

# Машиностроение и машиноведение

УДК 004.896

doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-3-15

## Архитектура цифровой платформы исследования и проектирования инноваций в машино- и приборостроении

**В.Ф. Белов<sup>1</sup>, С.С. Гаврюшин<sup>2</sup>, А.И. Занкин<sup>1</sup>**<sup>1</sup> МГУ им. Н.П. Огарева<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Architecture of a Digital Platform for Research and Design of Innovations in Mechanical and Instrument Engineering

**V.F. Belov<sup>1</sup>, S.S. Gavryushin<sup>2</sup>, A.I. Zankin<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Ogarev Mordovia State University<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

В отечественном машиностроении платформенные бизнес-модели исследования и проектирования инновационных изделий пока еще не нашли массового применения. Вместе с тем организация производственных процессов на основе модели цифрового двойника прототипа и системы распределенных компетенций является мировым трендом при разработке и внедрении инновационных продуктов. Прикладная цифровая платформа, реализуемая в Центре проектирования инноваций промышленного технопарка Республики Мордовия, предоставляет услуги по инженерии требований, инженерии системной архитектуры и инженерии испытаний. Эти услуги выполняются при поддержке программных систем и связанного с ними оборудования, функционирующих в единой информационной среде. Одна из задач архитектурной проработки цифровой платформы заключается в выборе методов и средств интеграции систем CAD/CAM/CAE, промышленного программного обеспечения испытательного и технологического оборудования и вновь разрабатываемых сервисов в среду PLM Teamcenter. Другая задача состоит в обеспечении доступа к ресурсам платформы географически удаленных клиентов при максимальной локализации производства услуг внутри платформы. Ее решают на основе создания мощного инструментального ядра, включающего в себя самые современные вычислительные и телекоммуникационные системы, технологическое, испытательное оборудование и средства измерения. Рассмотренная в статье структура развертывания цифровой платформы отражает ее текущий статус.

**Ключевые слова:** цифровая платформа, инженерия системной архитектуры, цифровой двойник прототипа, инженерия требований, распределенное проектирование, инженерия испытаний

Platform business models for research and design of innovative products have not found widespread use in the national mechanical engineering branch yet. Meanwhile, the manufacturing process organization based on digital twin prototype and competence distribution models is a world trend in the innovative product design and implementation. The applied digital platform implemented at the Innovation Design Center of the Industrial Technopark of the Republic of Mordovia provides requirements engineering, system architecture engineering and test engineering services. These services are carried out with the support of software systems and related equipment operating in a single information environment. One of the challenges of the digital platform architectural design is the choice of methods and tools for integrating CAD/CAM/CAE systems, industrial software, test and process equipment and newly developed services into the PLM Teamcenter environment. Another task is to provide access to platform resources for geographically remote clients with maximum localization of services production within the platform. The task is solved on the basis of a powerful instrumental core, which includes the most modern computing and telecommunication systems, technological, test equipment and measuring instruments. The structure of the digital platform deployment considered in the paper reflects its current status.

**Keywords:** digital platform, system architecture engineering, digital twin prototype, requirements engineering, distributed design, test engineering

Географически распределенная реализация проектных процедур на основе цифровых технологий является преобладающим мировым трендом в организации процессов исследования и проектирования изделий машино- и приборостроения [1]. В последние годы все большее распространение получают гибкие методологии и цифровые платформы (ЦП) при организации разработки и производства технических систем [2–4].

Вместе с тем в отечественном машино- и приборостроении платформенные бизнес-модели исследования и проектирования инноваций пока еще не нашли массового применения, и оно ограничено отдельными удачными практиками и достижениями [5, 6].

Цель работы — исследование практических аспектов интеграции оборудования и программного обеспечения Центра проектирования инноваций (ЦПИ) АУ «Технопарк-Мордовия» в GRID-систему автоматизации проектирования прототипов и их цифровых двойников, обеспечивающей реализацию платформенной бизнес-модели ускоренного вывода на рынок инновационных изделий машино- и приборостроения.

Согласно определению, приведенному в исследованиях ПАО «Ростелеком» [7], «цифровая платформа — это система алгоритмизированных взаимовыгодных взаимоотношений значимого количества независимых участников отрасли экономики (или сферы деятельности), осуществляемых в единой информационной среде, приводящая к снижению транзакцион-

ных издержек за счет применения пакета цифровых технологий работы с данными и изменения системы разделения труда».

В самой общей формулировке под ЦП понимают интегрированные активы, позволяющие компании извлекать дополнительную ценность «за счет управления распределенной базой партнеров, а также гибким сплавом дизайна и разработок, поступающих из сообщества поставщиков и партнеров, уступая им часть своих производственных компетенций» [8].

Основными участниками отношений, связанных с платформой ЦПИ, являются поставщики (разработчики) проектов и их потребители (заказчики) в областях машино- и приборостроения, а также оператор ЦП, в роли которого выступает ЦПИ.

**Продукты и процессы.** Прикладная ЦП предоставляет услуги по инженерии требований, инженерии системной архитектуры и инженерии испытаний. Эти предметы ЦП реализуются как множество процессов и работ, выполняемых при поддержке программных систем, функционирующих в единой информационной среде, при максимальной локализации исполнения работ в подразделениях ЦПИ (рис. 1).

Продуктами ЦП в общем случае являются цифровой двойник прототипа, готовый для дальнейшей коммерциализации, и отдельные виды услуг, реализуемые в рамках функционала ЦП. В качестве опции потребителю может быть предоставлен прототип (опытный образец) продукта.



Рис. 1. Организационно-функциональная схема прикладной ЦП

Опытный образец — это полнофункциональная модель устройства в натуральную величину, максимально приближенная по характеристикам к массовому изделию и предназначенная для подтверждения возможности реализации новой идеи в реальном устройстве. Формальное определение этого термина дано в работе [9].

Цифровой двойник прототипа — это компьютерный образ, соответствующий конкретному физическому изделию. Он включает в себя геометрию, параметры и цифровую модель изделия, руководства и данные по его обслуживанию, спецификацию материалов, информацию о поведении изделия в различных условиях, о связях изделия с подключенными к нему объектами и программным обеспечением (ПО), отвечающим за управление им, мониторинг рабочего состояния и эксплуатации и т. д.

Элементы цифрового двойника формируются последовательно в процессе создания продуктов жизненного цикла прикладной ЦП. Окончательный вид он приобретает на завершающем этапе проекта. Термин «электронный макет», определенный в ГОСТ Р [10], отражает цифровой мир прототипа менее детально, чем термин «цифровой двойник».

Особую роль при проектировании технических инноваций (при разработке их прототипов или прототипировании) играет инженерия

требований. Современная практика такой инженерии рассматривает работы с требованиями как непрерывный процесс, продолжающийся на протяжении всего жизненного цикла прототипа. При этом выделяют два этапа этого процесса — разработку требований и управление ими [11].

На первом этапе проводят работы по созданию спецификации требований; на втором — по трассировке требований, управлению изменениями и выполнению требований.

Современные тенденции роста новизны и сложности проектных продуктов обуславливают большие риски их реализации и необходимость совместной работы междисциплинарных групп специалистов, находящихся в различных географических точках. Из этих особенностей проектирования инноваций следуют высокие требования к качеству обоснования проектов на начальном этапе их разработки и точности декомпозиции технического задания (ТЗ) на частные ТЗ (ЧТЗ) или технико-коммерческие предложения (ТКП) на продукт проекта.

Обоснование проекта включает в себя следующие работы: описание его продукта, формирование его базового расписания, технико-экономическое обоснование (ТЭО) и формирование на этой основе ТЗ на продукт. Современные гибкие модели управления проектами предполагают, что ТЗ разрабатывают постав-

щики совместно с потребителями до уровня спецификации требований [12]. Это принципиально отличается от классического подхода, предполагающего, что ТЗ разрабатывает заказчик, а спецификации — исполнитель.

Работы по трассировке требований, управлению изменениями и выполнению требований реализуются стандартными процедурами [13], осуществляемыми в единой информационной среде на всем протяжении работ по проектированию инновации.

Процессы инженерии системной архитектуры цифровой платформы ЦПИ включают в себя разработку моделей, чертежей и встроенного ПО, управление конфигурациями, формирование элементов цифрового двойника, создание опытного образца прототипа.

Процессы инженерии испытаний предусматривают разработку методик испытаний, проектирование и изготовление оснастки, измерения и регистрацию параметров, формирование цифрового двойника прототипа. Таким образом, в инженерии системной архитектуры и испытаний проводятся работы, соответствующие задачам эскизного проектирования, или опытно-конструкторские работы (ОКР).

Указанным на рис. 1 процессам соответствуют продукты жизненного цикла прототипа (его описание, базовое расписание проекта, ТЗ, ЧТЗ, ТЭО и т. д.). Эти продукты и методы их производства при реализации в рамках платформенной бизнес-модели инженерии прототипа имеют следующие отличительные особенности:

- ТЭО разработки прототипа не может ограничиваться только анализом работ (иерархия, длительность) и затрат на его создание, оно должно также учитывать модели производства и рыночной реализации массового изделия;
- ТЗ на разработку прототипа следует представлять как систему взаимосвязанных ЧТЗ с учетом ограничений на распределение работ по удаленным компетенциям;
- расписания отдельных проектов при их одновременной реализации требуют балансировки затрат на множестве доступных ресурсов ЦП;
- продукты ОКР, включая конструкторские решения и ПО прототипа, формируются интеграцией результатов ЧТЗ в соответствии с требованиями ТЗ на прототип;
- алгоритмы и протоколы испытаний опытного образца продукта генерируются с помо-

щью индустриального ПО, сложно интегрируемого в общую среду проектирования.

**Базовая структура ЦП.** Рассмотрим клиент-серверную архитектуру прикладной цифровой платформы ЦПИ, реализующую методологию распределенного проектирования и удаленное предоставление услуг, изображенную на рис. 2.

Базисом архитектуры ЦП является система PLM Teamcenter концерна Siemens PLM Software [14], предназначенная для управления инженерными данными и производственными процессами на протяжении жизненного цикла изделия. PLM Teamcenter служит основой для создания единой информационной корпоративной системы управления проектом или группой территориально удаленных друг от друга проектов.

Серверная группа ЦП объединяет серверы ситуационной комнаты, САПР-центра и Научно-испытательного центра (НИЦ). Все рабочие места на территории ЦПИ подключены к серверам посредством единой локальной вычислительной сети ЦПИ. Подключение удаленных рабочих мест осуществляется через защищенные каналы связи по технологии Internet.

ПО сервера САПР-центра состоит из виртуального сервера лицензий PLM Teamcenter, где сосредоточены все доступные лицензии для запуска толстых клиентов системы, веб-приложения PLM Teamcenter, позволяющего работать всем пользователям с тонким клиентом, и сервисов интеграции, благодаря которым к системе можно подключить сторонние приложения.

Клиентские компоненты PLM Teamcenter представляют собой приложения для работы с проектами в формате толстого и тонкого клиентов. *Толстый клиент* обладает полным функционалом приложения Teamcenter, обеспечивая выполнение всего спектра работ, в том числе 3D-проектирование. Толстый клиент установлен на рабочие места и требует загрузки специальных лицензий из сервера САПР-центра.

*Тонкий клиент* позволяет осуществлять организационную деятельность, связанную с проектом, планировать в нем работу, просматривать содержание проекта и 3D-сборки с возможностью отображения параметров (размеров, свойств материалов), но не позволяет кардинальным образом изменять значения параметров.

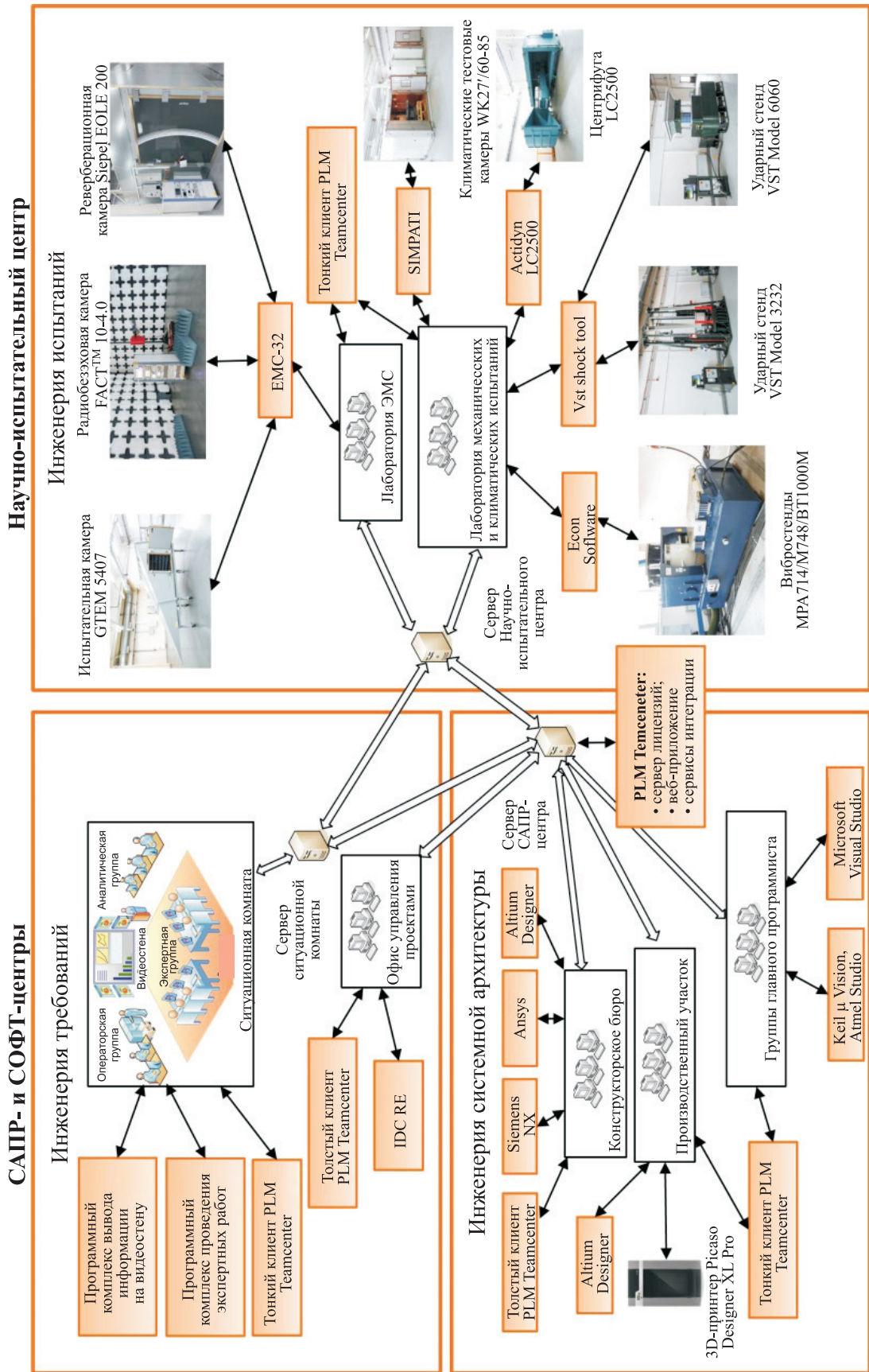


Рис. 2. Клиент-серверная архитектура ЦП

Достоинствами тонкого клиента являются отсутствие необходимости в больших ресурсах персонального компьютера и способность выполнять работу с использованием веб-браузера. Основанный на веб-технологиях тонкий клиент (веб-клиент) не требует установки лицензионного ПО в полном объеме на рабочих местах пользователей. Тонкий клиент PLM Teamcenter доступен со всех компьютеров, подключенных к локальной сети (LAN) ЦПИ.

Рассмотрим детали базовой структуры прикладной ЦП (см. рис. 2) с учетом ее организационно-функциональной структуры (см. рис. 1) и возможностей PLM Teamcenter.

**Инженерия требований.** Инженерия требований реализуется на рабочих местах системотехников, развернутых на оборудовании офиса управления проектами и ситуационной комнаты (рис. 3). Система PLM Teamcenter содержит модуль Requirements Engineering, обеспечивающий поддержку большинства аспектов бизнес-процессов управления требованиями. Однако она не полностью отражает выделенные ранее особенности работы с требованиями при проектировании технических (продуктовых) инноваций внутри платформенной бизнес-модели.

Это связано с применением для расчетов исключительно дискретных моделей по созданию спецификации требований, их трассировке, управлению изменениями и выполнением. Такие модели затрудняют многовариантную оптимизацию требований на этапе подготовки обоснования и создания базовых планов проекта, а также своевременное управление их изменениями и выполнением в условиях реальной динамики жизненного цикла проекта.

Указанные задачи решены в приложении IDC RE на основе применения непрерывной (дифференциальной) модели инжиниринга прототипа инновационного продукта. Приложение включает в себя сервисы оптимального подбора исполнителей проектных работ по ЧТЗ, моделирования движения денежных средств, выявления и анализа точек бифуркаций процесса проектирования инноваций.

*Сервис оптимального подбора исполнителей проектных работ* обеспечивает выбор исполнителей ЧТЗ на основе заданных критериев и ограничений. Результатом работы сервиса является таблица, которая показывает соответствие между исполнителями и ЧТЗ.

*Сервис моделирования движения денежных средств* формирует оптимальный график финансирования портфеля проектов в соответствии с текущими финансовыми возможностями ЦПИ, учитывающий процессы финансирования ЧТЗ, и предоставляет оптимальные дорожные карты для выполнения каждого ЧТЗ.

*Сервис выявления и анализа точек бифуркаций процесса проектирования инноваций* позволяет контролировать критические состояния проекта относительно флуктуаций его параметров.

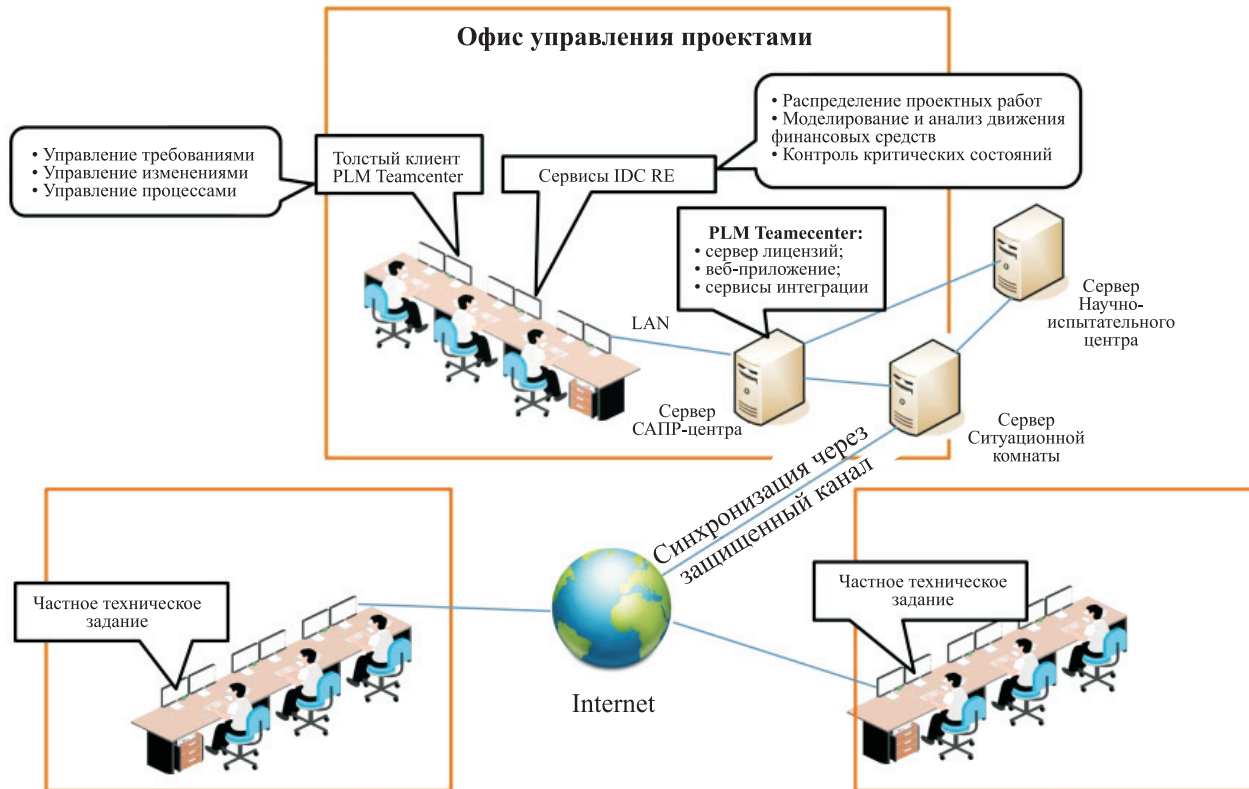
**Инженерия системной архитектуры.** Структура комплекса средств инженерии системной архитектуры показана на рис. 4. На рабочих станциях конструкторских бюро КБ1, КБ2, КБ3 помимо PLM Teamcenter установлены CAD/CAM/CAE-система NX концерна Siemens PLM Software, система Altium Designer компании Altium и системы инженерного анализа фирмы ANSYS.

Набор приложений, входящих в состав пакета Siemens NX, позволяет решать задачи разработки полного электронного макета всего изделия и его составных частей для последующего использования в процессах технологической подготовки производства.

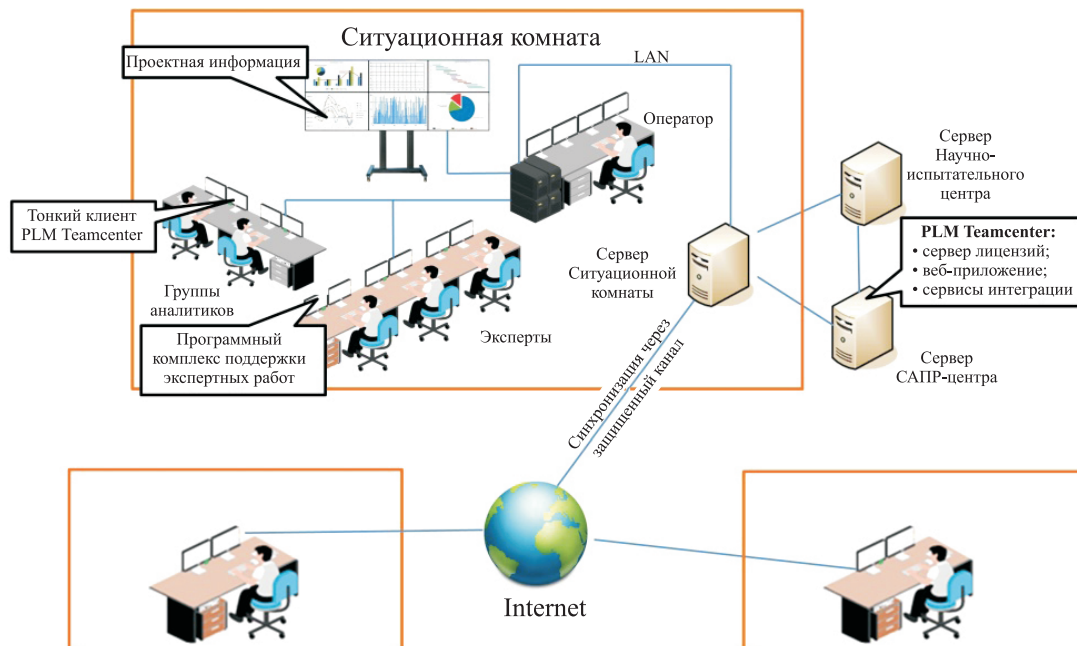
Altium Designer — это система для проектирования электронных средств на уровне схемы или программного кода с последующей передачей информации проектировщику программируемых интегральных логических схем или печатных плат. Разработка печатной платы возможна в трехмерном виде с передачей информации в Siemens NX.

Пакет программ для инженерного анализа включает в себя лицензии фирмы ANSYS: Mechanical Enterprise, nCode DesignLife, Icepak, SIwave, HFSS, Space-Claim, ALinks for EDA. Этот пакет позволяет проводить 3D-геометрическое моделирование устройств, прочностные расчеты, оценку усталостной долговечности, анализ теплового режима, многослойных конструкций, электромагнитной совместимости и моделирование электромагнитных полей в ближней и дальней зонах.

Особенностью прикладной цифровой платформы ЦПИ является включение в состав ее архитектуры оборудования и ПО автоматизированного производственного участка по изготовлению прототипов, а также «умного» испытательного и измерительного оборудования.



а



б

Рис. 3. Диаграммы развертывания программного обеспечения инженерии требований на оборудовании офиса управления проектами (а) и ситуационной комнаты (б)

Эта особенность ставит задачи разработки интерфейсов для интеграции индустриального ПО в среду PLM Teamcenter.

Производственный участок оснащен 3D-принтером, фрезерным станком с ЧПУ, про-

граммными средствами визуализации 3D-моделей, чертежей и печатных плат.

**Инженерия испытаний.** ПО инженерии испытаний развернуто на элементах научно-испыта-

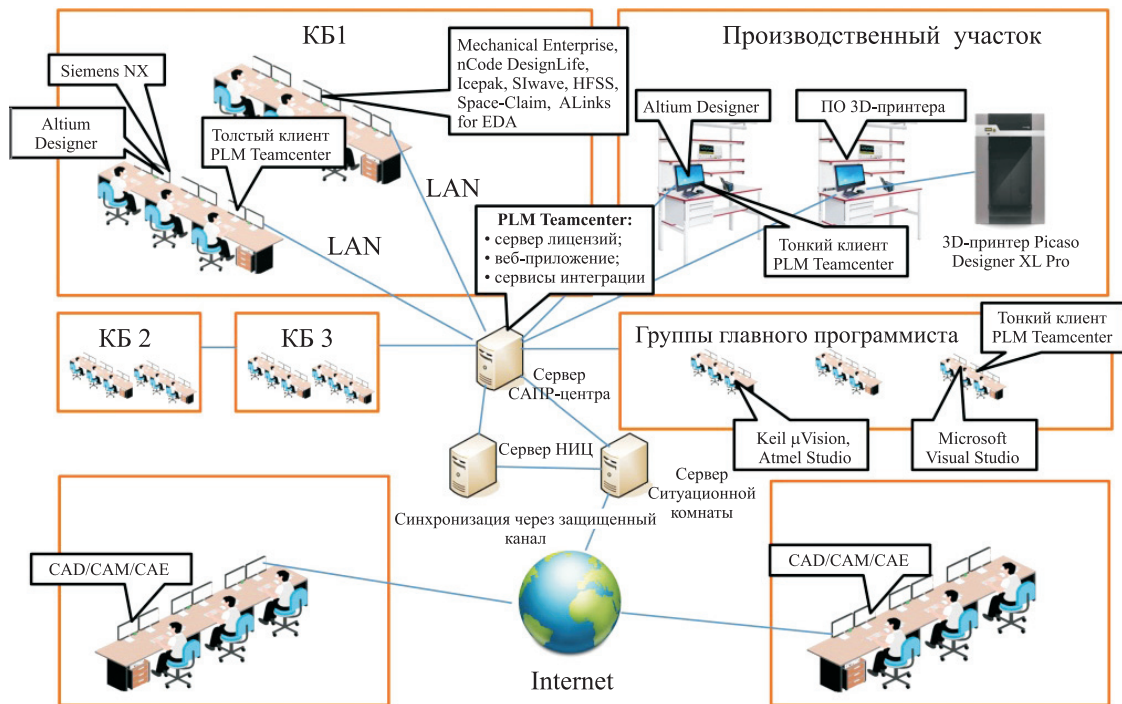


Рис. 4. Диаграмма развертывания комплекса средств инженерии системной архитектуры

тельного центра (рис. 5). Программный комплекс для исследования электромагнитной совместимости (ЭМС) EMC32 имеет лицензию производителя Rohde & Schwarz. В него дополнительно интегрированы интерфейсные модули для управления антенной мачтой и поворотным столом внутри радиобезэховой камеры FАCT™10-4.0, испытаниями в ТЕМ-камере GTEM 5407 и реверберационной камере Siepel Eole 200.

Программа SIMPATI, лицензированная фирмой WEISS, обеспечивает контроль за работой климатических тестовых камер WK27'60-85, WK3-1200/70/5/V и измерительных приборов, объединенных в локальную сеть, а также автоматизацию процессов тестирования на воздействие температуры, влажности и генерацию отчетов по испытаниям.

Программа Actidyn LC2500, имеющая лицензию компании Actidyn System, предназначена для управления лабораторной центрифугой LC2500-ARM. Она предоставляет интерфейс для проведения испытаний на воздействие линейного ускорения и формирует протокол испытаний.

Аналогичные задачи решают промышленные ПО Vst shock tool и Econ Software, предназначенные соответственно для управления ударными машинами VST Model 3232, VST

Model 6060 компании VST и вибростендами MPA714/M748A/BT1000 фирмы ETS Solutions.

#### Интеграция пользовательских приложений.

Рассмотрим способы интеграции пользовательских приложений с PLM Teamcenter (рис. 6).

Для адаптации PLM Teamcenter к конкретному производству разработчики концерна Siemens PLM Software снабжают пользователей возможностями настройки программы PLM под требования заказчика. В терминах Siemens это называется кастомизацией. Она возможна как с использованием стандартных элементов PLM, заложенных производителем, так и путем написания средствами интерфейса PLM Teamcenter дополнительных программ — приложений. Этим способом в систему интегрировано приложение IDC RE.

Сервис-ориентированная архитектура (Service-Oriented Architecture — SOA) — модульный подход к разработке ПО, основанный на использовании распределенных слабосвязанных заменяемых компонентов, оснащенных стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам PLM Teamcenter.

Программные комплексы, созданные в соответствии с SOA, обычно реализуются как набор веб-служб. Этим способом интерфейсы PLM



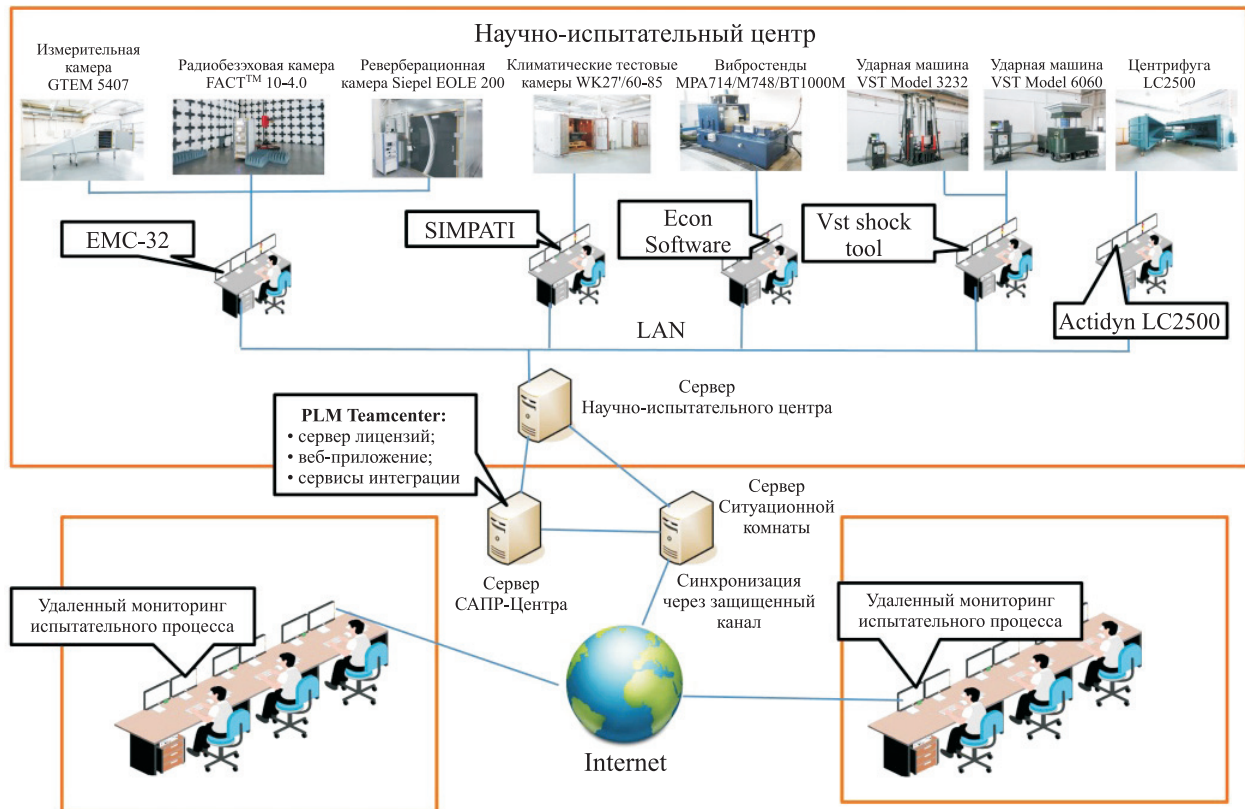


Рис. 5. Диаграмма развертывания комплекса средств инженерии испытаний

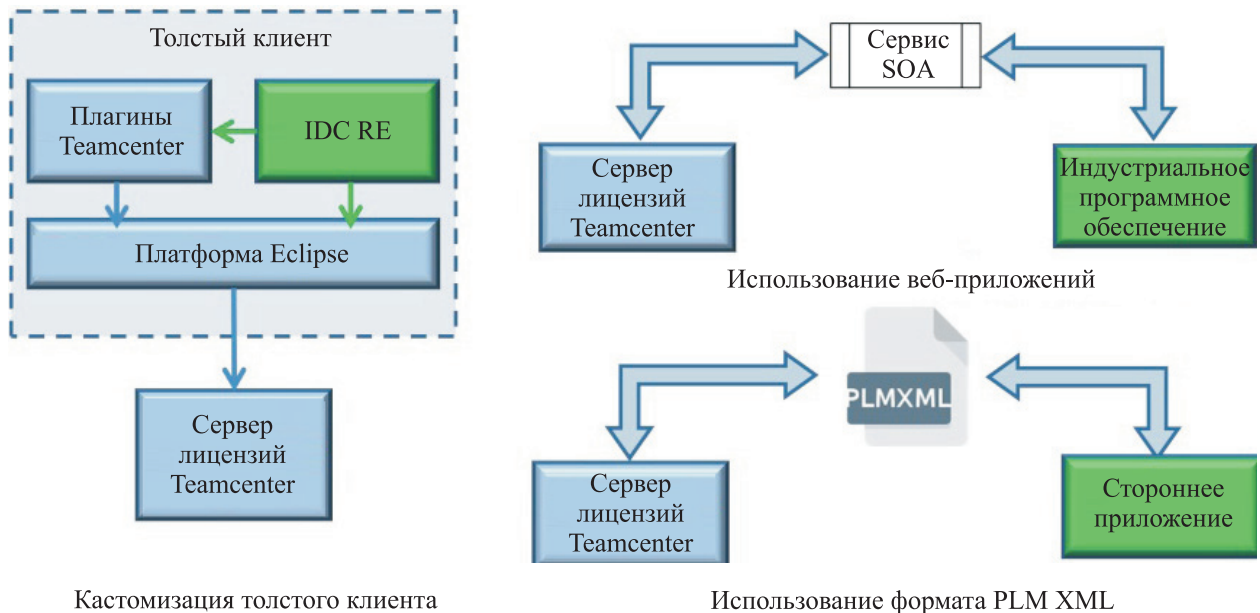


Рис. 6. Способы интеграции пользовательских приложений с PLM Teamcenter

Teamcenter интегрируются с ПО испытательного оборудования.

В основу технологии PLM XML положена возможность деления документа на составные элементы, объединяемые в иерархические структуры. Большинство современных

PDM/PLM-систем имеют встроенные средства интеграции для обеспечения обмена информацией о структуре изделия в формате XML.

**Способы организации общего информационного пространства.** Рассмотрим способы под-

ключения удаленных организаций к платформе ЦПИ.

*Технология построения виртуальной частной сети (Virtual Private Network — VPN)* является одним из способов организации общего информационного пространства. Эта технология позволяет создавать защищенный канал связи между удаленными серверами и компьютерами, объединив их в одну локальную сеть.

Актуализацию данных удаленных проектов и автоматическую синхронизацию изменений выполняют программные средства PLM Teamcenter, установленные на платформе ЦПИ. Удаленные организации, осуществляющие совместную деятельность и подключенные к системе распределенного проектирования, могут получать доступ к необходимой информации в режиме реального времени и загружать проектные данные в процессе выполнения работ на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Достоинствами технологии VPN являются отсутствие необходимости в закупке PLM Teamcenter для удаленных организаций и возможность работы последних в одной локальной сети. К недостаткам технологии VPN относится ручная выгрузка-загрузка проектной информации, отсутствие автоматизации процессов согласования и утверждения конструкторской документации и интеграции приложений в единую среду.

*Технология Teamcenter MultiSite Collaboration* является еще одним способом организации общего информационного пространства. Эта технология, созданная концерном Siemens PLM Software, позволяет объединять территориально разнесенные организации в единую информационную среду. В основе технологии лежит объединение сайтов PLM Teamcenter, разработанных в удаленных организациях, в одну информационную сеть. С помощью такой технологии можно объединить любое количество сайтов в любых комбинациях, используя различные иерархические схемы.

Главные достоинства технологии Teamcenter MultiSite Collaboration заключаются в возможности обеспечить 100%-ную идентичность состава изделия (постоянно меняющегося в процессе проектирования) и провести изменения в базах данных удаленных организаций. Однако применить такую технологию можно только при наличии у всех удаленных организаций лицензии Teamcenter MultiSite.

*Для проверки принятых решений и исследования процессов платформенной реализации инновационных проектов* разработан системный тест, использующий технологию VPN для подключения ресурсов ЦПИ к решению проектных задач удаленного заказчика и использования отсутствующих на платформе ЦПИ удаленных ресурсов независимых участников отрасли.

Работа выполнена в рамках действующих оглашений о сотрудничестве с МГТУ им. Н.Э. Баумана, ПАО «Электровыпрямитель» и АУ «Технопарк-Мордовия». В процессе тестирования осуществлена передача на платформу ЦПИ фрагмента проекта, выполненного на ПАО «Электровыпрямитель» средствами системы ЛОЦМАН:PLM — Аскон, для доработки средствами системы PLM Teamcenter. Также обеспечен доступ платформы ЦПИ к гибкой производственной системе на кафедре РК9 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## Выводы

1. По сравнению с другими подходами к цифровизации проектирования и производства платформенная бизнес-модель проектирования инноваций обеспечивает необходимое многообразие компетенций, делает упор на оптимальный подбор производственных партнеров и гибкое управление требованиями, реализует удаленный доступ к современному оборудованию и ПО, сокращает сроки разработки прототипа, вносит качественные изменения в систему разделения труда.

2. Специализированная цифровая платформа ЦПИ на основе модели трехэтапного инжиниринга прототипов и концепции цифрового двойника ускоряет разработку и вывод на рынок новых продуктов машиностроения, фокусируя деятельность на управлении распределенной базой партнеров, оперативном использовании информации и разработок, поступающих из сообщества поставщиков и партнеров, и на передаче им части своих производственных компетенций.

3. Основная проблема, сдерживающая масштабирование полученных результатов, заключается в отсутствии отечественных стандартов интеграции ЦП, регламентирующих требования к системному и индустриальному ПО процессов инженерии разработки и производства инновационных продуктов.

## Литература

- [1] Величкевич С., Демченко Ю. *Использование Грид-технологий для построения распределенных САПР*. URL: <http://www.uazone.org/demch/papers/relarn2005-cad-grid.pdf> (дата обращения 15 ноября 2020).
- [2] Кондрашев В.А. Архитектура системы предоставления сервисов цифровой платформы для научных исследований. *Системы и средства информатики*, 2018, т. 28, № 3, с. 131–140, doi: <https://doi.org/10.14357/08696527180310>
- [3] Muegge S. Platforms, communities and business ecosystems: Lessons learned about technology entrepreneurship in an interconnected world. *Technology Innovation Management Review*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 5–15.
- [4] Gawer A., Cusumano M. Industry platforms and ecosystem innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 2014, vol. 31, no. 3, pp. 417–33, doi: 10.1111/jpim.12105
- [5] Боровков А.И., Марусева В.М., Рябов Ю.А. «Умные» цифровые двойники — основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. *Трамплин к успеху*, 2018, № 13, с. 12–16. URL: [http://www.npo-saturn.ru/upload/docs/2018/1523432983\\_1\\_Korporativnyy\\_jurnal\\_Tramplin\\_k\\_uspehu\\_N13,\\_2018.pdf](http://www.npo-saturn.ru/upload/docs/2018/1523432983_1_Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_N13,_2018.pdf) (дата обращения 15 сентября 2020).
- [6] Демичев А.П., Ильин В.А., Крюков А.П. *Введение в грид-технологии*. Препринт НИИЯФ МГУ, 2007, 11/832.
- [7] *Цифровые платформы. Подходы к определению и типизации*. Ростелеком. URL: <https://docplayer.ru/79373776-Cifrovye-platformy-podhody-k-opredeleniyu-i-tipizacii.html> (дата обращения 15 ноября 2020).
- [8] Маркова В.Д. Бизнес-модели компаний на базе платформ. *Вопросы экономики*, 2018, № 10, с. 127–135, doi: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-10-127-135>
- [9] ГОСТ 2.103–2013. *Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки (с Поправками)*. Москва, Стандартинформ, 2019.
- [10] ГОСТ Р 58301–2018. *Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования*. Москва, Стандартинформ, 2019.
- [11] *Инженерия требований к продуктам и системам с использованием PTC*. URL: [https://pro-technologies.ru/components/com\\_jshopping/files/demo\\_products/ingeneery\\_for\\_product\\_and\\_system\\_inegrity.pdf](https://pro-technologies.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/ingeneery_for_product_and_system_inegrity.pdf) (дата обращения 15 ноября 2020).
- [12] Génova G., Fuentes J., Llorens J., Hurtado O., Moreno V. A framework to measure and improve the quality of textual requirements. *Requirements Engineering*, 2013, no. 18, pp. 25–41, doi: <https://doi.org/10.1007/s00766-011-0134-z>
- [13] Мадорская Ю.М. Данные vs документы при разработке и управлении требованиями. *Практика проектирования систем*, 2016. URL: <http://reqcenter.pro/data-centric-design/> (дата обращения 12 ноября 2020).
- [14] *Обзор системы Teamcenter*. URL: <https://docplayer.ru/36464681-Obzor-sistemy-teamcenter.html> (дата обращения 15 ноября 2020).

## References

- [1] Velichkevich S., Demchenko Yu. *Using Grid technologies to build distributed CAD systems*. Available at: <http://www.uazone.org/demch/papers/relarn2005-cad-grid.pdf> (accessed 15 November 2020).
- [2] Kondrashev V.A. Architecture of the service delivery system for the research services digital platform. *Sistemy i Sredstva Inform.*, 2018, vol. 28, iss. 3, pp. 131–140 (in Russ.), doi: <https://doi.org/10.14357/08696527180310>
- [3] Muegge S. Platforms, communities and business ecosystems: Lessons learned about technology entrepreneurship in an interconnected world. *Technology Innovation Management Review*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 5–15.
- [4] Gawer A., Cusumano M. Industry platforms and ecosystem innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 2014, vol. 31, no. 3, pp. 417–33, doi: 10.1111/jpim.12105

- [5] Borovkov A.I., Maruseva V.M., Ryabov Yu.A. “Smart” digital twins are the basis of a new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of a new generation. *Tramplin k uspekh*, 2018, no. 13, pp. 12–16 (in Russ.). Available at: [http://www.npo-saturn.ru/upload/docs/2018/1523432983\\_1\\_Korporativnyy\\_jurnal\\_Tramplin\\_k\\_uspehu\\_N13\\_2018.pdf](http://www.npo-saturn.ru/upload/docs/2018/1523432983_1_Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_N13_2018.pdf) (accessed 15 September 2020).
- [6] Demichev A.P., Il'in V.A., Kryukov A.P. *Vvedeniye v grid-tekhnologii* [Introduction to Grid Technology]. Pre-print NIIYaF MGU, 2007, 11/832.
- [7] *Tsifrovyye platformy. Podkhody k opredeleniyu i tipizatsii. Rostelekom* [Digital platforms. The approaches to identification and typing. Rostelecom]. Available at: <https://docplayer.ru/79373776-Cifrovye-platformy-podhody-k-opredeleniyu-i-tipizatsii.html> (accessed 15 November 2020).
- [8] Markova V.D. Platform business models. *Voprosy Ekonomiki*, 2018, no. 10, pp. 127–135 (in Russ.), doi: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-10-127-135>
- [9] *GOST 2.103–2013. Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (ESKD). Stadii razrabotki (s Popravkami)* [State Standard 2.103–2013. Unified system for design documentation Stages of designing]. Moscow, Standartinform publ., 2019.
- [10] *GOST R 58301–2018. Upravleniye dannymi ob izdelii. Elektronnyy maket izdeliya. Obshchiye trebovaniya* [State Standard 58301–2018. Product data management. Digital mock-up. General requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2019.
- [11] *Inzheneriya trebovaniy k produktam i sistemam s ispol'zovaniyem PTC* [Integrity Engineering requirements for products and systems with PTC Integrity]. Available at: [https://protechnologies.ru/components/com\\_jshopping/files/demo\\_products/ingeneery\\_for\\_product\\_and\\_system\\_inegrity.pdf](https://protechnologies.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/ingeneery_for_product_and_system_inegrity.pdf) (accessed 15 November 2020).
- [12] Génova G., Fuentes J., Llorens J., Hurtado O., Moreno V. A framework to measure and improve the quality of textual requirements. *Requirements Engineering*, 2013, no. 18, pp. 25–41, doi: <https://doi.org/10.1007/s00766-011-0134-z>
- [13] Madorskaya Yu.M. Data vs documents in requirements development and management. *Praktika proyektirovaniya sistem*, 2016 (in Russ.). Available at: <http://reqcenter.pro/data-centric-design/> (accessed 12 November 2020).
- [14] *Obzor sistemy Teamcenter* [Teamcenter system overview]. Available at: <https://docplayer.ru/36464681-Obzor-sistemy-teamcenter.html> (accessed 15 November 2020).

Статья поступила в редакцию 15.12.2020

## Информация об авторах

**БЕЛОВ Владимир Федорович** — доктор технических наук, профессор, директор Центра проектирования инноваций АУ «Технопарк-Мордовия»; профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования». МГУ им. Н.П. Огарева (430005, Саранск, Российская Федерация, ул. Большевикская, д. 68, e-mail: belovvf@mail.ru).

**ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gss@rk9.bmstu.ru).

**ЗАНКИН Александр Иванович** — аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования». МГУ им. Н.П. Огарева (430005, Саранск, Российская Федерация, ул. Большевикская, д. 68, e-mail: zankin\_ai@mail.ru).

## Information about the authors

**BELOV Vladimir Fedorovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Director, Design Centre for Innovations — Technopark-Mordovia; Professor, Head of the Department of Computer Aided Design Systems. Ogarev Mordovia State University (430005, Saransk, Russian Federation, Bolshevistskaya St., Bldg. 68, e-mail: belovvf@mail.ru).

**GAVRYUSHIN Sergey Sergeevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Computer Systems of Manufacturing Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@rk9.bmstu.ru).

**ZANKIN Aleksandr Ivanovich** — Postgraduate, Department of Computer Aided Design Systems. Ogarev Mordovia State University (430005, Saransk, Russian Federation, Bolshevistskaya St., Bldg. 68, e-mail: zankin\_ai@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Белов В.Ф., Гаврюшин С.С., Занкин А.И. Архитектура цифровой платформы исследования и проектирования инноваций в машино- и приборостроении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 3, с. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-3-15

### Please cite this article in English as:

Belov V.F., Gavryushin S.S., Zankin A.I. Architecture of a Digital Platform for Research and Design of Innovations in Mechanical and Instrument Engineering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 3, pp. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-3-15