

**В. А. Комаров**, канд. техн. наук, доц., e-mail: VKomarov@iss-reshetnev.ru,  
АО "Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева",

**А. В. Сарафанов**, д-р техн. наук, проф., e-mail: Sarafanov@i-teco.ru,  
ООО "Витте Консалтинг" (ГК "АЙ-ТЕКО"),

**С. Р. Тумковский**, д-р техн. наук, проф., e-mail: STumkovskiy@hse.ru,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва

## **Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения**

*Рассматриваются направления и результаты применения многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем как средств автоматизации экспериментальных исследований в ряде прикладных областей. Проведена оценка эффективности трансформации бизнес-процессов на основе их формализованных моделей и комплекса качественных показателей.*

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, сквозные цифровые технологии, бизнес-процесс, экспериментальные исследования, испытания, эффективность, лабораторное оборудование, распределенные измерительно-управляющие системы, мультиарендность, e-learning, laboratory as a service

### **Введение**

Развитие цифровой экономики в России связано, в том числе, с решением проблемы модернизации материально-технической и технологической баз отраслей промышленности и отраслевой системы подготовки кадров. Такая модернизация осуществляется на основе внедрения сквозных цифровых технологий [1—9]. Одной из таких технологий в рамках Интернета вещей является технология эксплуатации испытательного, научно-исследовательского и лабораторного оборудования на основе концепции мультиарендности [10, 11]. Данная технология реализуется на базе компьютерных измерительных технологий и активно развивающейся сетевой инфраструктуры — многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС) и их прикладного применения [12—18]. Исследованием, разработкой и внедрением таких систем, а также отдельных их компонентов в указанном выше разрезе авторы статьи занимаются более 10 лет. Опыт внедрения МРИУС применительно к задачам автоматизации экспериментальных исследований в ряде отраслей народного хозяйства (промышленности, науке, образовании) показывает, что полученный в МРИУС синергетический эффект при интеграции современных технологий способствует глубокой трансформации операционных процессов (бизнес-процессов, БП), реализуемых с их применением.

В статье рассматривается опыт такой трансформации в разрезе процессно-ориентированного подхода при решении следующих прикладных задач в области радиоэлектронного приборостроения:

- испытания бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов;
- формирование эксплуатационной загрузки бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата (КА);
- подготовка и переподготовка кадров радио-технического и приборостроительного профилей.

### **Модернизация процедуры наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры**

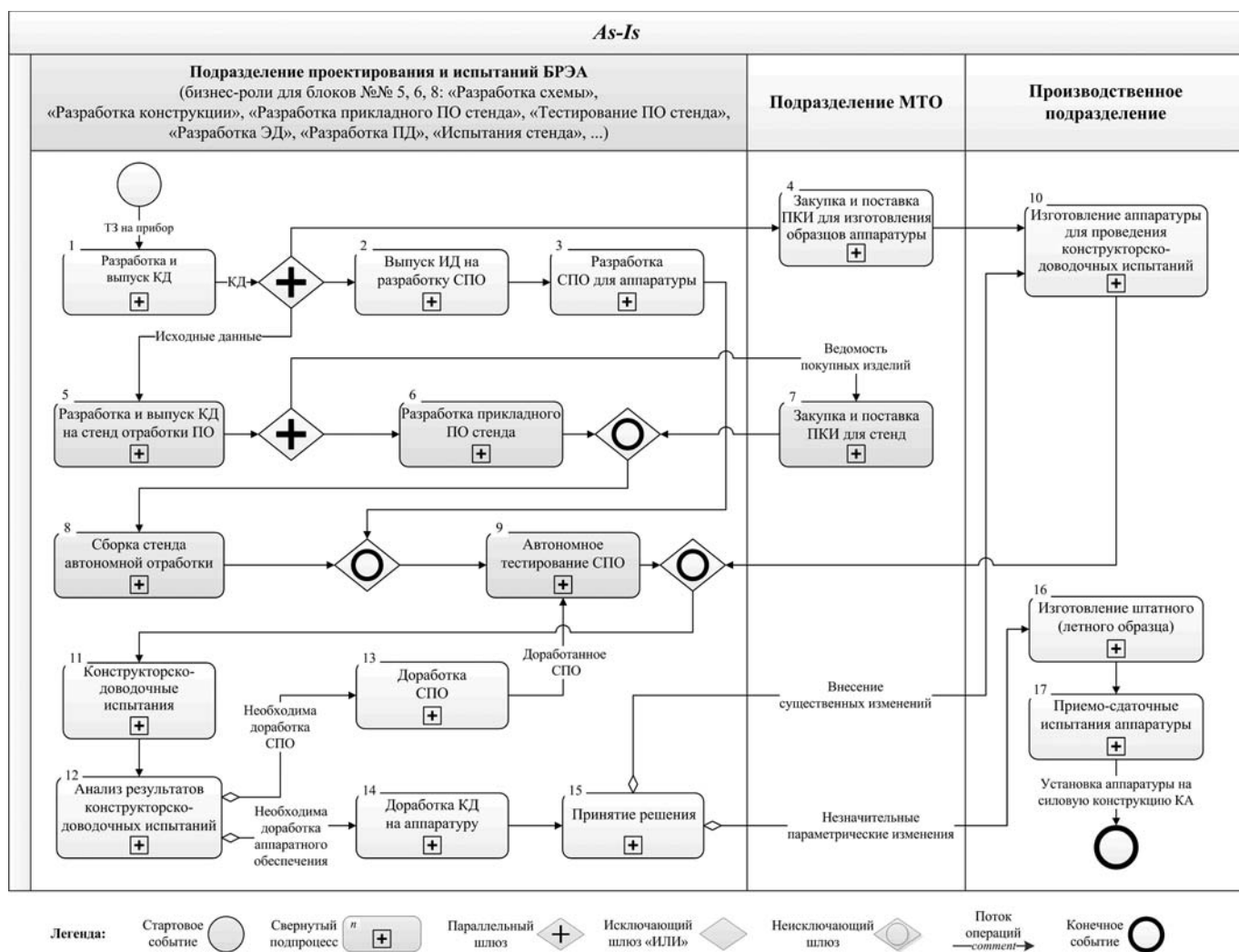
Повышение функциональной сложности и плотности создаваемой радиоэлектронной аппаратуры для бортовых комплексов управления КА, широкое использование в ней встроенных вычислительных модулей обусловило резкое увеличение объема ее наземной экспериментальной отработки вследствие появления дополнительной составляющей — специализированного программного обеспечения (СПО). Как правило, проектируемая аппаратура создается на основе магистрально-модульного исполнения [19] и включает в свой состав вычислительный модуль (ВМ), его СПО и комплекс интерфейсных

модулей сопряжения (ИМС), предназначенных для обеспечения взаимодействия ВМ с соответствующими узлами, агрегатами и системами КА [14, 15, 20]. Проведение автономной отработки СПО выполняется на технологическом образце ВМ, функционально идентичном его "летному" варианту исполнения, и требует создания специализированного стенда для формирования на его интерфейсах совокупности сигналов, которые обеспечивают эмуляцию внешних условий работы ВМ в составе прибора и КА на основе специализированных технических средств (устройств цифрового и аналогового ввода/вывода, контроллеров интерфейсов и пр.) [20].

На рис. 1 приведена укрупненная модель сквозного БП создания вновь проектируемой бортовой радиоэлектронной аппаратуры в виде диаграммы BPMN (*Business Process Model and Notation*).

Представленная модель БП (*As-Is*) имеет следующие существенные недостатки [20]:

- ограниченная информативность процесса автономной отработки СПО в связи с невозможностью обеспечить полную эмуляцию внешних условий при разумных временных и материальных затратах на стенд автономной отработки (блоки 6—8), что обуславливает необходимость дополнительной модификации СПО посредством внесения точек остановки и, как следствие, наличие функциональных ограничений на отработку некоторых веток алгоритма (переключение на основной/резервный комплект ИМС, работа при частичной/полной неисправности ИМС и др.);
- недостаточный уровень унификации применяемых технических средств эмуляции при создании уникального образца стенда автономной отработки СПО под конкретный экземпляр аппаратуры, обуславливающий повышенные материальные затраты (блок 5).



**Рис. 1. Укрупненная модель сквозного БП создания аппаратуры бортового комплекса управления КА:**

ПКИ — покупные комплектующие изделия; КД — конструкторская документация; ЭД — эксплуатационная документация; ПД — программная документация; МТО — материально-техническое обеспечение

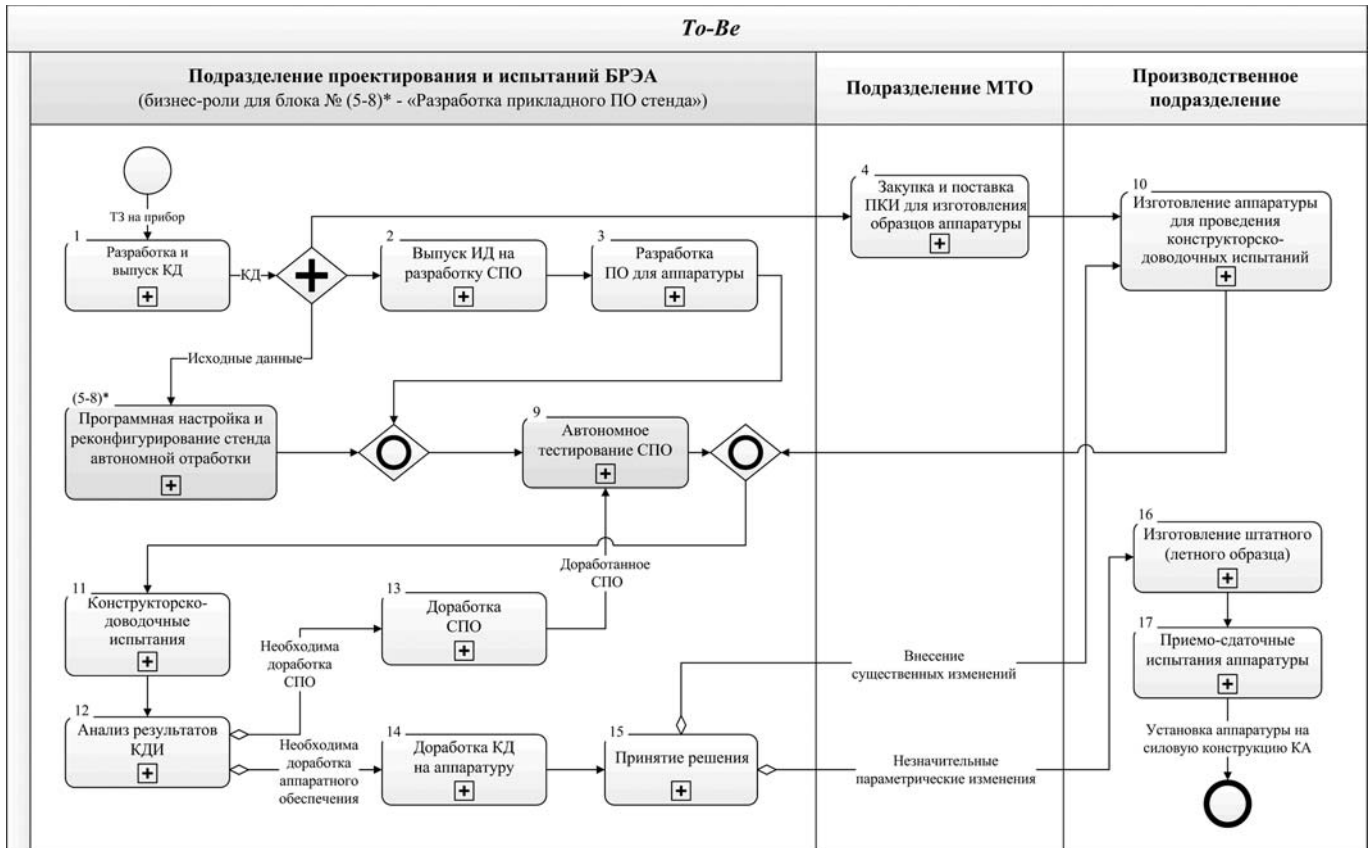


Рис. 2. Модель трансформированного сквозного БП создания аппаратуры бортового комплекса управления КА

Данные факторы в целом характеризуют недостаточное качество процесса автономной отработки СПО (блок 9) и ведут к увеличению числа обратных проектных связей, связанных с его итерационной доработкой (блоки 12, 13).

Для решения задачи обеспечения автономной отработки СПО ВМ был разработан и создан промышленный образец МРИУС, эмулирующий функции обработки команд управления и измерительной информации нескольких ИМС на основе одной платы реконфигурируемого цифрового ввода/вывода, управляемой посредством специализированной ЭВМ, а также набор базовых функциональных моделей основных типов ИМС на ПЛИС [14, 15]. С использованием созданного образца эмуляция компонентов внешнего окружения ВМ в виде его ИМС осуществляется посредством компоновки на ПЛИС платы реконфигурируемого цифрового ввода/вывода базовых функциональных моделей ИМС, их параметрического конфигурирования (настройка адресов, алгоритмов преобразования команд управления и пр.) и модификации соответствующего прикладного программного модуля управления ими. Это, в свою очередь, повлекло "трансформацию" сквозного БП соз-

дания бортовой радиоэлектронной аппаратуры для более чем десяти КА различного функционального назначения (связи и телевидения, ретрансляции, навигации и др.) (рис. 2).

Сравнительный анализ исходного и трансформированного БП создания аппаратуры представлен в виде лепестковой диаграммы на рис. 3. Данное техническое решение обеспечи-



Рис. 3. Сравнительная диаграмма параметров процессов создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры бортового комплекса управления КА:

1 — исходный БП; 2 — модифицированный БП

ло расширение в 2...3 раза перечня обрабатываемых режимов работы аппаратуры, а также снижение в несколько раз затрат на создание стенда для обработки СПО ВМ за счет [14, 15]:

- сокращения в 3 и более раз номенклатуры и объема применяемых технических средств;
- сокращения на 10...15 % объема КД, разрабатываемой и выпускаемой подразделением;
- реализованной возможности гибких оперативных программных настройки и реконфигурирования стенда на основе МРИУС;
- уменьшения в несколько раз числа задействованных при создании и эксплуатации стенда бизнес-ролей. Вместо ролей "Разработка схемы", "Разработка конструкции", "Тестирование ПО стенда", "Разработка ЭД", "Разработка ПД", "Испытания стенда", "Разработка прикладного ПО стенда" (см. рис. 1) задействуется только последняя, которая модифицируется с точки зрения выполняемых бизнес-функций.

В трансформированном процессе (*To-Be*) автономного тестирования СПО ВМ для каждого образца аппаратуры формируются параметры конфигурации стенда автономной обработки, включающие проект и файл прошивки ПЛИС, а также наборы значений соответствующих настроек, которые совместно с финальной версией СПО ВМ и результатами проведенных проверок в дальнейшем хранятся в течение всего жизненного цикла аппаратуры. Таким образом, в процессе эксплуатации КА в случае необходимости обеспечивается возможность создания "цифрового двойника" функционального поведения конкретного образца аппаратуры посредством оперативного реконфигурирования разработанного и созданного эмулятора ИМС и стенда в целом на его основе. Применение такого "цифрового двойника" также существенно упростило в организационном плане сопровождение процесса эксплуатации созданной аппаратуры и снизило в несколько раз материальные затраты на обеспечение процедуры моделирования возникающих неисправностей, а также упростило процедуру обработки программных "заплаток" для парирования неисправностей в течение всего срока активного существования КА на орбите (10...15 лет).

## Формирование эксплуатационной загрузки бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата

Одной из составляющих этапа жизненного цикла КА связи и ретрансляции геостационарной орбиты является формирование эксплуатационной загрузки его бортового ретрансляционного комплекса (БРК) посредством проведения квалификационных испытаний земных станций (ЗС) операторов услуг на предмет их допуска к работе через БРК [16, 17]. Фрагмент укрупненной модели такого БП в виде *IDEF<sub>0</sub>*-диаграммы (*Integration definition for function modeling*) представлен на рис. 4.

Проведенный анализ исходного (*As-Is*) БП показал высокие временные затраты на формирование эксплуатационной загрузки БРК при традиционном подходе к проведению квалификационных испытаний ЗС, которые в ряде случаев могут достигать 10 % и более от общего срока активного существования КА (рис. 4, блок А12), что, в свою очередь, снижает его коммерческую эффективность [17].

Повышение производительности работ при выполнении процедуры испытаний ЗС и сокращение их общей длительности реализуется посредством организации на основе МРИУС параллельного доступа и возможности работы операторам измерительной станции с ее оборудованием с нескольких (*m*) рабочих мест. Данный подход позволяет проводить испытания нескольких ЗС, работающих с частотным

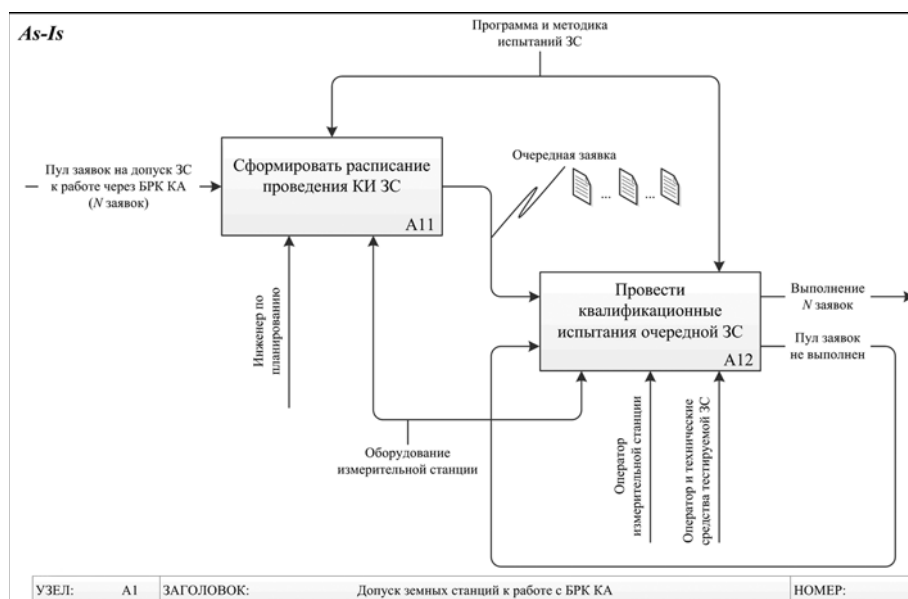


Рис. 4. Фрагмент *IDEF<sub>0</sub>*-диаграммы исходного БП измерения параметров ЗС и их допуска к работе через БРК в Центре управления КА

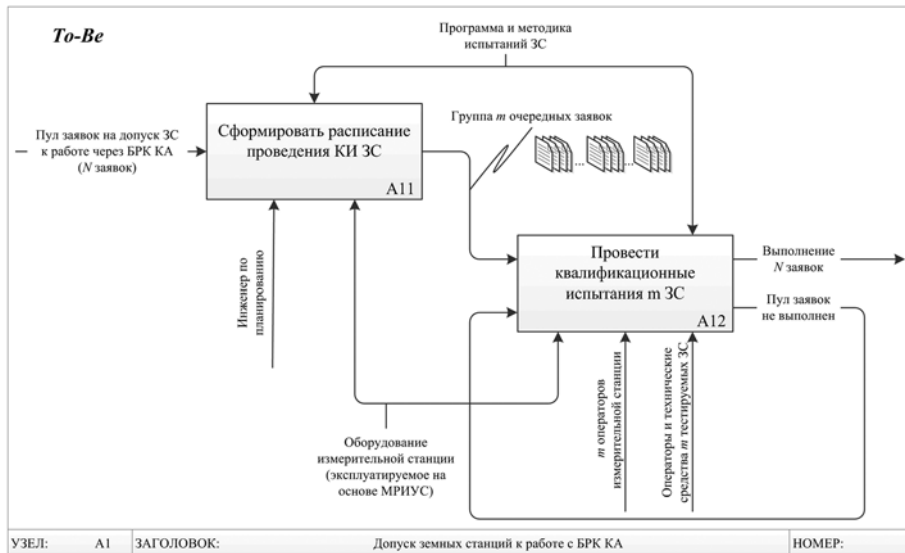


Рис. 5. Фрагмент IDEF<sub>0</sub>-диаграммы трансформированного измерения параметров ЗС и их допуска к работе через БРК в Центре управления КА

разделением через БРК, параллельно, используя один комплект оборудования измерительной цепи [16]. Фрагмент модели трансформированного БП (*To-Be*) приведен на рис. 5.

Обеспечение возможности проведения квалификационных испытаний  $m$  станций параллельно (рис. 5, блок A12) приводит к пропорциональному повышению производительности работ и соответствующему сокращению общей длительности этапа формирования эксплуатационной загрузки КА, которое зависит от числа организованных рабочих мест в МРИУС (5...8 и более), технических характеристик БРК КА и его планируемой эксплуатационной загрузки. Более подробно соответствующие аналитические соотношения и зависимости рассмотрены в работе [17]. Сравнительная обобщенная оценка изменений основных параметров исходного и трансформированного БП приведена



Рис. 6. Сравнительная диаграмма параметров процессов допуска земных станций к работе с БРК КА:

1 — традиционный БП; 2 — модифицированный БП

в виде лепестковой диаграммы на рис. 6. Бизнес-роли штатных единиц, задействованных в реализации БП, не изменились, но при этом увеличилась частота их исполнения (согласно числу развернутых рабочих мест).

Сокращение длительности этапа квалификационных испытаний ЗС в целом позволяет повысить коммерческую эффективность КА за счет увеличения до 10 % и более возможной длительности предоставления услуг аренды операторам косвенных космических услуг и соответственно повысить конкурентоспособность КА в течение ограниченного срока его активного существования [17].

### Автоматизация экспериментальных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

Процесс проведения лабораторных экспериментальных исследований при подготовке и переподготовке современных кадров в области техники и технологий основывается на применении высокотехнологического экспериментального оборудования (исследовательские стенды, лабораторные макеты и установки). Комплектование таким оборудованием специализированных лабораторий и последующая организация на их основе лабораторных исследований является достаточно сложной в организационном плане задачей, требующей соответствующего финансового обеспечения [12, 13]. При этом организация на базе таких лабораторий необходимого числа рабочих мест (10...15), укомплектованных современным оборудованием (экспериментальное оборудование в комплекте с ПЭВМ), обладает рядом существенных недостатков, сдерживающих применение современных методов электронной педагогики. К таким недостаткам следует отнести:

1. Доступ к ресурсам специализированной лаборатории осуществляется только по расписанию из одной локации — непосредственно из самой лаборатории.

2. Низкая пропускная способность экспериментального оборудования (монопольный режим эксплуатации, простои в ночное время, в выходные и праздничные дни).

3. Достаточно высокие затраты на поддержание инфраструктуры такой лаборатории в рабочем состоянии.

Два первых недостатка сдерживают, а в ряде случаев исключают возможность проведения эффективных экспериментальных лабораторных исследований на реальном оборудовании с применением *LMS*-систем (*learning management system*), в которых заложена реализация концепции обучения "В удобное время в любом месте", и приводят к существенным ограничениям мобильности обучающихся.

Третий недостаток связан с необходимостью на системной основе поддерживать в рабочем состоянии экспериментальное оборудование, проводить мероприятия по ремонту помещения, обеспечению его электро- и пожаробезопасности, содержать штат учебно-вспомогательного персонала и т. п.

В укрупненном виде фрагмент модели традиционного процесса проведения лабораторных экспериментальных исследований в виде *IDEF<sub>0</sub>*-диаграммы приведен на рис. 7. Из диа-

граммы видно, что как процесс подготовки (блок A11), так и процесс выполнения лабораторных исследований (блок A12) выполняется из одной локации — специализированной лаборатории. При этом экспериментальное оборудование (все рабочие места) используется в монопольном режиме согласно расписанию. Применение МРИУС (рис. 8) позволяет исключить данные недостатки. Концепция мультиадресности, заложенная в МРИУС, позволяет расширить число локаций доступа к экспериментальному оборудованию. В общем случае каждый обучающийся может получить удаленный доступ к стендам из своей локации (блок A11 и A12 на рис. 8) или из любого доступного на момент проведения лабораторных исследований компьютерного класса. Кроме этого, экспериментальное оборудование переводится из монопольного в многопользовательский режим эксплуатации. Это позволяет на 1...1,5 порядка сократить число единиц оборудования. При этом появившаяся возможность реализации в *LMS*-системах принципа "В удобное время

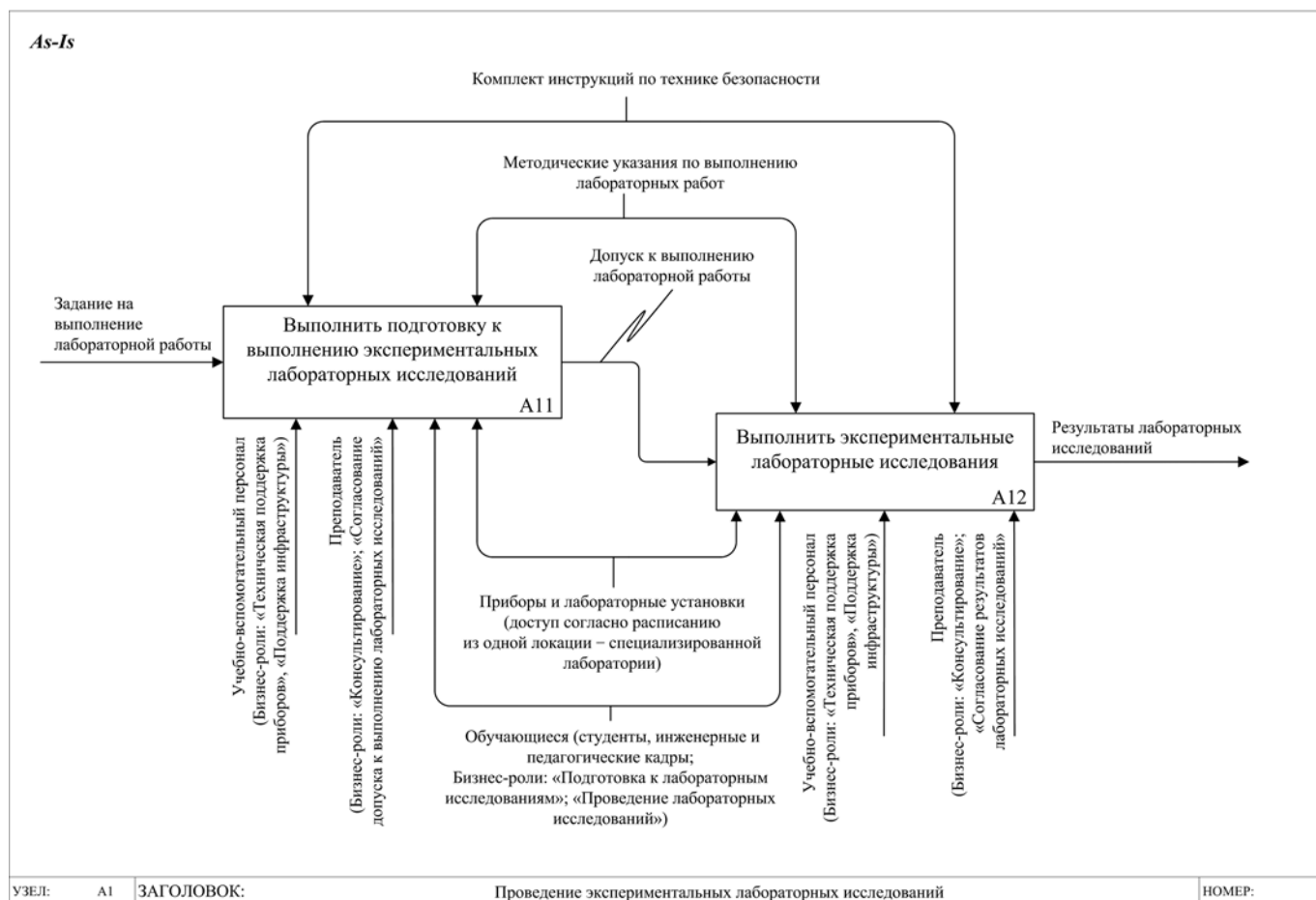


Рис. 7. Фрагмент *IDEF<sub>0</sub>*-диаграммы традиционного БП проведения лабораторных экспериментальных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

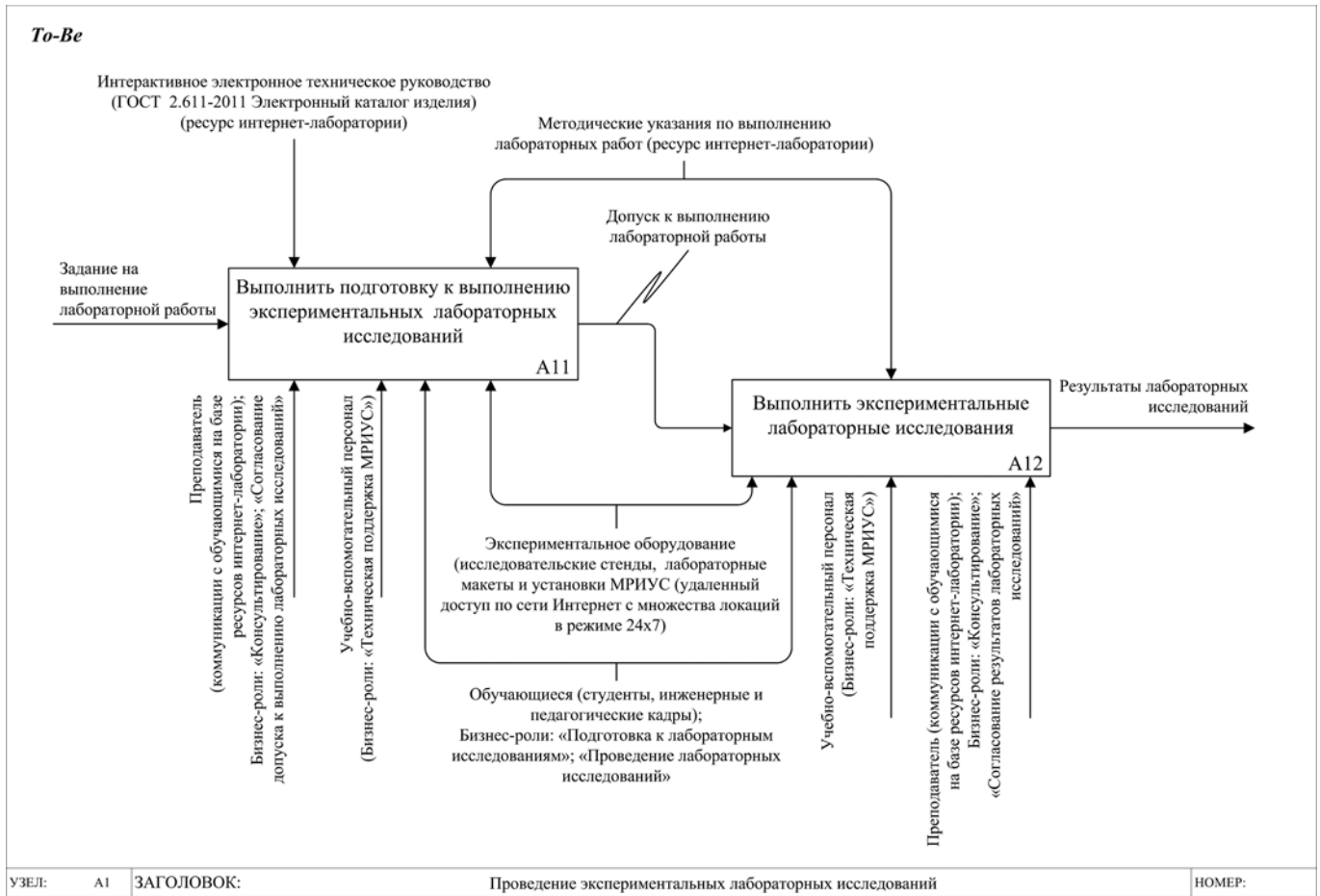


Рис. 8. Фрагмент  $IDEF_0$ -диаграммы трансформированного БП проведения лабораторных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

в любом месте" применительно к экспериментальным лабораторным исследованиям позволяет перейти к формированию и анализу полноценного цифрового следа каждого обучающегося с применением методов электронной педагогики.

На рис. 9 приведена сравнительная лепестковая диаграмма, отражающая основные изменения параметров модифицированного процесса по сравнению с исходным. Рассмотрим дополнительные эффекты, получаемые за счет трансформации исходного ( $As-Is$ ) БП.

Опыт разработки и эксплуатации МРИУС показывает, что по сравнению с традиционной моделью проведения лабораторных исследований, которая позволяет за 2 смены работы в день при 15 рабочих местах обеспечить выполнение лабораторных исследований 100 обучающимся, применение МРИУС позволяет обеспечить выполнение лабораторных исследований до 400 обучающимися [18]. В первом случае задействуется 15 лабораторных установок, и достигается пропускная способность лабора-

тории 100 обучающихся в сутки, а во втором случае задействуется один образец МРИУС, который обеспечивает пропускную способность до 400 обучающихся в сутки. В случае



Рис. 9. Сравнительная лепестковая диаграмма, отражающая основные изменения параметров модифицированного процесса по сравнению с исходным:

1 — исходный БП; 2 — модифицированный БП

необходимости масштабирование МРИУС на требуемое число обучающихся (пользователей) может быть выполнено посредством настройки и/или модификации ее программного и/или аппаратного обеспечения [13].

Изменение пропускной способности оборудования при одновременном снижении его количества приводит также к модификации процессов обслуживания экспериментального оборудования и технической поддержки инфраструктуры специализированной лаборатории, а именно:

1. Каждый лабораторный макет/исследовательский стенд (в области приборостроения и радиоэлектроники) конструктивно выполняется в виде крейта "Евромеханика" 6U или его части. Соответствующая аппаратная часть МРИУС в целом интегрируется в телекоммуникационный шкаф стандарта "Евромеханика" 42U [12]. Доступ к такому оборудованию осуществляется удаленно по сети Интернет с ПЭВМ. Таким образом, экспериментальное оборудование всей специализированной лаборатории может быть представлено телекоммуникационными шкафами, число которых может быть от 1 до 3, которые размещаются и обслуживаются в специализированных помещениях, предназначенных для серверного оборудования.

2. Обслуживание такого экспериментального оборудования требует в 2...3 раза меньше учебно-вспомогательного персонала. Также снижаются объемы финансовых затрат на ремонт помещения и эксплуатируемого экспериментального оборудования, исключается необходимость в обеспечении мероприятий по охране труда обучаемых в специализированных лабораториях.

В качестве системных изменений в БП проведения лабораторных исследований следует выделить возможность полноценной организации подготовки и переподготовки кадров на базе цифровой образовательной среды, которая приобретает свойства высокотехнологичной за счет доступа по сети Интернет к современному экспериментальному оборудованию, обладающему высокой пропускной способностью. В составе таких сред могут быть организованы тематические или профильные интернет-лаборатории, на базе ресурсов которых выполняются все этапы лабораторных исследований [12] — от подготовки к выполнению исследований на базе высокотехнологичного экспериментального оборудования МРИУС и современной технической документации (мультимедийных интерактивных электронных технических ру-

ководств) до непосредственно процесса экспериментальных исследований на базе информационно-коммуникационных технологий [3]. Это, в свою очередь, является важным аспектом в контексте будущей профессиональной деятельности обучающихся [13].

## Заключение

Проведенный качественный анализ эффектов трансформации ряда сквозных БП из различных предметных областей, реализуемых с применением разработанных авторами статьи МРИУС, показал значительное улучшение основных показателей модифицированных БП по отношению к исходным. С точки зрения общепринятых показателей анализа эффективности [21] трансформация рассмотренных в статье сквозных БП или их фрагментов позволяет:

- повысить качество БП за счет повышения информативности выполняемых отдельных бизнес-функций и повышения эффективности использования высокотехнологичного экспериментального оборудования;
- сократить число разрывов в БП за счет уменьшения числа бизнес-ролей, задействованных в их реализации;
- сократить длительность выполнения БП за счет существенного сокращения материальных и временных затрат и повышения производительности работ при выполнении отдельных бизнес-функций;
- перейти к сервисной модели доступа к высокотехнологичному экспериментальному оборудованию *Laboratory As A Service* (модель выполнения экспериментальных лабораторных исследований на базе цифровых образовательных сред) [4—9].

Таким образом, разработка и внедрение сквозных цифровых технологий в области радиоэлектронного приборостроения обеспечивает повышение производительности труда, качества и конкурентоспособности создаваемой продукции, стимулирует процессы формирования нового сегмента рынка продуктов и услуг, повышает их доступность. В свою очередь, прикладное применение таких технологий в различных отраслях народного хозяйства РФ требует достижения определенного уровня зрелости исходных БП в организациях и на предприятиях. Как минимум, должны быть сформированы модели основных и вспомогательных БП, определены метрики для их оценки и рассчитаны их значения [22, 23]. Дальнейший



процесс трансформации БП по аналогии с рассмотренными в данной статье позволяет перейти к более высокому уровню зрелости БП — к созданию системы автоматизации и контроля сквозных БП, к созданию модели бизнеса, новых бизнесов и т. д., что соответствует общемировым трендам цифровизации.

#### Список литературы

1. **Государственная** программа Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности" (утверждена постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г № 328).
2. **Программа** "Цифровая экономика Российской Федерации" (утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 июня 2017 г. № 1632-р).
3. **ГОСТ Р 57721—2017.** Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2017.
4. **Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliyah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M.** Laboratory as a Service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories // *iJOE*. 2014. Vol. 10, N. 4. P. 13—21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654.
5. **Sannnie J., Oruklu E.** Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration // *International Journal of Engineering Education*. 2015. Vol. 31, N. 1(A). P. 106—120.
6. **Мазурицкий М. И., Солдатов А. В.** Интерактивные сетевые научно-образовательные ресурсы для естественно-научного образования // *Высшее образование в России*. 2014. № 1. С. 80—87.
7. **Bilyatdinova A., Karsakov A., Bezgodov A. A., Dukhanov A. V.** Virtual environment for creative and collaborative learning // *Knowledge, Information and Creativity Support Systems*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. P. 371—381.
8. **Hussin A.** Education 4.0 made simple: ideas for teaching // *International Journal of Education & Literacy Studies*. 2018. Vol. 6(3). P. 92—98. doi: 10.7575/aiac.ijels.v.6n.3p.92.
9. **Grodotzki J., Ortelt T., Tekkaya A.** Remote and virtual labs for engineering Education 4.0 // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 26. P. 134—1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126.
10. **ISO/IEC 30141:2018.** Internet of Things (IoT) — Reference Architecture, 2018.
11. **ГОСТ ISO/IEC 17788-2016.** Информационные технологии (ИТ). Облачные вычисления. Общие положения и терминология. М.: Стандартинформ, 2016.
12. **Сарафанов А. В., Комаров В. А., Суковатый А. Г., Худогов Д. Ю.** Изучение физических эффектов с использованием дистанционных технологий // *Информатизация образования и науки*. 2012. № 4(16). С. 49—63.
13. **Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р.** Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 2. С. 83—94. doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94.
14. **Комаров В. А., Пичкалев А. В.** Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов // *Интеллект и наука: труды XI Междунар. научн.-практ. конф., Железногорск, 28—29 апреля 2011 г.* Красноярск: Центр информатизации, 2011. С. 146—148.
15. **Комаров В. А., Семкин П. В.** Разработка архитектуры эмулятора интерфейсных модулей сопряжения систем жизнеобеспечения космических аппаратов // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, № 2. С. 228—235. doi: 10.31772/2587-6066-2019-2-228-235.
16. **Komarov V. A., Pazderin S. O., Sarafanov A. V.** Method for qualification testing of satellite-communication earth stations // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, N. 1. P. 8—11. doi: 10.1007/s11018-016-0907-3.
17. **Komarov V. A., Pazderin S. O.** Analysis of the effectiveness of the method of qualification tests for satellite communications earth stations // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, N. 4. P. 307—311. doi: 10.1007/s11018-019-01622-0.
18. **Исследования** физических явлений в электрических цепях с применением Интернет-технологий: учебное пособие / М. Л. Дектерев, В. А. Комаров, А. Г. Суковатый и др.; Под ред. А. В. Сарафанова. М.: ДМК Пресс, 2015. 432 с. (<https://dmkpress.com/catalog/electronics/labview/978-5-97060-153-2/>).
19. **ГОСТ Р 52003-2—2003.** Уровни разукрупнения РЭС. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2003.
20. **Пичкалев А. В.** Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // *Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010.* С. 515—516.
21. **Дубинина Н. А.** Показатели оценки бизнес-процессов предприятия // *Вестник Пермского университета. Сер. "Экономика"*. 2016. № 2(29). С. 179—191. doi: 10.17072/1994-9960-2016-2-179-191.
22. **Sheer A. W.** ARIS — Business Process Modeling. Berlin: Springer Verlag, 2000. 218 p.
23. **Silver B.** BPMN methods and style / B. Silver. 2nd ed. Aptos: Cody-Cassidy Press, 2011. 286 p.

**V. A. Komarov**, PhD, Tech., Associate Professor, e-mail: VKomarov@iss-reshetnev.ru, SC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite System", Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation,  
**A. V. Sarafanov**, Dr. Sc. Tech., Professor, e-mail: Sarafanov@i-teco.ru, OOO "Vitte Consulting" (GK "I-Teco"), Moscow, 117036, Russian Federation,  
**S. R. Tumkovskiy**, Dr. Sc. Tech., Professor, e-mail: STumkovskiy@hse.ru, National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 101000, Russian Federation

## The Experience of Digital Transformation of Business Processes of Applied Experimental Research by Using the Multitenancy of the Resources

*As part of the digital transformation of various areas of human activity, the urgent task is to transform existing business processes (BP) in order to increase their variability according to the needs of the customer, to increase productivity, quality*

and competitiveness of products. The introduction of end-to-end digital technologies allows for this. The article examines the experience of transforming the BP of experimental research in solving a number of applied tasks in the field of electronic instrumentation, which is obtained as a result of the introduction of operation technology for test, research and laboratory equipment based on the concept of multitancy. Developed on the basis of the experience of the authors, a number of industrial samples and prototype multiuser distributed measurement-control systems implementing this concept have allowed to transform the following processes: end-to-end BP of tests on-board electronic equipment of spacecraft (communications, relay, navigation, geodesy, remote sensing, etc.); BP of forming the operational load of the spacecraft's on-board relay complex; BP of conducting experimental laboratory research in the industry training system. The effectiveness of modernized BP was evaluated on the basis of their formalized models and a set of qualitative indicators. The key resulting effects of transformation: improving the quality of BP by improving the informativeness of individual business functions and the efficiency of the use of high-tech experimental equipment; reducing the number of gaps in BP by reducing the number of business roles involved in their implementation; reducing the duration of BP by significantly reducing material and time costs and improving the productivity of individual business functions; transition to a service model "Laboratory As Service" for access to high-tech equipment while performing experimental laboratory studies based on digital educational environments.

**Keywords:** Digital transformation, end-to-end digital technologies, business process, experimental research, test operations, efficiency, laboratory equipment, distributed measuring-control system, multitancy, e-learning, laboratory as a service

DOI: 10.17587/it.27.41-50

### References

1. **Government** program of Russian Federation "Industry development and increasing its competitiveness" (approved by the Government of the Russian Federation in its resolution No 328 dated April 15, 2014) (in Russian).
2. **The program** "Digital Economy of the Russian Federation" (approved by the Government of the Russian Federation in its resolution No. 1632-r dated July 28, 2017) (in Russian).
3. **State Standard R 57721-2017.** Information and communication technologies in education. The experiment is virtual. General provisions, Moscow, Standartinform, 2017 (in Russian).
4. **Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M.** Laboratory as a Service (Laas): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories, *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654.
5. **Sannic J., Oruklu E.** Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration, *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
6. **Mazuritsky M. I., Soldatov A. V.** Interactive network resources for natural science education and research, *Vysshee Obrazovanie v Rossii*, 2014, no. 1, pp. 80–87 (in Russian).
7. **Bilyatdinova A., Karsakov A., Bezgodov A. A., Dukhanov A. V.** Virtual environment for creative and collaborative learning, *Knowledge, Information and Creativity Support Systems*, Springer International Publishing, 2016, pp. 371–381.
8. **Hussin A.** Education 4.0 made simple: ideas for teaching, *International Journal of Education & Literacy Studies*, 2018, vol. 6(3), pp. 92–98, doi: 10.7575/aiac.ijels.v6n.3p.92.
9. **Grodotski J., Ortel T., Tekkaya A.** Remote and virtual labs for engineering Education 4.0, *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360, doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126.
10. **ISO/IEC 30141:2018.** Internet of Things (IoT) — Reference Architecture, 2018.
11. **State Standard ISO/IEC 17788-2016.** Information Technology (IT). Cloud computing. General provisions and terminology, Moscow, Standartinform, 2016 (in Russian).
12. **Sarafanov A. V., Komarov V. A., Sukovaty A. G., Khudonogov D. U.** Investigation of physical effects using remote technologies, *Informatizatsiya Obrazovaniya i Nauki*, 2012, no. 4(16), pp. 49–63 (in Russian).
13. **Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R.** Multi-user distributed information-control systems as an element of modern digital educational environment, *Informatsionno-Upravlyaiushchie Sistemy*, 2019, no. 2, pp. 83–94 (in Russian), doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94.
14. **Komarov V. A., Pichkalev A. V.** Application of NI FPGA technologies in testing spacecraft onboard equipment, *Intellect i nauka: trudy XI Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. ZHeleznogorsk, 28–29 aprelya 2011 g.*, Krasnoyarsk, 2011, pp. 146–148 (in Russian).
15. **Komarov V. A., Semkin P. V.** Development of interface module emulator architecture for spacecraft life support systems, *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 228–235, doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235.
16. **Komarov V. A., Pazderin S. O., Sarafanov A. V.** Method for qualification testing of satellite-communication earth stations, *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 8–11, doi: 10.1007/s11018-016-0907-3.
17. **Komarov V. A., Pazderin S. O.** Analysis of the effectiveness of the method of qualification tests for satellite communications earth stations, *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 307–311, doi: 10.1007/s11018-019-01622-0.
18. **Volodina D. N., Dekterev M. L., Komarov V. A., Presnyakova G. O., Sarafanov A. V., Sukovaty A. G., Trukhin A. A., Khudonogov D. U.** Research of physical effects in electrical circuits using Internet technologies, Moscow, DMK-Press, 2015, 432 p. (in Russian), available at: <https://dmkpress.com/catalog/electronics/labview/978-5-97060-153-2/>.
19. **State Standard R 52003-2 — 2003.** Disaggregation levels of downsizing of electronic equipment. Terms and definitions, Moscow, Standartinform, 2003 (in Russian).
20. **Pichkalev A. V.** The terrestrial debugging complex for on-board radio-electronic equipment, *Reshetnevskiy chteniya: materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf.*, Krasnoyarsk, 2010, pp. 515–516 (in Russian).
21. **Dubinina N. A.** Assessment indices for business processes at an enterprise, *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. "Ekonomika"*, 2016, no. 2(29), pp. 179–191, doi: 10.17072/1994-9960-2016-2-179-191 (in Russian).
22. **Sheer A. W.** ARIS — Business Process Modeling, Berlin, Springer Verlag, 2000, 218 p.
23. **Silver B.** BPMN methods and style, Aptos, Cody-Cassidy Press, 2011, 286 p.