2	3	4	5
Управляющее ядро			100×80	БНК2
Главный аккумулятор			160×95	БНК2

Окончание табл. 1


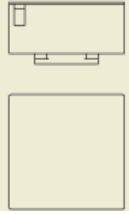



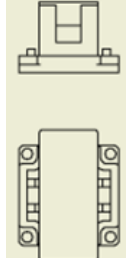
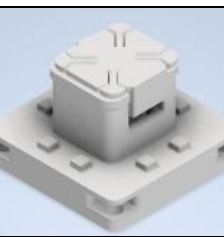
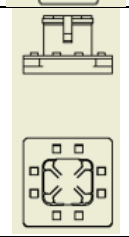

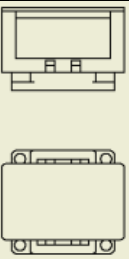



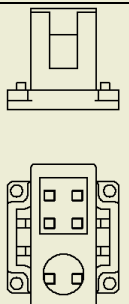
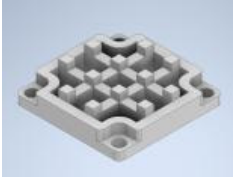
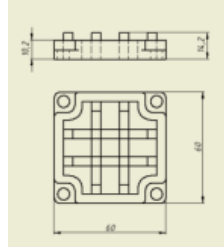
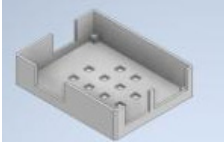
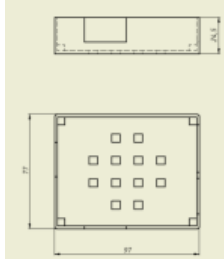

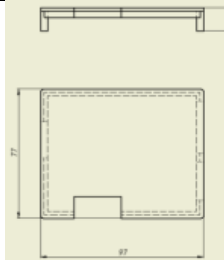
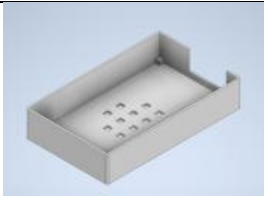
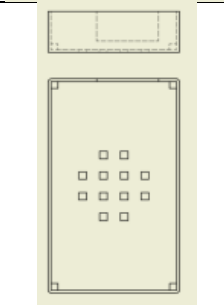
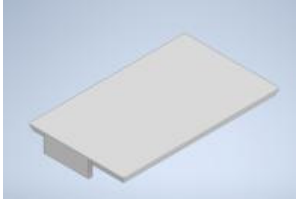
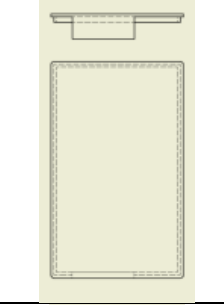
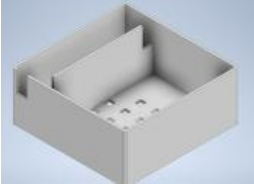
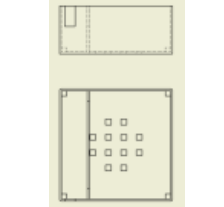
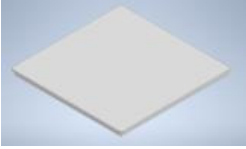

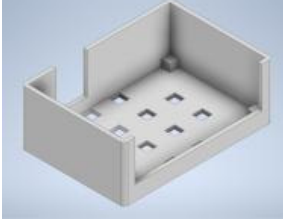

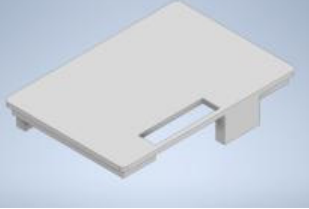



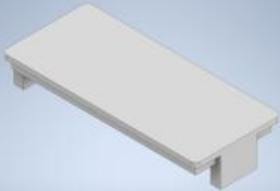
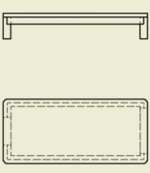
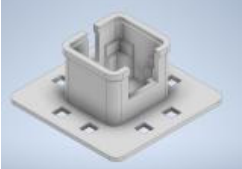
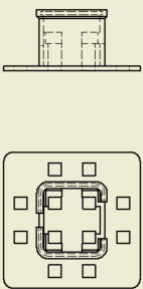
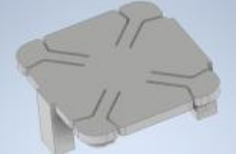

1	2	3	4	5
Резервный аккумулятор			110×110	БНК2
Модуль реле			60×80	БНК2
АС датчика			80×60	БНК2
Датчика DC напряжения и тока			60×60	БНК2
DC-DC стабилизатор XL4016			70×60	БНК2
Модуль нагрузки			140×90	БНК2
Переключатель питания стенда			80×60	БНК2

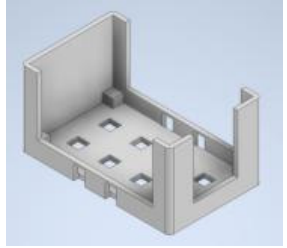
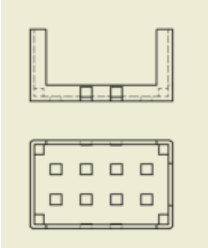

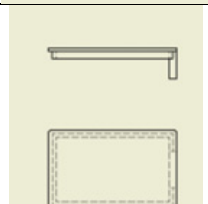
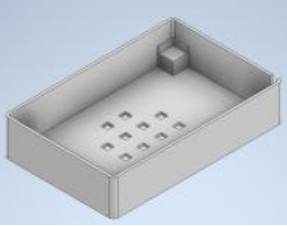
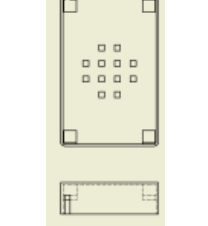

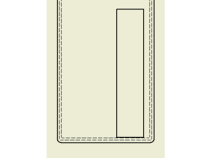
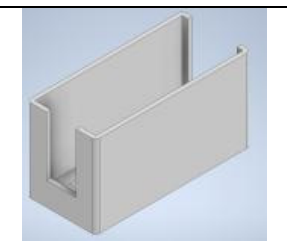
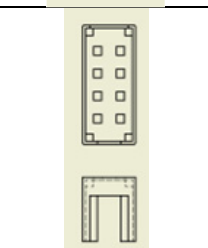
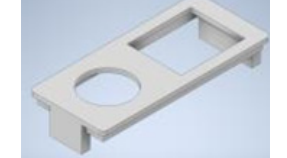
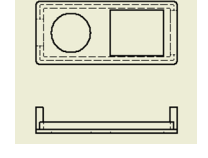
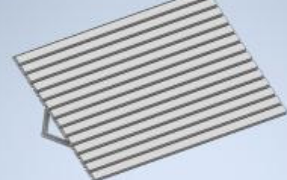
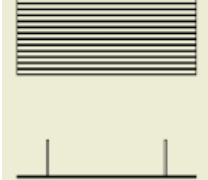
Таблица 2

Анализ сборочного состава корпусов стенда

Наименования корпуса	Внешний вид корпуса	Эскиз корпуса	Характеристика установки и способов фиксации
1	2	3	4
Универсальное крепление			Винтовое соединение стенда и стеллажа, установка в натяг корпуса
Корпус для управляющего ядра			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка корпуса для управляющего ядра			Установка в натяг с корпусом
Корпус главного аккумулятора			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка корпуса главного аккумулятора			Установка в натяг с корпусом
Корпус второго аккумулятора			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Крышка корпуса второго аккумулятора			Установка в натяг с корпусом
Корпус реле			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка корпуса реле			Установка в натяг с корпусом
Корпус АС датчика			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка корпуса АС датчика			Установка в натяг с корпусом
Корпус датчика			Установка в натяг с универсальным креплением, установка крышки корпуса с фиксацией с помощью защелок
Крышка корпуса датчика			Установка в корпус с фиксацией с помощью защелок

1	2	3	4
Корпус DC-DC стабилизатора XL4016			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка корпуса DC-DC стабилизатора XL4016			Установка в натяг с корпусом
Корпус модуля нагрузки			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка модуля нагрузки			Установка в натяг с корпусом
Корпус модуля включения стенда			Установка в натяг с универсальным креплением, установка в натяг с крышкой корпуса
Крышка модуля включения стенда			Установка в натяг с корпусом
Стеллаж стенда			Винтовое соединение с универсальными креплениями

Маршрут производства и сборки корпусов стенда предиктивной аналитики включает следующие операции:

- 1) разработка конструкции корпусов БНК;
- 2) разработка управляющих программ для оборудования 3D-печати;

- 3) 3D-печать корпусов (экструзия);
- 4) контроль линейных размеров;
- 5) установка и компоновка универсальных креплений;
- 6) фиксация универсальных креплений;
- 7) установка корпусов;
- 8) установка крышек корпусов;
- 9) контроль количества установленных единиц.

Разработка концептуально-абстрактной модели производства и сборки корпусов стенда предиктивной аналитики

Как было отмечено выше, инициирующим этапом системного проекта является разработка концептуально-абстрактной модели. Маршрут производства и сборки корпусов стенда на этом этапе можно представить в виде, представленном на рис. 4.



Рис. 4. Концептуально-абстрактная модель ТП сборки стенда

Данная модель иллюстрирует исследуемый процесс в общем, представляет состав понятий (семантическую модель) предметной области и связей между ними. Для дальнейшей детализации предметной области проводится структурно-функциональная декомпозиция, например, с использованием методик IDEF.

Разработка структурно-функциональной модели

Структурно-функциональная декомпозиция производственного процесса представлена в виде модели в нотации IDEF0. На рис. 5 представлена контекстная диаграмма, которая иллюстрирует взаимодействие исследуемого процесса с внешней средой. Процесс выполняется путем преобразования входных материалов (комплектующих стенда) в готовый прототип и РКД. Работа производится персоналом с использованием соответствующей документации. Процесс осуществляется под управлением нормативных документов, стандартов и технических требований.

На первом уровне декомпозиции (рис. 6) модель представляет собой пять взаимосвязанных работ, представленных в нотации IDEF0: «Анализ ТЗ», «Проектирование БНК», «Изготовление БНК», «Сборка стенда», «Тестирование». Все эти работы выполняются с помощью персонала с использованием оборудования и специального ПО, под управлением стандартов и нормативных документов.

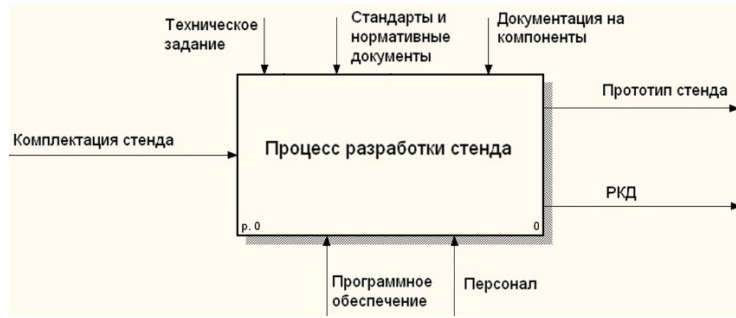


Рис. 5. Контекстная диаграмма ТП разработки стенда в нотации IDEF0

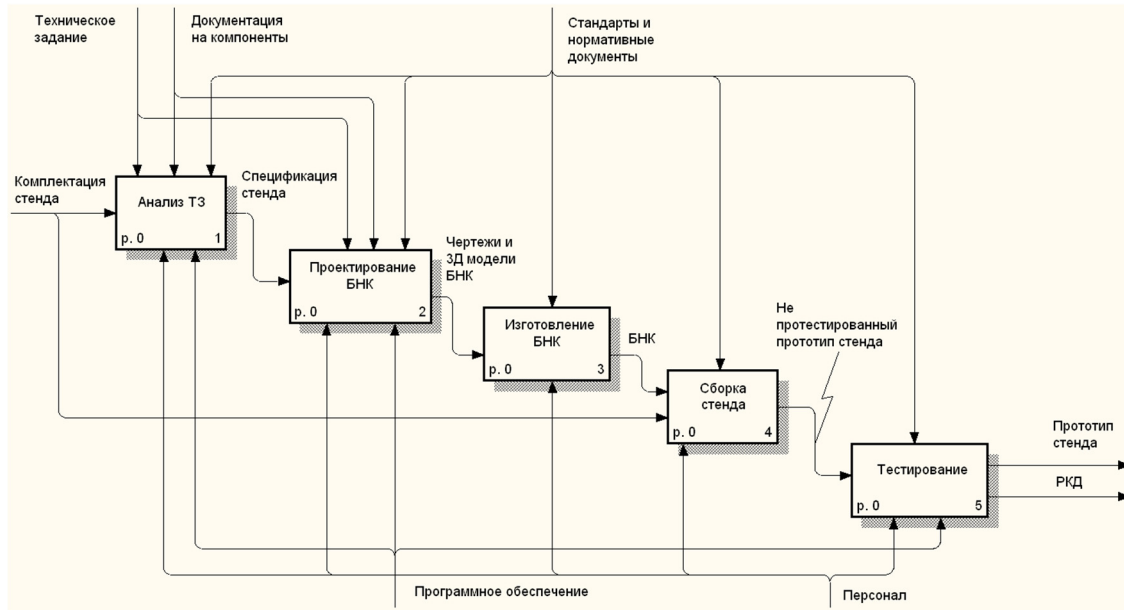


Рис. 6. Первый уровень декомпозиции маршрута производства и сборки корпусов стенда предиктивной аналитики в нотации IDEF0

На входе получаем все необходимые компоненты и начальные данные (сверху) для разработки стенда. Конечным этапом является прототип стенда и комплект конструкторской документации.

Работа «Анализ ТЗ» на втором уровне декомпозиции (рис. 7) включает работы «Анализ требований и целей», «Анализ ресурсов и трудоемкости» и «Консультация с заказчиком», «Оценка рисков».

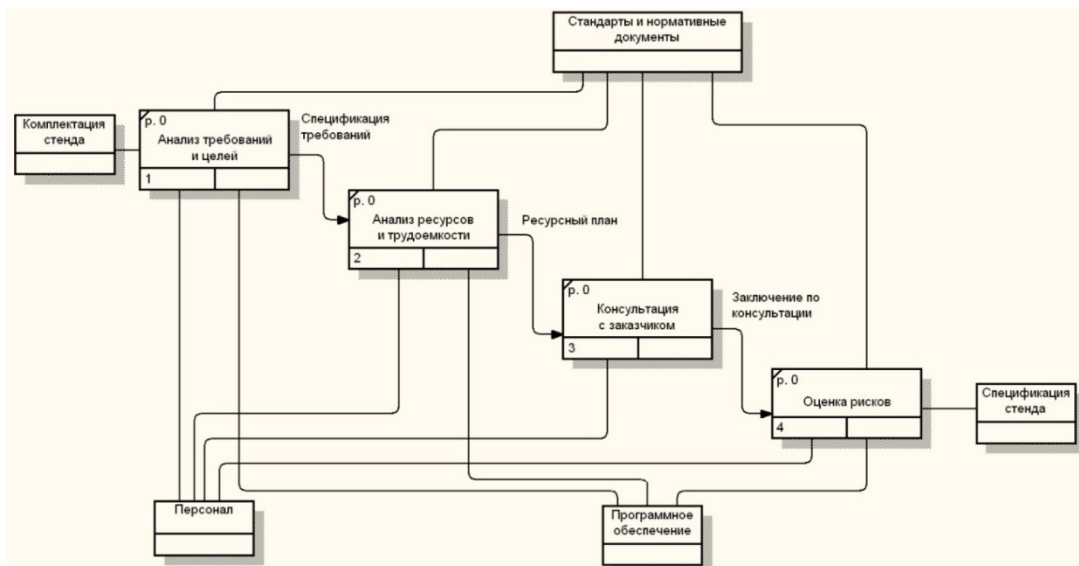


Рис. 7. Второй уровень декомпозиции работы «Анализ ТЗ» в нотации IDEF0

Работа «Анализ требований и целей» преобразует входные воздействия в виде ТЗ в «Спецификация требований». Работа «Анализ ресурсов и трудоемкости» преобразует входные воздействия в виде «Спецификация требований» в «Ресурсный план». Работа «Консультация с заказчиком» преобразует входные воздействия в виде «Ресурсный план» в «Заключение с заказчиком». Работа «Оценка рисков» преобразует входные воздействия в виде «Заключение с заказчиком» в РТЗ. Данные работы осуществляются под управлением «Стандартов и нормативных документов» при участии персонала, ПО.

Работа «Проектирование БНК» на втором уровне декомпозиции (рис. 8) включает работы «Снятие размеров электронных ячеек», «Эскизирование БНК», «Моделирование БНК».

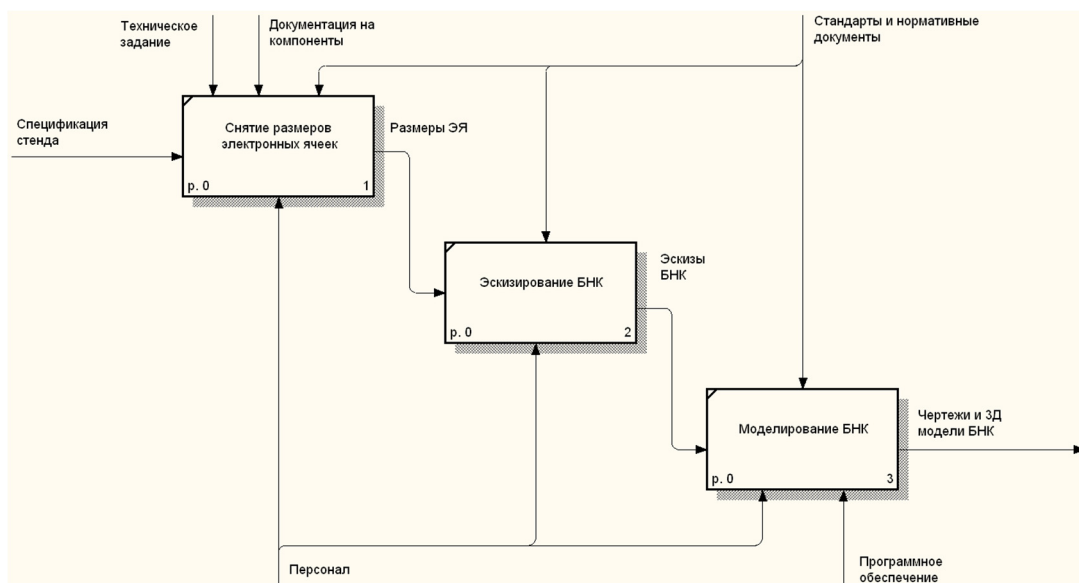


Рис. 8. Второй уровень декомпозиции работы «Проектирование БНК» в нотации IDEF0

Работа «Снятие размеров электронных ячеек» преобразует входные воздействия в виде «Спецификации стенда» в «Размеры ЭЯ» (Электронные ячейки), под управлением «Технического задания» и «Документации на компоненты». Работа «Эскизирование БНК» преобразует входные воздействия в виде «Размеров ЭЯ» в «Эскизы БНК». Работа «Моделирование» преобразует входные воздействия в виде «Эскизов БНК» в «Чертежи и 3D модели БНК». Данные работы осуществляются под управлением «Стандартов и нормативных документов» при участии персонала, ПО. Результаты работы «Проектирование БНК» в виде 3D-моделей и чертежей приведены в табл. 1 и 2.

Работа «Изготовление БНК» (рис. 9) на втором уровне декомпозиции (рис. 9) включает работы «Настройка параметров печати», «Печать БНК», «Удаление поддерживающих элементов», «Обработка поверхностей».

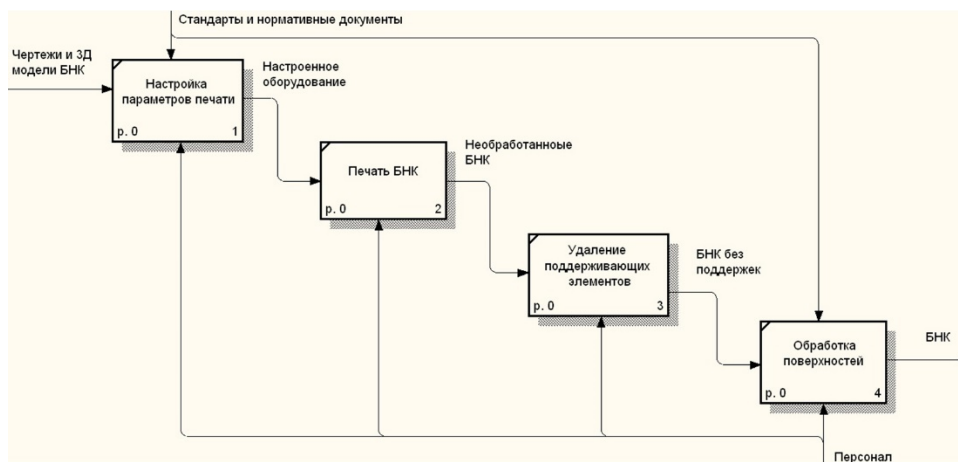


Рис. 9. Второй уровень декомпозиции работы «Изготовление БНК» в нотации IDEF0

Работа «Настройка параметров печати» преобразует входные воздействия в виде «Чертежей и 3D моделей БНК» в «Настроенное оборудование». Работа заключается в настройке оптимальных параметров печати для каждого элемента БНК. Основное внимание уделяется настройке параметров: скорости линейного перемещения, температурные режимы, конструкция поддерживающих элементов и другие параметры. Работа «Печать БНК» преобразует входные воздействия в виде «Настроенного оборудование» в «Необработанные БНК». Работа «Удаление поддерживающих элементов» преобразует входные воздействия в виде «Необработанного БНК» в «БНК без поддержек». Работа «Обработка поверхностей» преобразует входные воздействия в виде «БНК без поддержек» в БНК. Данные работы осуществляются под управлением «Стандартов и нормативных документов» при участии персонала.

Работа «Тестирование» (рис. 10) на втором уровне декомпозиции (рис. 10) представляет из себя работы «Функциональное тестирование», «Нагрузочное тестирование», «Тестирование надежности и устойчивости».

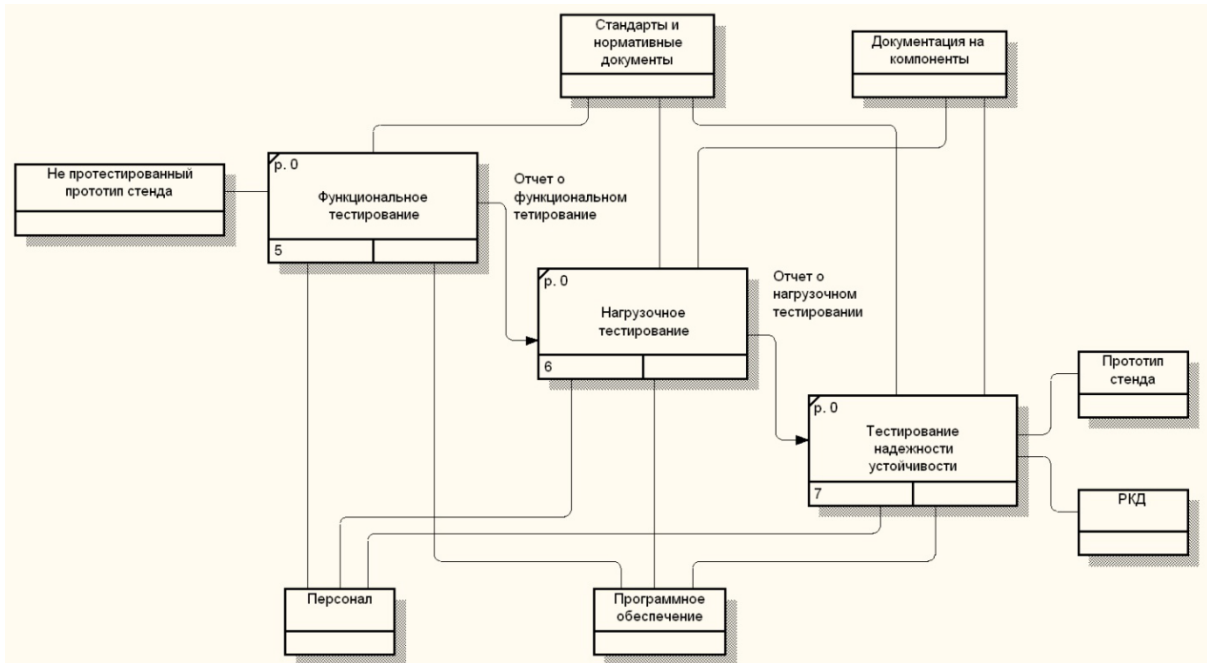


Рис. 10. Второй уровень декомпозиции работа «Тестирование» в нотации IDEF0

Итог моделирования представляет собой иерархическая диаграмма (рис. 11) в виде дерева узлов, являющегося моделью декомпозированного технологического процесса. Диаграмма дерева узлов показывает иерархическую структуру работ в ТП разработки «Системы управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии». Она помогает понять, как различные элементы ТП связаны друг с другом, и облегчает определение основных работ и их отношений.

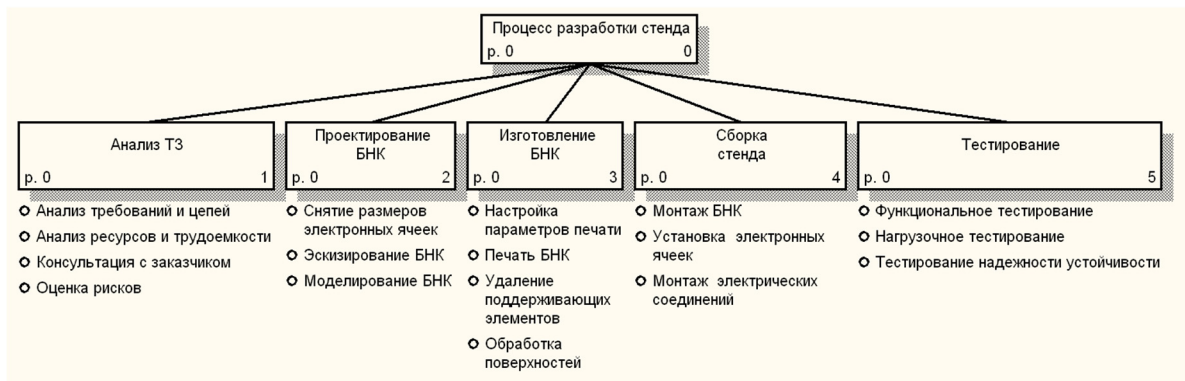


Рис. 11. Диаграмма дерева узлов ТП разработки «Системы управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии»

На диаграмме дерева узлов представлен процесс разработки «Системы управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии». Анализируя исходный маршрут и построенную диаграмму дерева узлов, можно сделать вывод, что все технологические операции исходного ТП описаны в структурно-функциональной модели и полностью соответствуют исследуемому ТП.

Заключение

Разработанные концептуально-абстрактные и структурно-функциональные модели на различных уровнях декомпозиции отражают суть системной инженерии процессов аддитивных технологий на примере создания стенда «Система управления энергосистемами различного назначения на базе возобновляемых источников энергии».

На начальном этапе моделирования строится контекстная диаграмма, которая иллюстрирует взаимодействие исследуемого процесса с внешней средой.

Далее последовательно строится иерархическая декомпозиция на различных уровнях детализации до достижения атомарного уровня – уровня конкретной операции (перехода), выполняющейся на конкретном рабочем месте конкретным рабочим.

Таким образом, на первом уровне декомпозиции была представлена уточненная модель верхнего уровня в виде совокупности трех работ («Анализ ТЗ», «Проектирование», «Тестирование»), формализованных согласно требований нотации IDEF0. Далее эти работы разбиваются на два уровня декомпозиции также в нотации IDEF0. Процесс продолжается до достижения атомарного уровня моделирования, для технологических процессов это уровень перехода.

Итоговая иерархическая диаграмма дерева узлов представляет полную декомпозицию технологического процесса и дает возможность детально проследить все операции и переходы исследуемого технологического процесса.

В работе предложена авторская методика системной инженерии сложных систем посредством построения визуальных моделей на всех этапах жизненного цикла, при котором характер построения моделей является итеративным. Данная методика отражает новую концепцию визуального системного проектирования сложных систем, включая реализацию онтологической связи диаграмм разного уровня экспертизы, редактирования диаграмм, трансформации моделей, генерации документации и программного кода.

Сформирована система принципов визуального проектирования, построенная на основе целесообразности, преемственности и охватывающая все этапы работ, включая моделирование процессов и проектирование информационных компонентов поддержки жизненного цикла на примере изделий цифровой техники.

Практическая ценность работы заключается в возможности ее применения для реализации эффективных подходов к системной инженерии на примере использования аддитивных технологий для создания базовых несущих конструкций. Реализация результатов направлена на выполнение системных этапов визуального проектирования сложных систем, что позволяет повысить эффективность проектных работ в полном объеме, без потери каких-либо важных элементов проекта и без превышения установленных сроков проектирования.

В работе показано, что применение аддитивных технологий для создания деталей и компонентов ЭА общего назначения позволяет ускорить процесс разработки и снизить затраты на изготовление. Благодаря этому создание новых моделей может происходить быстрее и эффективнее, что позволяет улучшить качество и функциональность продуктов.

Список литературы

1. Власов А. И. Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8-9. С. 19–25.
2. Адамов А. П., Адамова А. А., Темиров А. Т. Методика системного конструкторско-технологического проектирования изделий электронной техники с учетом требований концепции «Индустрия 4.0» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 310–317.
3. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Основы системного анализа : учебник. 2-е изд., доп. Томск : Изд-во НТЛ, 1997. 396 с.
4. Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование smart-технологий проектного управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 64–70.

5. Адамов А. П., Адамова А. А. Семантический анализ перспективных изделий микро- и нанoeлектроники с точки зрения увеличения ключевых показателей качества и технологичности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 94–101.
6. Курносенко А. Е., Власов А. И. Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 3. С. 126–134.
7. Shakhnov V. A., Kurnosenko A. E., Demin A. A., Vlasov A. I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software 2020. Vol. 2. P. 864–875.
8. Vlasov A. I., Kurnosenko A. E., Juravleva L. V., Lysenko O. A. Trend analysis in the development of factories of the future, taking into account digital transformation of active systems // Digital Economy and Finances : proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference DEFIN 2021. ACM International Conference Proceeding Series. 4. 2021. P. 3490881. doi: 10.1145/3487757.3490881
9. Адамова А. А. Применение инструментов когнитивной графики в преподавании конструкторско-технологических дисциплин // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 3. С. 79–85.
10. Власов А. И., Маринова Е. А. Анализ методов визуального моделирования сложных систем // Динамика сложных систем – XXI век. 2020. Т. 14, № 3. С. 5–22.
11. Vlasov A. I., Gonoshilov D. S. Simulation of manufacturing systems using BPMN visual tools // Journal of Physics Conference Series. 2019. 1353(1). IOP Publishing. P. 012043. doi: 10.1088/1742-6596/1353/1/012043
12. Власов А. И., Гоношилов Д. С. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов BPMN // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3. С. 10–16.
13. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Анализ средств разработки визуальных BPMN-моделей сложных систем // Динамика сложных систем – XXI век. 2020. Т. 14, № 1. С. 5–22.
14. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Применение визуальных инструментов BPMN для моделирования технологической подготовки производства (обзор) // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1. С. 14–26.
15. Власов А. И., Смагулов Н. Б. Особенности применения визуальной методологии ARIS для моделирования производственных процессов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 1. С. 8–13.
16. Власов А. И. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов методологии ARIS // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 21–32.
17. Зубкова А. И., Королева Ю. П., Власов А. И. Сравнительный анализ технологии визуального моделирования ARCHIMATE // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 3. С. 9–16.
18. Кочешков А. Э., Карпунин А. А. Технология ARCHIMATE – новый стандарт моделирования архитектуры предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. С. 3–9.
19. Власов А. И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем // Датчики и системы. 2013. № 9. С. 10–28.
20. Vlasov A., Naumenko A. Analysis of visual modeling tools development for complex production systems // Lecture Notes in Information Systems And Organisation. 3rd. Ser. «Digital Transformation in Industry – Digital Twins and New Business Models». 2022. Vol. 54. P. 335–346. doi: 10.1007/978-3-030-94617-3_24
21. Vlasov A., Shakhnov V., Juravleva L. Analysis of data formats of visual models of system design in conditions of synchronous design technologies // CEUR Workshop Proceedings. SibDATA 2021. 2021. P. 34–43.
22. Vlasov A. I., Shakhnov V. A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. Ser. «Digital Transformation in Industry – Trends, Management, Strategies». 2021. Vol. 44. P. 57–65. doi: 10.1007/978-3-030-73261-5_6
23. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Методы формализации когнитивной графики и визуальных моделей с использованием схем XML // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2021. № 1. С. 51–77.
24. Vlasov A. I., Berdyugina O. N., Krivoshein A. I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things // Global Smart Industry Conference Glosic 2018 : proceedings. 2018. P. 8570062. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570062
25. Селиванов К. В., Волков Г. А. Применение аддитивных технологий в производстве электронной аппаратуры // Датчики и системы. 2023. № 5. С. 27–34.
26. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77.
27. Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О. [и др.]. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 95–110.
28. Захарова В. О., Селиванов К. В. Перспективы аддитивной профилизации беспилотных летательных аппаратов // Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем : тр. Междунар. науч.-техн. конф. М., 2023. С. 139.

29. Арабов Д. И., Верясова А. Ю., Гриднев В. Н. Комплексное макетирование узлов вычислительной техники с использованием инфраструктуры цифрового производства (FAB-LAB) в условиях сквозного обеспечения качества // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 1. С. 189–192.
30. Арабов Д. И., Власов А. И., Гриднев В. Н. [и др.]. FAB-LAB-технологии быстрого прототипирования изделий электронной техники // Современные научные исследования: методология, теория, практика : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Центр содействия развитию научных исследований. Челябинск, 2014. С. 162–179.
31. Арабов Д. И., Новиков И. П. Анализ методов и средств автоматизации прототипирования электронных изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2. С. 63–68.
32. Арабов Д. И., Власов А. И., Гриднев В. Н., Григорьев П. В. Концепция цифрового инструментального производства (FAB LAB) для прототипирования изделий электронной техники // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5-3. С. 23–34.
33. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2373. P. 072035.
34. Sokolov Yu. A., Pavlushin N. V., Kondrat'ev S. Yu. New additive technologies based on ion beams // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 12. P. 1012–1016.
35. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Trunova E. A. [et al.]. Electrospark dispersion in nanopowder production for additive technologies // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. P. 133–136.
36. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis, ChemCatChem. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.
37. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
38. Ramji Pandey Photopolymers in 3D printing applications // Arcada. Degree Thesis Plastics Technology. 2014. № 51.
39. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. [et al.]. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review // Energies. 2023. Vol. 16, № 10. P. 4025.
40. Echeistov V. V., Krivoshein A. I., Shakhnov V. A. [et al.]. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16, № 4. P. 515–522.
41. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 26–35.

References

1. Vlasov A.I. The concept of visual analysis of complex systems in the context of synchronous design technologies. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2016;(8-9):19–25. (In Russ.)
2. Adamov A.P., Adamova A.A., Temirov A.T. Methodology of system design and technological design of electronic equipment products taking into account the requirements of the concept "Industry 4.0". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:310–317. (In Russ.)
3. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Osnovy sistemnogo analiza: uchebnik. 2-e izd., dop. = Fundamentals of system analysis: textbook. 2nd ed., add.* Tomsk: Izd-vo NTL, 1997:396. (In Russ.)
4. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Kuryshv R.E. Visual modeling of smart technologies of project management. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:64–70. (In Russ.)
5. Adamov A.P., Adamova A.A. Semantic analysis of promising micro– and nanoelectronics products from the point of view of increasing key quality and manufacturability indicators. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):94–101. (In Russ.)
6. Kurnosenko A.E., Vlasov A.I. Application of multilevel decomposition to create a digital twin of the assembly production of electronic equipment. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2022;(3):126–134. (In Russ.)
7. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E., Demin A.A., Vlasov A.I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design. *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software*. 2020;2:864–875.
8. Vlasov A.I., Kurnosenko A.E., Juravleva L.V., Lysenko O.A. Trend analysis in the development of factories of the future, taking into account digital transformation of active systems. *Digital Economy and Finances: proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference DEFIN 2021. ACM International Conference Proceeding Series. 4*. 2021:3490881. doi: 10.1145/3487757.3490881
9. Adamova A.A. The use of cognitive graphics tools in teaching design and technological disciplines. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2016;(3):79–85. (In Russ.)
10. Vlasov A.I., Marikova E.A. Analysis of methods of visual modeling of complex systems. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of complex systems – XXI century*. 2020;14(3):5–22. (In Russ.)

11. Vlasov A.I., Gonoshilov D.S. Simulation of manufacturing systems using BPMN visual tools. *Journal of Physics Conference Series*. 2019;1353(1)HIMR:012043. doi: 10.1088/1742-6596/1353/1/012043
12. Vlasov A.I., Gonoshilov D.S. System analysis of production using visual BPMN tools. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2019;(3):10–16. (In Russ.)
13. Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Kazakov V.V. Analysis of tools for developing visual BPMN models of complex systems. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of complex systems – XXI century*. 2020;14(1):5–22. (In Russ.)
14. Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Kazakov V.V. Application of BPMN visual tools for modeling technological preparation of production (review). *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2020;(1):14–26. (In Russ.)
15. Vlasov A.I., Smagulov N.B. Features of the application of the visual ARIS methodology for modeling production processes. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2021;(1):8–13. (In Russ.)
16. Vlasov A.I. System analysis of production using visual tools of the ARIS methodology. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:21–32. (In Russ.)
17. Zubkova A.I., Koroleva Yu.P., Vlasov A.I. Comparative analysis of ARCHIMATE visual modeling technology. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2022;(3):9–16. (In Russ.)
18. Kocheshkov A.E., Karpunin A.A. ARCHIMATE technology – a new standard for modeling enterprise architecture. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2017;(4):3–9. (In Russ.)
19. Vlasov A.I. Spatial model for evaluating the evolution of methods of visual design of complex systems. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2013;(9):10–28. (In Russ.)
20. Vlasov A., Naumenko A. Analysis of visual modeling tools development for complex production systems. *Lecture Notes in Information Systems And Organisation. 3rd. Ser. «Digital Transformation in Industry – Digital Twins and New Business Models»*. 2022;54:335–346. doi: 10.1007/978-3-030-94617-3_24
21. Vlasov A., Shakhnov V., Juravleva L. Analysis of data formats of visual models of system design in conditions of synchronous design technologies. *CEUR Workshop Proceedings. SibDATA 2021*. 2021:34–43.
22. Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation. Ser. «Digital Transformation in Industry – Trends, Management, Strategies»*. 2021;44:57–65. doi: 10.1007/978-3-030-73261-5_6
23. Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Kazakov V.V. Methods of formalization of cognitive graphics and visual models using XML schemas. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroenie = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Instrument engineering*. 2021;(1):51–77. (In Russ.)
24. Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things. *Global Smart Industry Conference Glosic 2018: proceedings*. 2018:8570062. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570062
25. Selivanov K.V., Volkov G.A. Application of additive technologies in the production of electronic equipment. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2023;(5):27–34. (In Russ.)
26. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):70–77. (In Russ.)
27. Vlasov A.I., Garaev A.V., Zakharova V.O. et al. Methods of profiling unmanned aerial vehicles based on additive technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):95–110. (In Russ.)
28. Zakharova V.O., Selivanov K.V. Prospects of additive profiling of unmanned aerial vehicles. *Sovremennye tekhnologii nauchnogo priborostroeniya i informatsionno-izmeritel'nykh sistem: trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Modern technologies of scientific instrumentation and information and measuring systems : proceedings of the International scientific and technical conf. Moscow, 2023:139*. (In Russ.)
29. Arabov D.I., Veryasova A.Yu., Gridnev V.N. Complex layout of computer technology nodes using digital production infrastructure (FAB-LAB) in conditions of end-to-end quality assurance. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;1:189–192. (In Russ.)
30. Arabov D.I., Vlasov A.I., Gridnev V.N. et al. FAB-LAB-technologies for rapid prototyping of electronic equipment products. *Sovremennye nauchnye issledovaniya: metodologiya, teoriya, praktika: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Tsentra sodeystviya razvitiyu nauchnykh issledovaniy = Modern scientific research: methodology, theory, practice : materials of the II International Scientific and Practical Conference. The Center for the Promotion of Scientific Research. Chelyabinsk, 2014:162–179*. (In Russ.)

31. Arabov D.I., Novikov I.P. Analysis of methods and means of automation of prototyping of electronic products. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2018;(2):63–68. (In Russ.)
32. Arabov D.I., Vlasov A.I., Gridnev V.N., Grigor'ev P.V. The concept of digital tool manufacturing (FAB LAB) for prototyping electronic products. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2016;(5-3):23–34. (In Russ.)
33. Vlasov A.I., Juravleva L.V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2373:072035.
34. Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Yu. New additive technologies based on ion beams. *Russian Engineering Research*. 2016;12:1012–1016.
35. Sleptsov V.V., Savkin A.V., Trunova E.A. et al. Electrospray dispersion in nanopowder production for additive technologies. *Russian Engineering Research*. 2019;39:133–136.
36. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis. *Chem-CatChem*. 2018;10:1512–1525.
37. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2): 85–95. (In Russ.)
38. Ramji Pandey. Photopolymers in 3D printing applications. *Arcada. Degree Thesis Plastics Technology*. 2014;(51).
39. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. et al. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review. *Energies*. 2023;16(10):4025.
40. Echeistov V.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A. et al. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(4):515–522.
41. Vlasov A.I., Grigor'ev P.V., Krivoshein A.I. Model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2): 26–35. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Игоревич Власов

кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства ЭА, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: vlasovai@bmstu.ru

Георгий Алексеевич Волков

студент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: egor1234567890ego@mail.ru

Кирилл Владимирович Селиванов

кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства ЭА, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: selivanov_kv@mail.ru

Andrey I. Vlasov

Candidate of technical sciences, associate professor of the sub-department of design and technology of EA production, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Georgy A. Volkov

Student, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Kirill V. Selivanov

Candidate of technical sciences, associate professor of the sub-department of design and technology of EA production, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 20.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.03.2024

Принята к публикации / Accepted 10.04.2024