

## ПОДХОДЫ К ИНТЕГРАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Милуков И.А.<sup>1\*</sup>, Роголёв А.Н.<sup>2\*\*</sup>, Соколов В.П.<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Красноказарменная ул., 14, Москва, 111250, Россия*

<sup>2</sup> *«Силовые машины»,  
ул. Ватутина, 3А, Санкт-Петербург, 195009, Россия*

\* *e-mail: ig.milukov2013@mail.ru*

\*\* *e-mail: r-andrey2007@yandex.ru*

\*\*\* *e-mail: vl.sokolov2013@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 03.11.2020

В производстве авиационной и ракетно-космической техники преобладают средства технологического оснащения с цифровым управлением, что предопределяет цифровые методы представления описаний технических объектов и технологических процессов, безбумажные технологии и безлюдное производство и требует новых подходов и методов интеграции конструирования и технологического проектирования. Основными ограничениями для проектирования являются заданные показатели качества, а критериями для выбора рациональных вариантов – функциональные показатели эффективности и технико-экономические показатели реализации на всех стадиях жизненного цикла. Во многих инструментальных средствах, применяемых для построения систем конструирования и технологического проектирования, конструкторские и технологические модели различаются для одних и тех же объектов проектирования не только по форме представления, но и по объёму описываемых свойств и параметров, что существенно затрудняет интеграцию. Для обеспечения интеграции сформулированы основные функции проектирующих систем, определена структура моделей процесса проектирования с выделением в качестве отдельных компонентов моделей различных объектов, формируемых и взаимодействующих в процессе проектирования, и разработаны схемы процессов структурно-параметрического моделирования. Рекомендовано применять единое математическое описание наукоёмких изделий, технологических систем и технологических процессов при конструировании и технологическом проектировании, чтобы обеспечить эффективную интеграцию автоматизированных систем для всех стадий жизненного цикла с помощью PDM- и PLM-систем.

*Ключевые слова:* жизненный цикл, подготовка производства, конструирование, технологическое проектирование, интеграция систем, автоматизированные системы, инструментальные средства, показатели качества, параллельное проектирование, структурно-параметрическое моделирование.

Объекты проектирования и производства наукоёмких отраслей экономики постоянно совершенствуются и усложняются как по структуре, так и по алгоритмам функционирования, что приводит к невозможности их реализации прежними методами с заданной эффективностью и в приемлемые сроки, поэтому для автоматизации проектирования и производства нет альтернативы. В производстве технических объектов в настоящее время преобладают средства технологического оснащения с цифровым управлением, что предопределяет цифровые методы представления описаний технических объектов и технологических

процессов, безбумажные технологии и безлюдное производство и требует новых подходов и методов интеграции проектирования и производства.

Для различных отраслей наукоёмкого машиностроения, включая авиационную и ракетно-космическую, характерно организационное разделение технической подготовки производства на конструкторскую и технологическую. Это разделение отразилось не только на организационной структуре промышленных предприятий, но и на системе государственной стандартизации, что подтверждается комплексами стандартов ЕСКД (единая система конструкторской документации)

и ЕСТД (единая система технологической документации) [1]. Сложность и функциональная завершенность решаемых с помощью различных автоматизированных систем [2] задач технической подготовки позволила выделить конструирование, отработку технологичности и технологическую подготовку производства в отдельные стадии жизненного цикла наукоёмких изделий [3–5], схема которого представлена на рис. 1.

процессов различного назначения. Он характеризуется преобладанием интеллектуального труда. В материальном слое по описаниям, представленным в различной форме, выполняется материализация изделий и процессов.

Основными стадиями жизненного цикла всех объектов производственной системы являются научные исследования, конструирование, подготовка производства, изготовление, эксплуатация, тех-

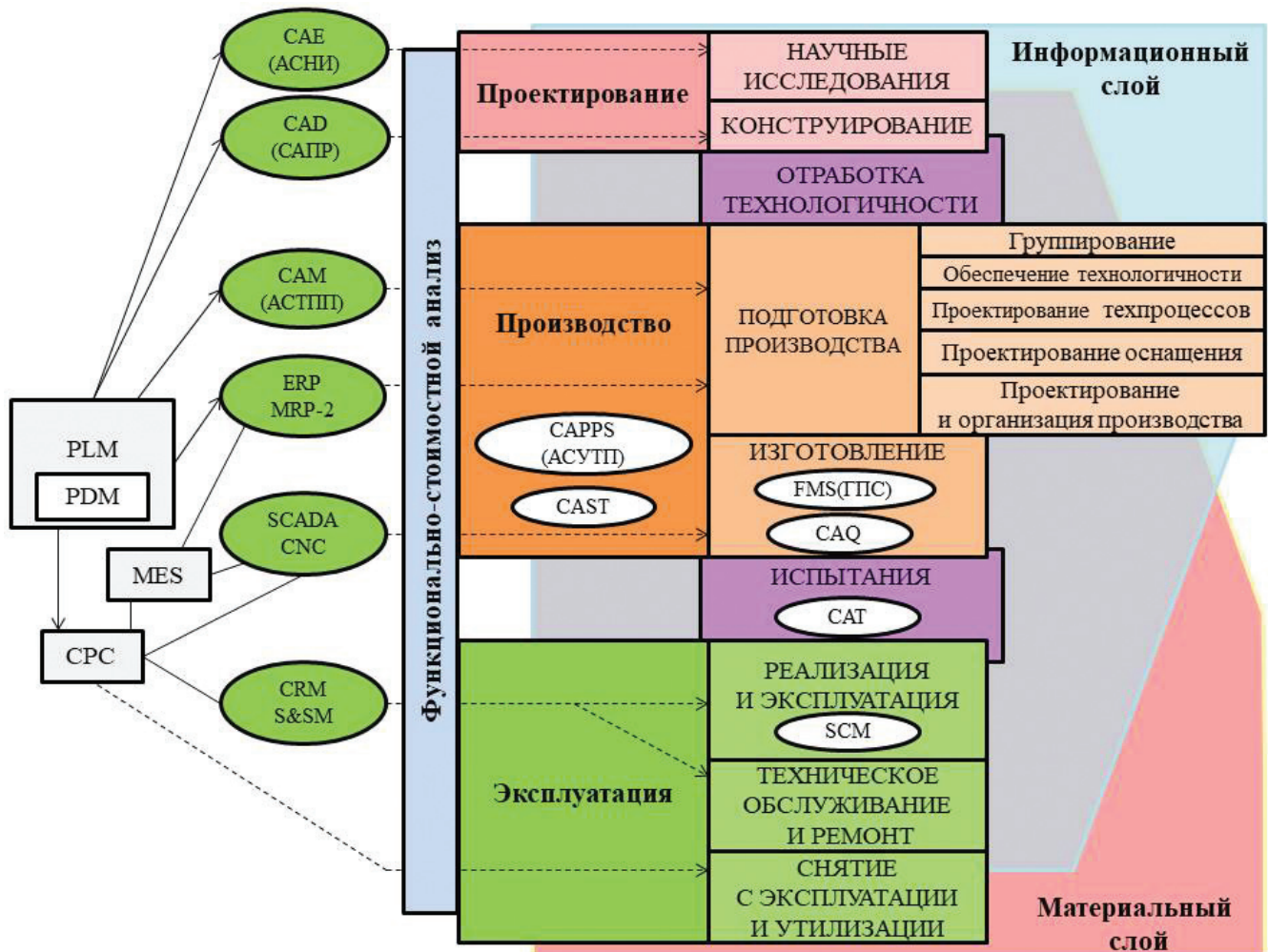


Рис. 1. Жизненный цикл объектов наукоёмкого машиностроения

В условиях разработки новых информационных технологий и перехода к безбумажным методам проектирования и безлюдному производству жизненный цикл изделия, включающий проектирование, производство и эксплуатацию, подразделяется на ряд специфических стадий и этапов [6, 7].

Для каждой стадии жизненного цикла сложного технического объекта характерны два слоя: информационный и материальный. В информационном слое создаются описания изделий и

техническое обслуживание и ремонт, снятие с эксплуатации и утилизация. При этом для всех рассматриваемых стадий проводятся: в информационном слое – функционально-стоимостной анализ, в материальном слое – постоянный контроль качества и испытания. Функционально-стоимостной анализ и испытания, как самостоятельные стадии жизненного цикла, имеют так называемый «центр рассеивания» с привязкой: для функционально-стоимостного анализа – между стадиями

конструирования и подготовки производства, для испытаний – между стадиями изготовления и эксплуатации [1, 7]. Общим для всех стадий и этапов жизненного цикла является первичность проектирования, как процесса, предопределяющего результаты всего остального, поэтому дадим определение проектированию и рассмотрим его особенности для автоматизации интеллектуальной деятельности проектировщиков.

Проектирование – процесс создания описания нового или модернизируемого объекта (изделия, технологические процессы, производственные системы, информационные системы), необходимого и достаточного для реализации проектируемого объекта в заданных условиях.

Основными ограничениями для проектирования технических объектов выступают заданные показатели качества [6–10], а критериями для выбора рациональных вариантов являются функциональные показатели эффективности [11–13] и технико-экономические показатели реализации на всех стадиях жизненного цикла: себестоимость (полная и технологическая), трудоемкость, затраты на технологическое оснащение и цикл. Показатели качества, определяемые в технических заданиях и являющиеся ограничениями при проек-

тировании для создания авиационной техники [1, 3, 6, 14–22], представлены на рис. 2.

Проектирование технического объекта включает процедуры создания, преобразования и представления (в принятой форме) образа этого ещё не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей возникает (формируется) в воображении проектировщика (человека) в результате творческого процесса или может генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия проектировщика и автоматизированной системы [1–3].

Инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах, которыми могут быть объекты, процессы и системы различного назначения.

В функциональном плане проектирование – процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного, конструкторского и технологического характера.

Описания могут быть представлены в различной форме и с разной степенью абстрагирования и подробности представления. Создание описаний

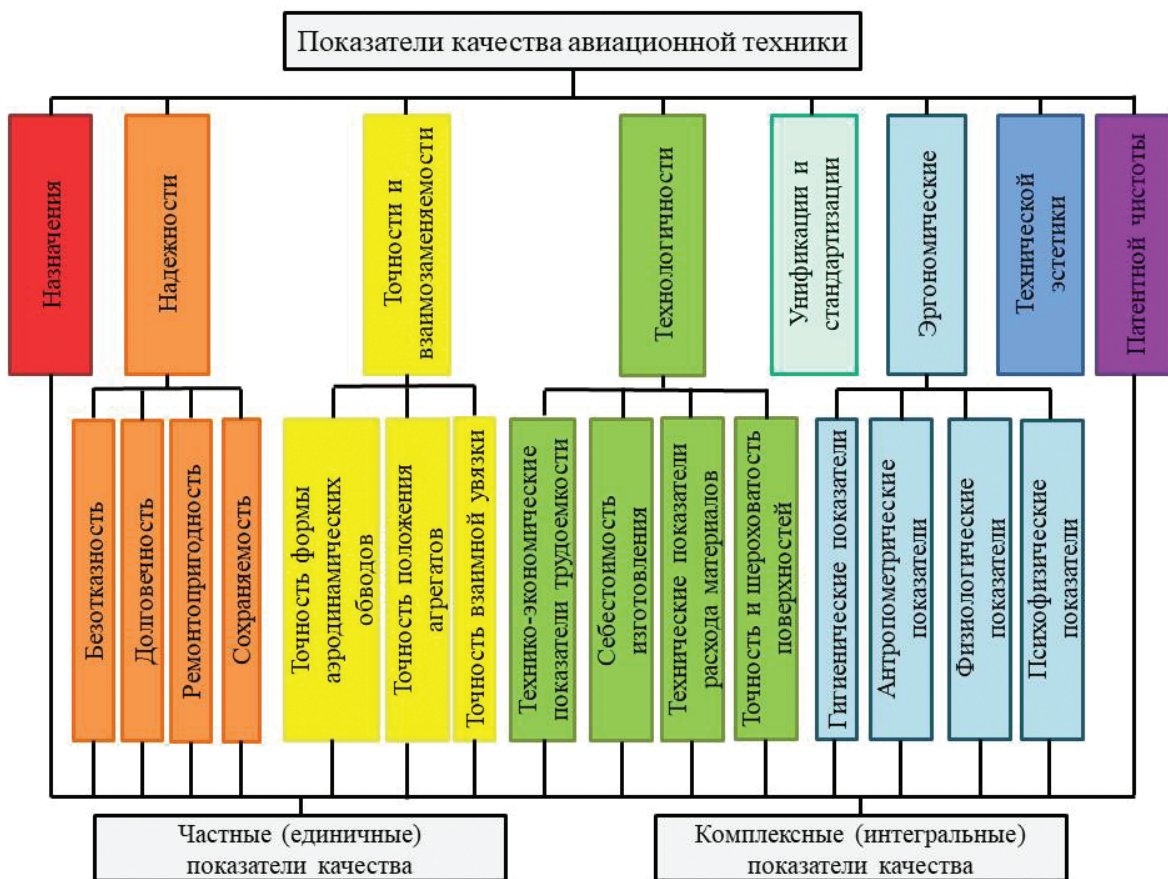


Рис. 2. Показатели качества авиационной техники

(проектной документации) для повышения качества и сокращения сроков проектирования необходимо автоматизировать [1, 4, 18, 20].

Преобразование исходного описания в окончательное порождает ряд промежуточных описаний, подводящих итоги решения некоторых проектных задач и используемых для обсуждения, оценки и принятия решений, а также для заключения об окончании или продолжении процесса проектирования. Промежуточные описания называются проектными решениями.

Стадия «Конструирование» включает в себя следующие этапы: разработку технического задания (ТЗ), отражающего потребности в техническом объекте и заданные показатели качества; техническое предложение (ТПр); эскизный проект (ЭП); технический проект (ТП); рабочий проект (РП). Результаты каждого этапа оформляются в виде проектной документации. Обычно ТЗ представляют в виде некоторых исходных документов и оно является исходным (первичным) описанием объекта. Результатом стадии «Конструирование», как совокупности всех этапов, служит полный комплект документации, содержащий необходимые и достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть проект, точнее, окончательное описание объекта.

Состав инструментальных средств автоматизации технологического проектирования зависит от функционального назначения и структуры подсистем автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП).

В соответствии со сложившейся практикой технологическая подготовка производства аэрокосмических предприятий (см. рис. 1) включает следующие этапы [1, 3, 4]:

- группирование или расцеховка изделия;
- обеспечение технологичности конструкции изделия;
- проектирование технологических процессов;
- проектирование технологического оснащения;
- проектирование материальных и информационных потоков и отработка функционирования производственной системы.

Во многих инструментальных средствах, применяемых для построения систем конструирования и технологического проектирования, конструкторские и технологические модели различаются для одних и тех же объектов проектирования не только по форме представления, но и по объё-

му описываемых свойств и параметров [1—3, 5, 9, 11, 13, 20]. Например, переход к проектированию технологических процессов и технологической оснастки требует рассмотрения представления твёрдотельных моделей, удобных для визуализации при конструировании, в виде поверхностных моделей, а для анализа размерных связей удобнее каркасные модели.

В настоящее время в инструментальных средствах, применяемых для построения систем конструирования, получили развитие подсистемы сканирования, формирующие для чертежей векторные модели, а для деталей и макетов триангуляционные модели, но они должны быть в дальнейшем оцифрованы с добавлением большого объёма специфической конструкторско-технологической информации о размерных связях, допусках и посадках, физико-механических свойствах, включая характеристики шероховатости поверхностей, покрытия и многое другое.

Все операции и переходы, как составные элементы различных видов технологических процессов, по функциональному назначению можно разделять на предварительные, основные, дополнительные и заключительные. Кроме программируемых основных операций и переходов есть много других, в том числе и основных, которые пока ещё не автоматизированы и не могут быть запрограммированы. В то же время любые, в том числе и не программируемые, методы и действия для автоматизированного проектирования должны преобразовываться в строго формализованные математические модели для формирования информационных моделей во внутримашинном представлении.

Система, реализующая проектирование независимо от вида объектов, представляет собой человеко-машинную систему автоматизированного проектирования (САПР, в англоязычном написании CAD System – Computer Aided Design System).

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и автоматизированных систем, называют автоматизированным проектированием, в отличие от ручного (без использования САПР) или автоматического (без участия человека на промежуточных этапах). Автоматическое проектирование сложных технических систем без участия проектировщика невозможно.

Итак, автоматизированным называется такое проектирование, при котором все или часть проектных решений получается при взаимодействии человека и средств автоматизации. В качестве

основных средств автоматизации проектных работ применяют средства вычислительной техники, являющиеся техническим обеспечением систем автоматизированного проектирования.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) различного назначения – организационно-технические комплексы, состоящие из взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем, средств обеспечения и компонентов для автоматизированного проектирования объектов и их составных частей на основе применения математических моделей, автоматизированных проектных процедур и средств вычислительной техники. Типовая структура автоматизированных систем представлена на рис. 3.

Средства обеспечения бывают различных видов, и каждое может быть определено через совокупность составляющих его компонентов [1, 4, 7]:

*математическое* – методы, математические модели и алгоритмы автоматизированного проектирования;

*лингвистическое* – совокупность языков, используемых в автоматизированных системах для

представления информации о проектируемых объектах, процессах и средствах проектирования;  
*информационное* – документы, содержащие описание изделий, производственной системы, их элементов (предметной области), а также файлы и блоки данных на машинных носителях с записями этих документов;

*программное* – совокупность программ, представленных в заданной форме, вместе с необходимой программной документацией;

*техническое* – совокупность аппаратных средств, включающая устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства, используемые в автоматизированных системах;

*методическое* – документы, в которых отражены состав, правила выбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования;

*организационное* – положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру проектной организации.

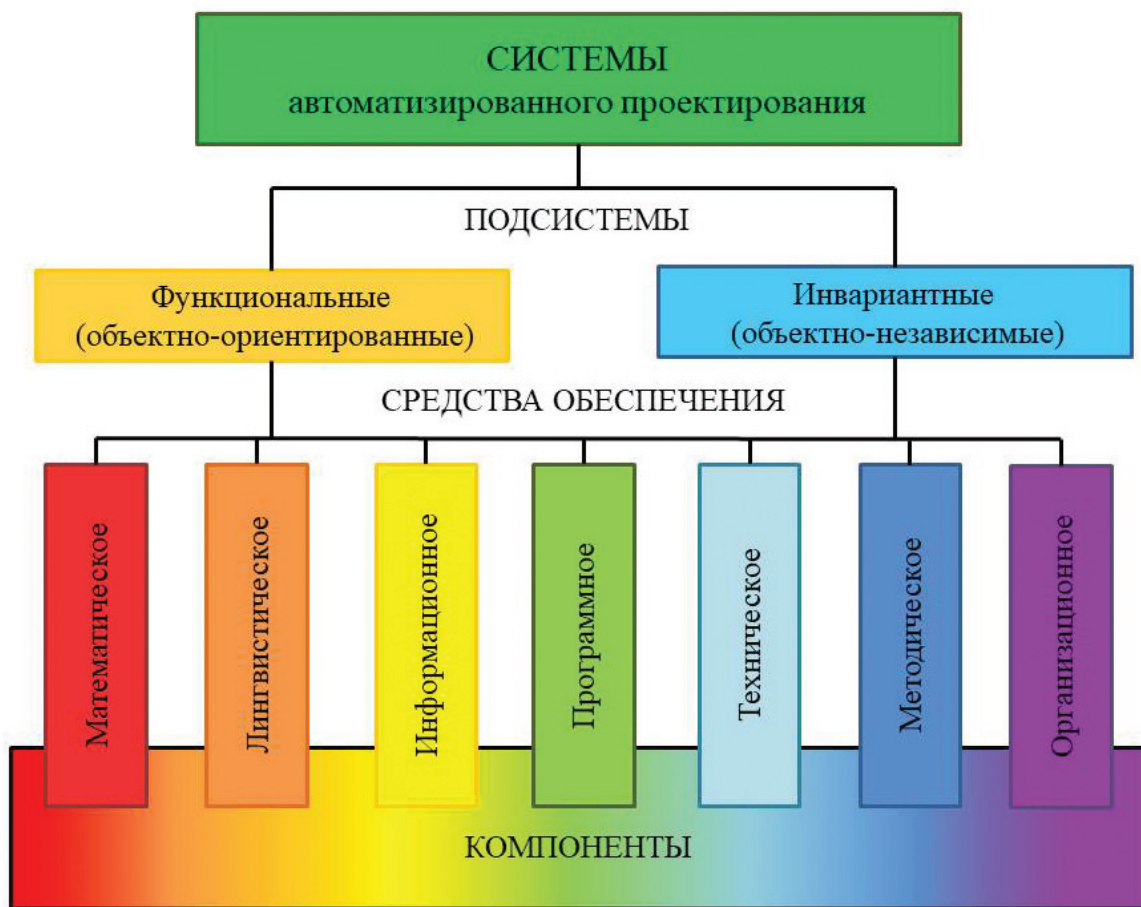


Рис. 3. Типовая структура систем автоматизированного проектирования

Информационное, математическое, программное и техническое обеспечение автоматизированных систем аэрокосмических предприятий для интеграции должны соответствовать требованиям отечественных и международных стандартов.

Целью создания систем автоматизированного проектирования является совершенствование процессов создания и эксплуатации наукоемких объектов на всех стадиях жизненного цикла на базе математических методов, оптимизации процессов проектирования и управления с применением современных средств вычислительной и организационной техники.

Каждую из установленных форм организации процессов автоматизированного проектирования допускается реализовывать множеством структурных вариантов, зависящих от специфики конкретного объекта и степени охвата задач информационного сопровождения различных стадий жизненного цикла средствами механизации и автоматизации проектной и производственной деятельности.

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов, включая технологический задел каждой конкретной предметной области. Наиболее общим подходом является системный подход, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем.

Проблемы взаимодействия проектировщиков проявляются уже на начальных стадиях жизненного цикла сложных технических систем, поэтому их нужно выявлять, анализировать и предлагать подходы к интеграции конструирования и технологического проектирования.

Основными особенностями конструирования и технологического проектирования [6, 7], влияющими на функциональное назначение и структуру автоматизированных систем и подходы к их интеграции, является следующее:

- в процессе проектирования формируется информационная модель нового или модернизируемого объекта (изделия, процесса, системы);

- процедуры проектирования обеспечивают поэтапное преобразование исходного описания объекта в конечном пространстве предметной области;

- процедуры преобразования для сложных объектов являются трудноформализуемыми;

- процесс проектирования разрешает внешние связи и формирует внутреннюю структуру, так как любой проектируемый объект является частью включающей его системы;

- требуются организация передачи информации и согласование проектных решений в связи с тем, что при проектировании сложных объектов на различных стадиях и этапах привлекаются новые коллективы специалистов;

- для обеспечения требуемых качественных показателей и повышения эффективности изделий процесс проектирования выполняют итерационными методами, а проектные решения являются многовариантными.

Переход от бумажных (растровых) к электронной (векторной) форме представления конструкторских документов и графических фрагментов технологических процессов, а также формализованное представление конструктивно-технологических свойств и параметров должны способствовать интеграции автоматизированных систем не только за счет информационного обмена, а также и на основе типовых подходов и моделей объектов конструирования и технологического проектирования.

Особенно сложно преобразовать в электронную форму технический и технологический задел, сохраняемый в форме патентов, справочников, атласов, технической литературы, учебников, стандартов, руководящих документов и методических материалов.

Комплексное решение всех задач наукоемкого машиностроения, связанных с проектированием, производством и эксплуатацией изделий, необходимо выполнять с помощью постоянно совершенствуемых интегрированных автоматизированных систем [1, 3, 4, 6], использующих единые методы и средства для решения всех задач конструирования и технологического проектирования на основе применения современных информационных технологий, предоставляющих возможность радикального изменения процессов информационного сопровождения наукоемких объектов на всех стадиях жизненного цикла.

Абсолютной интеграции человеко-машинных автоматизированных систем достичь невозможно, но исключить проблемы, возникающие при обмене данными в итерационных процессах проектирования (как сверху вниз, так и снизу вверх) между системами конструирования и подготовки производства для сокращения затрат времени и уменьшения количества ошибок и тем самым повысить эффективность и качество проектирования просто необходимо, поэтому важно выработать подходы к интеграции не только при разработке, но и при совместной эксплуатации и адаптации автоматизированных систем, применяемых на раз-

личных стадиях жизненного цикла наукоёмких объектов.

При создании и развитии автоматизированных систем (АС), обеспечивающих информационное сопровождение объектов на всех стадиях жизненного цикла, для интеграции конструирования и технологического проектирования рекомендуется применять следующие общесистемные принципы [1, 6]:

— принцип системного единства, состоящий в том, что на всех стадиях и этапах создания, функционирования и развития АС целостность системы должна обеспечиваться связями между подсистемами, реализуемыми автоматизированной подсистемой управления;

— принцип включения, предусматривающий формирование требований по созданию, функционированию и развитию АС и её подсистем со стороны общей, включающей в себя АС, системы, определяющей функционирование всей организации в предметной области;

— принцип комплексности, заключающийся в том, что в АС должна обеспечиваться связность проектирования отдельных элементов и всего объекта в целом на всех стадиях жизненного цикла и особенно на этапах конструкторского проектирования и технологической подготовки производства;

— принцип информационного единства, состоящий в том, что в подсистемах, средствах обеспечения и компонентах АС должны использоваться термины, условные обозначения и символы, а также проблемно-ориентированные языки проектирования и способы представления информации, установленные в отраслях соответствующими нормативными документами;

— принцип совместимости, заключающийся в том, что информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, средствами обеспечения и компонентами АС, применяемые языки, коды и символы должны быть согласованы так, чтобы обеспечивалось совместное функционирование всех подсистем и сохранялась открытая структура системы в целом;

— принцип инвариантности, предопределяющий универсальность подсистем, средств обеспечения и компонентов, реализующих типовые проектные процедуры и операции и являющихся инвариантными к проектируемым объектам и процессам предметной области.

В основе автоматизированного проектирования и производства выступает интегрированная технологическая среда параллельного проектиро-

вания изделий, процессов, средств оснащения и управляющих систем, поэтому интеграция должна начинаться с типовых однородных методов и моделей разнородных объектов, а алгоритмы моделирования должны обеспечивать выполнение различных логических и параметрических процедур и операций.

С учетом требований непротиворечивости, независимости и полноты системы параллельного проектирования приняты следующие предложения в качестве основных утверждений [1, 3, 7]:

1. Процесс проектирования  $S(\Pi)$  представляется совместными преобразованиями модели исходного объекта  $S(A)$  и модели порождающей среды  $S(P)$  с получением в результате преобразований информационной модели объекта проектирования  $S(T)$ .

2. Математические модели  $S(A)$ ,  $S(P)$ ,  $S(T)$  описывают состояние моделируемого объекта (среды) автономно, независимо от способов соединения с другими объектами системы.

3. Преобразования, реализуемые при проектировании, представляют собой последовательность эквивалентных преобразований, результаты преобразований всегда конечны и определены, что позволяет представить процесс проектирования  $S(\Pi)$  направленным потоком.

4. Модели исходных объектов  $S(A)$ , модели объектов проектирования  $S(T)$  и модели порождающей среды  $S(P)$  имеют одинаковую математическую структуру.

Переходя к представлениям и интерпретациям формул методологии автоматизации проектирования в предметных областях конструирования и технологического проектирования [1, 3, 7], можно сформулировать основные функции проектирующих систем.

Процесс проектирования можно выразить математической структурой

$$S(\Pi) = \{S(A), r, S(P), S(T)\}, \quad (1)$$

где  $S(A)$  — модель исходного объекта;

$r$  — процедурно-алгоритмическая среда;

$S(P)$  — модель порождающей среды;

$S(T)$  — модель объекта проектирования.

Модели объектов проектирования представляются в форме типовых математических структур следующего вида:

$$S(A) = \{A, F^A, N^A, R^A\}; \quad (2)$$

$$S(P) = \{P, F^P, N^P, R^P\}; \quad (3)$$

$$S(T) = \{T, F^T, N^T, R^T\}, \quad (4)$$

где  $A, P, T$  – множества элементов моделей;

$F^A, F^P, F^T$  – множества свойств (контуров)

элементов моделей;

$N^A, N^P, N^T$  – множества параметров элемен-

тов и свойств (контуров) элементов моделей;

$R^A, R^P, R^T$  – множества отношений между элементами, свойствами (контурами) и параметрами.

Базовая формула параллельного проектирования

$$S(A) \text{ r } S(P) \rightarrow S(T), \quad (5)$$

соответствующая, к примеру, проектированию технологического процесса при использовании модели изделия как исходного объекта, а модели производственной системы как модели порождающей среды, является частным случаем и может иметь другие прикладные интерпретации, получаемые перестановками объектов моделирования.

Выделим некоторые особенности компонентов информационных математических моделей  $S(A)$  (2),  $S(P)$  (3),  $S(T)$  (4).

Элемент  $A, a_i; P, p_j, T, t_l$ :

– в процессе моделирования всегда существует, четко определен;

– может входить или не входить в анализируемые структуры;

– представляется теоретико-множественной величиной;

– в дополнение к первой особенности: существует при любых значениях свойств и параметров.

Свойство (контур)  $F^A, f_i^A; F^P, f_j^P; F^T, f_l^T$ :

– имеет зависимый характер; его значение может быть определено только при сопоставлении с элементом;

– представляется логической величиной (двухзначная (четкая) логика или нечеткая логика);

– принимает значение из конечного ряда методом указания состояния (есть ИЛИ нет; истина ИЛИ ложь; 1 ИЛИ 0), характеризуется одним или несколькими параметрами.

Параметр  $N^A, n_i^A; N^P, n_j^P; N^T, n_l^T$ :

– является характеристикой элемента или свойством, имеющим количественное или лингвистическое значение;

– принимает количественное или лингвистическое значение из бесконечного ряда значений.

Отношения  $R^A, R^P, R^T$ :

– существуют только между компонентами информационных математических моделей;

– определяются типом отношения, наличием отношения и правилом установления определенности (значения).

При построении отображений

$$T: A \rightarrow P \quad (6)$$

с учетом правил связи между

$$F(a) \rightarrow F(A), F(p) \rightarrow F(P), F(t) \rightarrow F(T)$$

используются операции математической логики (отрицание, дизъюнкция и т.д.). По правилам выбора применяются термы сравнения, имеющие различный вид: для теоретико-множественного и логического представления (эквивалентность, включение и т.д.) и для количественного представления (равно, больше и т.д.).

Функции преобразований, разделенные на три группы (связи, выбора, упорядочения), а также методы преобразований типов и структур данных алгоритмически и программно реализуются, и выбор их комбинации выполняется в соответствии с требованиями к созданию динамической имитационной модели производственной системы.

К основным проектным процедурам, выполняемым при проектировании, относятся: определение структуры объекта проектирования; расчет и оптимизация параметров, характеризующих проектные решения.

Структура объекта проектирования, определяемая составом и взаимосвязями элементов, в основе своей многомерна. Структурное моделирование является наиболее сложной областью для формализации [1, 7]. В большинстве систем автоматизированного проектирования и систем искусственного интеллекта основные функции структурного моделирования выполняет человек [1–3, 8, 9]. Реализация этих функций может производиться как в процессе проектирования, так и при описании предметной области.

Параметры, характеризующие структурные элементы и объект проектирования в целом, увеличивают размерность предметной области. Параметрическое моделирование – наиболее отработанный метод, аккумулирующий способы вычислительной математики. Основными функциями параметрического моделирования являются определение значений параметров и оптимизация значений параметров. Параметры могут быть непрерывными и дискретными, обособленными и связанными между собой. Таким образом, структурное и параметрическое моделирование в отдельности характеризуются многомерным формальным пространством, в котором они выполняются.

Технические возможности современной вычислительной техники позволяют повысить быстродействие и эффективность проектирования за



счет объединения методов структурного и параметрического моделирования алгоритмически и программно в параллельно-последовательные процедуры структурно-параметрического моделирования.

Для реализации структурно-параметрического моделирования в технологической среде параллельного проектирования необходимо определить структуру моделей процесса проектирования с выделением в качестве отдельных компонентов моделей различных объектов, формируемых и взаимодействующих в процессе проектирования, а также разработать схемы процессов структурно-параметрического моделирования.

Взаимосвязь пространств, слоев и методов моделирования жизненного цикла изделий на всех стадиях жизненного цикла [1, 3, 6, 7] представлена на рис. 4.

Моделирование по назначению подразделяется на функциональное, конструктивное, технологическое, эксплуатационное.

Моделирование по видам делится на структурно-параметрическое, геометрическое, натурное (технологическое), физико-механическое.

Пространства моделирования подразделяются на  $n$ -мерное; трехмерное (геометрическое), где двухмерное – частный упрощенный случай.

Слои моделирования подразделяются на информационный и материальный.

### Выводы

Математическое обеспечение автоматизированных систем информационной поддержки всех стадий жизненного цикла должно соответствовать требованиям сосредоточенного преобразования, независимости, иерархичности и связности методов, моделей и алгоритмов для функционального, конструктивного, технологического и эксплуатационного моделирования объектов проектирования.

1. Моделирование материальных и энергетических преобразований происходит только в элементах системы (*сосредоточенное преобразование*).

2. Математическая модель элемента описывает поведение элемента как целого независимо от способа соединения с другими элементами системы (*независимость*).

3. Моделью элемента системы проектирования на концептуальном уровне является граф вида «дерево», информационные потоки в котором соответствуют дугам (*иерархичность*).

4. Моделью системы проектирования в целом на концептуальном уровне является граф общего вида, объединяющий элементы системы, а процесс передачи информации имеет итерационный характер (*связность*).

Переход к применению единого математического описания наукоёмких изделий, технологических систем и технологических процессов при конструировании и технологическом проектиро-

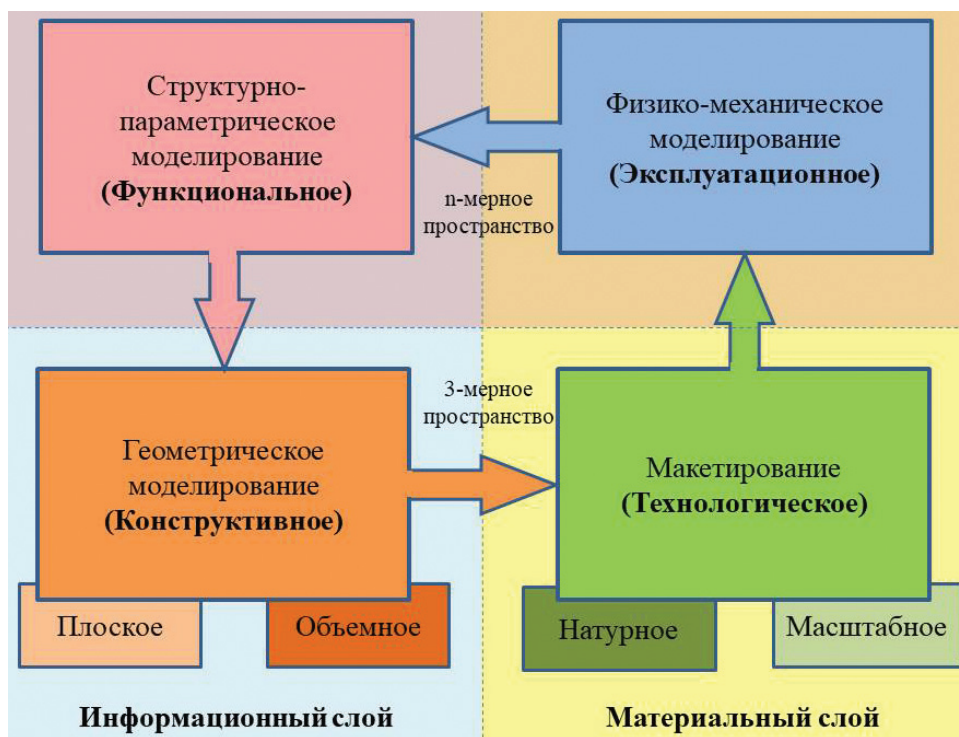


Рис. 4. Взаимосвязь пространств, слоев и методов моделирования жизненного цикла изделий

вании может обеспечить эффективную интеграцию автоматизированных систем для всех стадий жизненного цикла с помощью PDM- и PLM-систем.

*Исследование проведено в НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.*

### Библиографический список

1. Авиационно-космическое машиностроение: Международная энциклопедия CALS-технологий / Гл. ред. А.Г. Братухин. — М.: НИЦ АСК, 2015. — 608 с.
2. *Норенков И.П., Кузьмик П.К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 320 с.
3. *Милуков И.А., Рогалев А.Н., Соколов В.П.* Инновационные технологии проектирования в авиастроении // Авиационная промышленность. 2017. № 4. С. 17-23.
4. *Братухин А.Г.* Основополагающие интегрированные информационные технологии конкурентоспособных изделий машиностроения (на примере гражданской авиационной техники). Ч. 1 и 2 // Научно-технический журнал «Наука и технологии в промышленности». 2012. № 2. С. 2-25; № 4. С. 2-11.
5. *Маленков А.А.* Выбор проектных решений при проектировании системы беспилотных летательных аппаратов в условиях многоцелевой неопределенности // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 7-15.
6. *Милуков И.А., Рогалев А.Н., Соколов В.П.* Особенности создания автоматизированных систем технологической подготовки производства инновационной продукции: Учеб. пособие. — М.: Цифровичок, 2018. — 33 с.
7. *Соколов В.П.* Моделирование технической подготовки производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 2(49). С. 47-52.
8. *Донсков А.В., Мишурова Н.В., Соловьев С.В.* Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 151-160.
9. *Лёвочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С., Козлов А.А., Боровик И.Н., Беляева Н.В., Румянцев Д.С.* Система функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей в режиме реального времени // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 147-154.
10. *Коробейникова Е.С.* Стандартизация и управление качеством продукции // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 210-219.
11. *Черноволов Р.А., Гарифуллин М.Ф., Козлов С.И.* Валидация процедур проектирования и изготовления динамически подобных моделей летательных аппаратов с применением полимерных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 102-112.
12. *Марчуков Е.Ю., Вовк М.Ю., Кулалаев В.В.* Анализ технического облика энергетических систем методами математической статистики // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 156-165. DOI: 10.34759/vst-2019-4-156-165
13. *Лохтин О.И., Разносчиков В.В., Аверьков И.С.* Методика создания 3D-модели летательного аппарата с ракетно-прямоточным двигателем // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 131-139. DOI: 10.34759/vst-2020-2-131-139
14. Federal Aviation Administration / 2007 Commercial Space Transportation Forecasts. FAA Commercial Space Transportation (AST) and the Commercial Space Transportation Advisory Committee (COMSTAC), May 2007. — 53 p.
15. AC 25.571-1D Damage tolerance and fatigue evaluation of structure. — U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Advisory Circular. 1 / 13 / 2011. — 41 p.
16. Web Services Business Process Execution Language Version 2.0. — OASIS, 2007. — 264 p. URL: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf>
17. *Aggarwal S., Kumar N.* Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges // Computer Communications. 2020. Vol. 149, pp. 270-299. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.014
18. *Kovrigin E., Vasiliev V.* Trends in the development of a digital quality management system in the aerospace industry // 18th International Conference “Aviation and Cosmonautics” — AviaSpace-2019 (18-22 November 2019, Moscow, Russian Federation). — IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 868. No. 1, pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/868/1/012011
19. *Nikulin A., Nikulin S., Zakharova I.* Quality of aviation cluster infrastructure // Slovak International Scientific Journal. 2017. Vol. 1. No. 8, pp. 13-16.
20. *Miller A.M., Hartman N.W., Hedberg T.D.* et al. Towards identifying the elements of a minimum information model for use in a model-based definition // 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (4-8 June 2017; Los Angeles, CA). Paper No: MSEC2017-2979, V003T04A017; 13 p. DOI: 10.1115/MSEC2017-2979
21. *Khan M.A., Mittal S., West S., Wuest T.* Review on upgradability — A product lifetime extension strategy in the context of product service systems // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 204, pp. 1154-1168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.329
22. *Lyu G., Chu X., Xue D.* Product modeling from knowledge, distributed computing and lifecycle perspectives: A literature review // Computers in Industry. 2017. Vol. 84, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.compind.2016.11.001

## APPROACHES TO DESIGN ENGINEERING AND TECHNOLOGICAL DESIGNING INTEGRATION

Milyukov I.A.<sup>1\*</sup>, Rogalev A.N.<sup>2\*\*</sup>, Sokolov V.P.<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250 Russia

<sup>2</sup> "Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport" ("Power machines")

3A, Vatutina str., St. Petersburg, 195009, Russia

\* e-mail: ig.milyukov2013@mail.ru

\*\* e-mail: r-andrey2007@yandex.ru

\*\*\* e-mail: vl.sokolov2013@mail.ru

### Abstract

At present, means of technological equipment with digital control prevail in technical objects production, which predetermines digital methods for both technical objects and technological processes representation, digital workflow and robotic production. It requires new approaches and methods for integration of designing and manufacturing. Organizational separation of technical preproduction into design and technological ones is characteristic for various branches of science-intensive mechanical engineering, including aviation and space-rocket industries. Complexity and functional completeness of the problems being solved by various automated systems separate designing, manufacturability adjustment and preproduction into separate stages of the science-intensive products' life cycle. Primacy of design as the process of the new or being upgraded object (products, technological processes, production systems, information systems) description creation, necessary and sufficient for the object being designed realization under the specified conditions, is common to all stages. The main constraints for technical objects design are the specified quality indicators, and rational options selection criteria are both functional performance indicators and technical and economic indicators of realization at all stages of the life cycle. The "Designing" stage includes the following phases: development of technical specifications; technical proposal; draft design; technical project; working draft. Preproduction planning of aerospace enterprises includes the following stages: grouping or shop-to-shop routing of the product, ensuring manufacturability of the product design, technological processes developing, technological equipment design, material and information flows design and production system functioning adjustment. The results of each stage are being formalized in the form of project documentation. Design and technological models for the same design objects differ not only by the form of

representation, but by the volume of the features and parameters being described as well, employed for the design and process design systems developing, which significantly complicates their integration. It is recommended to employ the following system-wide principles, ensuring information support of the objects for designing and technological design integration: the principle of inclusion; the principle of completeness; the principle of information unity; the principle of compatibility and the principle of invariance while automated systems creation and development. With account for the requirements on consistency, independence and completeness of the parallel design system based on representations and interpretations of the design automation methodology in the subject areas of designing and technological design the basic functions of the design systems were formulated.

The structure of the design process models were determined with separation of models of various objects, being formed and interacted in the design process, as well as the structural-parametric modeling process were developed.

It was recommended to apply a unified mathematical description of science-intensive products, technological systems and technological processes in designing and technological design to ensure effective integration of automated systems for all stages of the life cycle employing the PDM and PLM systems.

**Keywords:** life cycle, preproduction, design, technological designing, integration of systems, automated systems, tools, quality indicators, parallel design, structural-parametric modeling.

### References

1. Bratukhin A.G. (ed.) *Aviatsionno-kosmicheskoe mashinostroenie: Mezhdunarodnaya entsiklopediya CALS–tekhnologii* (Aviation and space engineering: International encyclopedia of CALS technologies), Moscow, NITs ASK, 2015, 608 p.

2. Norenkov I.P., Kuz'mik P.K. *Informatsionnaya podderzhka naukoemkikh izdelii. CALS-tehnologii* (Information support of high-tech products. CALS-technologies), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2002, 320 p.
3. Milyukov I.A., Rogalev A.N., Sokolov V.P. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2017, no. 4, pp. 17-23.
4. Bratukhin A.G. *Nauchno-tehnicheskii zhurnal "Nauka i tehnologii v promyshlennosti"*, 2012, no. 2, pp. 2-25; no. 4, pp. 2-11.
5. Malenkov A.A. Design solutions selection while developing a system of unmanned flying vehicles in conditions of multi-target uncertainty. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no 2, pp. 7-15.
6. Milyukov I.A., Rogalev A.N., Sokolov V.P. *Osobennosti sozdaniya avtomatizirovannykh sistem tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva innovatsionnoi produktsii* (Specifics of creating process design automated systems for innovation production manufacturing), Moscow, Tsifrovichok, 2018, 33 p.
7. Sokolov V.P. *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2019, no. 2(49), pp. 47-52.
8. Donskov A.V., Mishurova N.V., Solov'ev S.V. Automated system for space vehicle status monitoring. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 151-160.
9. Levochkin P.S., Martirosov D.S., Kamenskii S.S., Kozlov A.A., Borovik I.N., Belyaeva N.V., Rumyantsev D.S. Liquid rocket engines functional diagnostics system in real-time mode. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 147-154.
10. Korobeinikova E.S. Evolvement of quality management systems effectiveness assessment mechanism in aerospace industry. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 210-219.
11. Chernovolov R.A., Garifullin M.F., Kozlov S.I. Validation of designing and manufacturing procedures of aircraft dynamically similar models with polymer composite materials application. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 102-112.
12. Marchukov E.Y., Vovk M.Y., Kulalaev V.V. Technical appearance analysis of energy systems by mathematical statistics techniques. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 156-165. DOI: 10.34759/vst-2019-4-156-165
13. Lokhtin O.I., Raznoschikov V.V., Aver'kov I.S. A technique for 3D-model developing of a flying vehicle with ducted rocket engine. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 131-139. DOI: 10.34759/vst-2020-2-131-139
14. *Federal Aviation Administration. 2007 Commercial Space Transportation Forecasts*. FAA Commercial Space Transportation (AST) and the Commercial Space Transportation Advisory Committee (COMSTAC), May 2007, 53 p.
15. *AC 25.571-1D Damage tolerance and fatigue evaluation of structure*. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Advisory Circular. 13.01.2011, – 41 p.
16. *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0*. OASIS, 2007, 264 p. URL: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf>
17. Aggarwal S., Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 2020, vol. 149, pp. 270-299. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.014
18. Kovrigin E., Vasiliev V. Trends in the development of a digital quality management system in the aerospace industry. *18th International Conference "Aviation and Cosmonautics" - AviaSpace-2019 (18-22 November 2019, Moscow, Russia)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 868, no. 1, pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/868/1/012011
19. Nikulin A., Nikulin S., Zakharova I. Quality of aviation cluster infrastructure. *Slovak International Scientific Journal*, 2017, vol. 1, no. 8, pp. 13-16.
20. Miller A.M., Hartman N.W., Hedberg T.D. et al. Towards identifying the elements of a minimum information model for use in a model-based definition. *12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (4-8 June 2017; Los Angeles, CA)*. Paper No: MSEC2017-2979, V003T04A017; 13 p. DOI: 10.1115/MSEC2017-2979
21. Khan M.A., Mittal S., West S., Wuest T. Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 204, pp. 1154-1168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.329
22. Lyu G., Chu X., Xue D. Product modeling from knowledge, distributed computing and lifecycle perspectives: A literature review. *Computers in Industry*, 2017, vol. 84, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.compind.2016.11.001