

УДК 519.711

## АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК И ПРОЦЕССОВ

А.Ю. Агроник<sup>1</sup>, А.А. Талалаев<sup>2</sup>, В.П. Фраленко<sup>2</sup>, В.М. Хачумов<sup>3</sup>, О.Г. Шишкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Квадросистемс», Москва, Россия  
aleksey@agronik.im

<sup>2</sup>Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, Переславль-Залесский, Россия  
alarmod85@hotmail.com

<sup>3</sup>Институт системного анализа ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия  
vnh48@mail.ru

### Аннотация

Рассмотрено современное состояние вопроса синтеза технологических цепочек и процессов в рамках систем автоматизированного проектирования технологических процессов. Выполнен анализ публикаций по результатам современных исследований, рассмотрены особенности актуальных программных систем проектирования. Дана классификация САПР технологических процессов по отраслевому и целевому назначению с учётом нового направления в медицине, а также классификация методов, применяемых в САПР. Показано, что достигнутый современный уровень теории пока не позволяет создать универсальную технологию синтеза, единую для всех прикладных направлений. Перспективы решения вопроса связываются с построением интеллектуальных систем автоматизированного проектирования, реализующих наиболее общий подход к синтезу на основе имитации деятельности разработчиков и предназначенных для поддержки научно-технических и технологических решений в приоритетных направлениях науки и техники. Приведена общая схема многоуровневого итерационного процесса синтеза на основе баз знаний, хранящих прецеденты, процедуры выбора, настройки и оценивания варианта. В случае отсутствия подходящего образца в базе проводится прямой синтез нового технологического процесса с применением одного из возможных формальных подходов.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование, технологический процесс, технологическая цепочка, интеллектуальные системы, синтез процесса.

**Цитирование:** Агроник, А.Ю. Анализ систем проектирования технологических цепочек и процессов / А.Ю. Агроник, А.А. Талалаев, В.П. Фраленко, В.М. Хачумов, О.Г. Шишкин // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, №3(21). – С. 255-269. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-255-269.

### Введение

Известен ряд концептуальных подходов к решению проблемы синтеза структур технологических процессов (ТП). Однако, каждый из них обладает рядом принципиальных недостатков, которые делают невозможным создание на их основе эффективно работающих систем автоматизированного проектирования. Главными из них являются невозможность автоматического формирования ТП или его части, недостаточная универсальность и слабая интеграция в единое информационное пространство. Необходимо создание новых методов, моделей и инструментальных средств, предназначенных для построения оптимизированных технологических цепочек (ТЦ) и ТП на основе баз знаний, автоматического синтеза планов и технологий интеллектуального управления. Должен быть выполнен анализ имеющегося научного задела, дано обобщение мировых достижений в области интеллектуальных методов

построения технологий и предложены новые механизмы синтеза научно-технических решений, основанные на создании и применении баз знаний.

В связи с нарастающей сложностью ТП становится актуальной задача автоматического построения как отдельных ТЦ, так и обобщённых схем ТП на их основе с применением различных инструментальных средств искусственного интеллекта. Создание систем автоматического синтеза ТП на основе конструктивно-технологических параметров объекта проектирования является одной из нерешённых пока проблем. Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы автоматического синтеза ТП при условии инвариантности к классам объектов. Одним из перспективных путей решения этой сложной задачи является создание экспертных систем, снабжённых методами интеллектуального планирования ситуации и мощным аппаратом оптимизации. Процесс принятия решения должен опираться на математические модели соответствующих процессов и формализованные методы работы с ними, позволяющие с учётом параметров, характеризующих индивидуальность процесса, синтезировать соответствующую оптимальную стратегию.

В настоящее время отсутствуют методические работы, связанные с оптимизацией выбора ТП для конкретного приложения на основании математической модели, а также разработки единого механизма генерации и оценки ТП. К приоритетным предметным областям (ПрО) можно отнести:

- автоматическое проектирование машиностроительных изделий и приборов, в том числе проектирование оптимизированных расписаний работы технических устройств и синтез алгоритмов в системах автоматизированного проектирования специализированных устройств;
- автоматическое управление, например, управление траекторным движением роботизированной системы в целом или её механизмами в отдельности;
- формирование процесса работы интеллектуального генетически обучаемого автомата в системах защиты;
- синтез медицинских технологических процессов, оптимизированных под лечение конкретных пациентов.

## **1 Основные понятия и определения**

Под технологической цепочкой (или траекторией) будем понимать конечную или циклическую последовательность «действий» (операций, этапов, работ, действий, перемещений и т.д.), направленную на достижение поставленной цели в исследуемой ПрО. В соответствии с ГОСТ 3.1109-82 «Термины и определения основных понятий» технологический процесс – «часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда». ТП содержит не менее одной ТЦ, которые могут быть взаимосвязаны, образуя параллельные, параллельно-последовательные и конвейерные конструкции. Сложный ТП правильно рассматривать как самостоятельный процесс, состоящий из частных ТП и специфических действий, которые называются технологическими операциями. Современное содержание понятия «технология» многогранно и включает процессы обработки и переработки материалов, описание процессов, инструкции по их выполнению, всевозможные планы, графики, чертежи, изображения ТП и требования к ним, контроль за процессами (услугами) и их качеством, совокупность методов получения, обработки информации в различных областях деятельности человека. Технология как наука изучает процессы преобразования некоторых первичных сущностей в сущности, удовлетворяющие потребности человека. Она опирается на совокупность знаний о способах и средствах построения ТП.

Полагаем, что ТЦ и ТП являются результатом автоматического планирования (генерации) дискретных «действий», осуществляемых в соответствии с набором некоторых правил с учётом темпоральных аспектов ПрО. Определение ТП может быть представлено в текстовом виде, графическим описанием, декларацией на некотором формальном языке. Для описания ТП могут быть использованы модели потоков работ (workflow) и данных (dataflow). Системы управления потоками работ обеспечивают требуемую последовательность действий с ресурсами. Каждая технологическая операция и весь ТП в целом характеризуются значениями потребляемого ресурса (объём памяти, число исполнительных ресурсов, время выполнения и другими параметрами), что позволяет проводить оценку процессов и их сравнение. Наибольший интерес представляет синтез оптимизированных по заранее установленным критериям ТЦ и ТП, получаемых в результате генерации планов интеллектуальными планировщиками, работающими с интегрированными базами знаний/данных. Отметим, что в настоящее время задача автоматического синтеза ТП является нерешённой до конца в теоретическом плане. Выполненный анализ источников позволил выявить новые или модифицированные методы и подходы, основанные на применении баз знаний и планировании.

## **2 Систематизация и классификация систем генерации технологических цепочек и процессов**

Классификацию классических систем автоматизированного проектирования (САПР) можно считать, в основном, устоявшейся на основе англоязычных терминов, применяемых для классификации программных приложений и средств автоматизации по отраслевому и целевому назначению [1, 2]. Здесь выделим особо такое направление как САПР (Computer-Aided Process Planning) – средства автоматизации планирования ТП, которому соответствует отечественное название САПР ТП. Многие САПР совмещают решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования, и являются комплексными (CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM). Однако, относительно недавно появилось и быстро стало получать развитие такое направление как медицинские технологические процессы (МТП) [3-5]. Анализ Интернет и библиотечных ресурсов показал, что в мире уделяется большое внимание внедрению технологий управления МТП. Отметим публикационную активность последних лет за рубежом в области синтеза МТП [6-8]. В Европе ведётся работа по внедрению систем управления лечебно-диагностическими процессами, в том числе в России развиваются онтологический и информационно-аналитические подходы к описанию МТП. Одной из основных задач, решение которой позволит существенным образом улучшить качество медицинской помощи, является построение моделей и планов индивидуального лечения пациентов с различными нозологиями [9-10]. Имеющиеся разработки пока не позволяют проводить глубокую формализацию МТП. Предполагается разработать методы и инструментальные средства, которые позволят выполнить автоматический синтез оптимизированных МТП на основе стандартов лечения и накопленных знаний об исходах лечения.

Особое место в классификации занимают интеллектуальные САПР (ИСАПР), в которых имитируется деятельность технолога. Классификация САПР с учётом новых направлений приведена на рисунке 1.

Для представления современного состояния ПрО приведём обзор некоторых работ. В работе [11] рассмотрены методы и современные САПР ТП, произведён анализ наиболее распространённых программ для проектирования ТП. В первую очередь представляют интерес методы генерации ТП, рассматриваемые в САПР ТП. Существуют три основных метода автоматизированного проектирования ТП: индивидуальное проектирование; проектирование на основе группового ТП; проектирование ТП методом синтеза (см. рисунок 2).

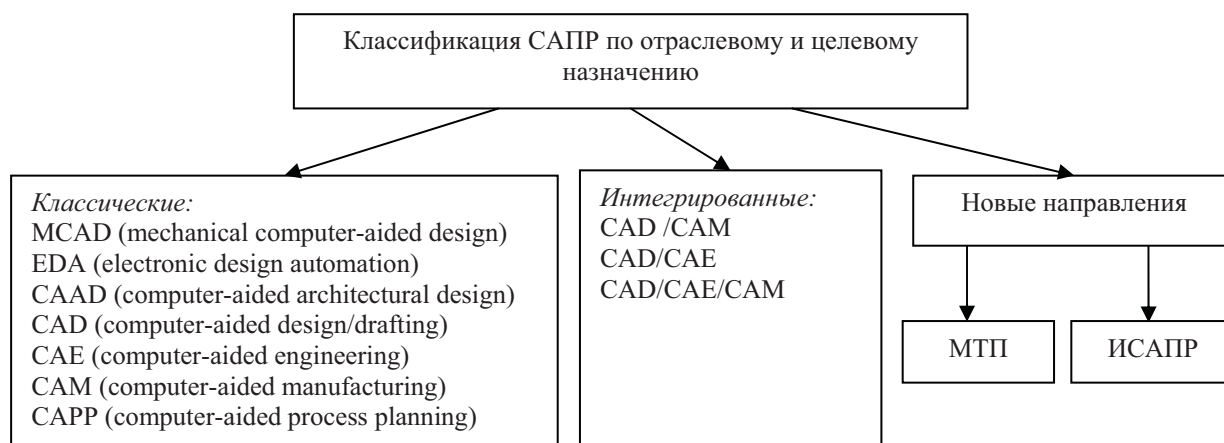


Рисунок 1 – Классификация САПР

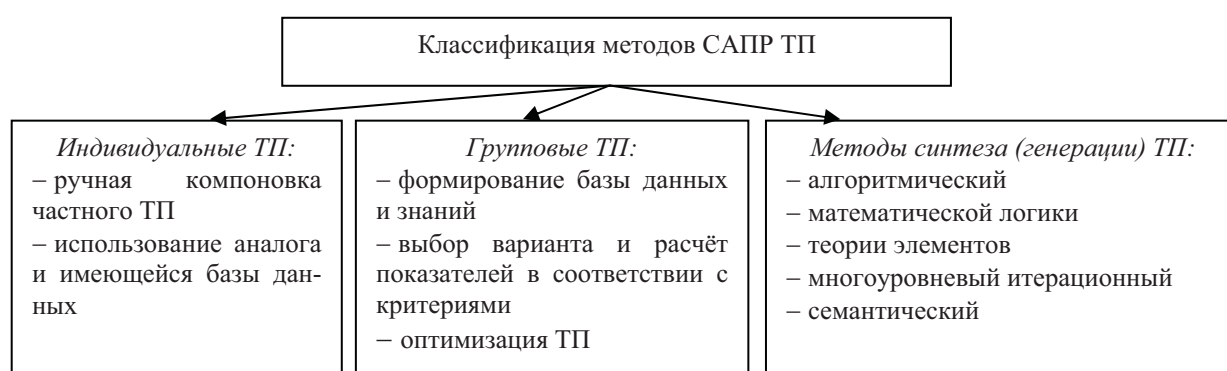


Рисунок 2 – Классификация методов проектирования ТП

Метод индивидуального проектирования заключается в компоновке необходимой последовательности операций и переходов с использованием имеющейся базы данных. Предполагается разработка ТП на основе процесса-аналога, т.е. разработанных ранее ТП-прецедентов. Проектирование на основе группового ТП, который используется в качестве настраиваемого шаблона. Метод синтеза ТП состоит в алгоритмическом формировании ТП. В настоящее время этот метод находит ограниченное применение, поскольку требует строгого математического описания формирования структуры ТП.

Индивидуальные САПР специализированы на определённые классы деталей и под конкретные предприятия. Высокая степень автоматизации в них достигается за счёт использования алгоритмов проектирования, отражающих знания технологических наук и опыт экспертов-технологов, участвующих в разработке систем и хорошо знающих конкретные предприятия. Адаптация таких систем к условиям других предприятий оказывается весьма сложной и требует значительных трудозатрат.

Проектирование на основе группового ТП базируется на разработке группового шаблона, который настраивается на параметры конкретного ТП. Примером подобного подхода служит работа [12], в которой приведены основные методы интегрированных САПР, используемые для проектирования деталей, узлов и агрегатов конструкции космического аппарата. На основании типовых ТП формируется рабочий ТП и рассчитываются показатели. При этом выполняется оптимизация, обеспечивающая технологичность конструкции. Общим недостатком группового проектирования ТП является чрезмерное увеличение вариантов технологических решений, что делает метод громоздким, усложняя работу пользователей.

Возможности автоматизации, предоставляемые методами индивидуального и группового проектирования, практически исчерпаны. Поэтому возникает необходимость в разработке

САПР ТП, функционирующей на основе метода синтеза ТП и комбинированных методов. Метод синтеза состоит в алгоритмическом формировании ТП на основе математических моделей, преобразований форм представления, точностей описаний и других параметров в соответствии с установленными критериями качества. Метод находится в состоянии теоретической проработки построения универсального подхода к проектированию ТП.

Особенностью синтеза схемы ТП является формирование последовательности преобразования изделия от начального состояния до конечного. Преобразование производится по уровням, и каждый уровень представляет собой многовариантную систему. Результатом процесса синтеза является построение дерева вариантов, которое отвечает заданным технологическим ограничениям [13].

Многоуровневый итерационный метод является универсальным методом, т.к. с его помощью можно спроектировать ТП практически для любой детали или сборочной единицы. На первом этапе принимается наиболее общее решение, которое уточняется на последующих этапах. Окончательный вариант определяется на последнем этапе, на промежуточных этапах выбирается комплекс решений, наиболее полно отвечающих заданным критериям. От этапа к этапу круг поиска сужается. Схема процесса синтеза представлена на рисунке 3.

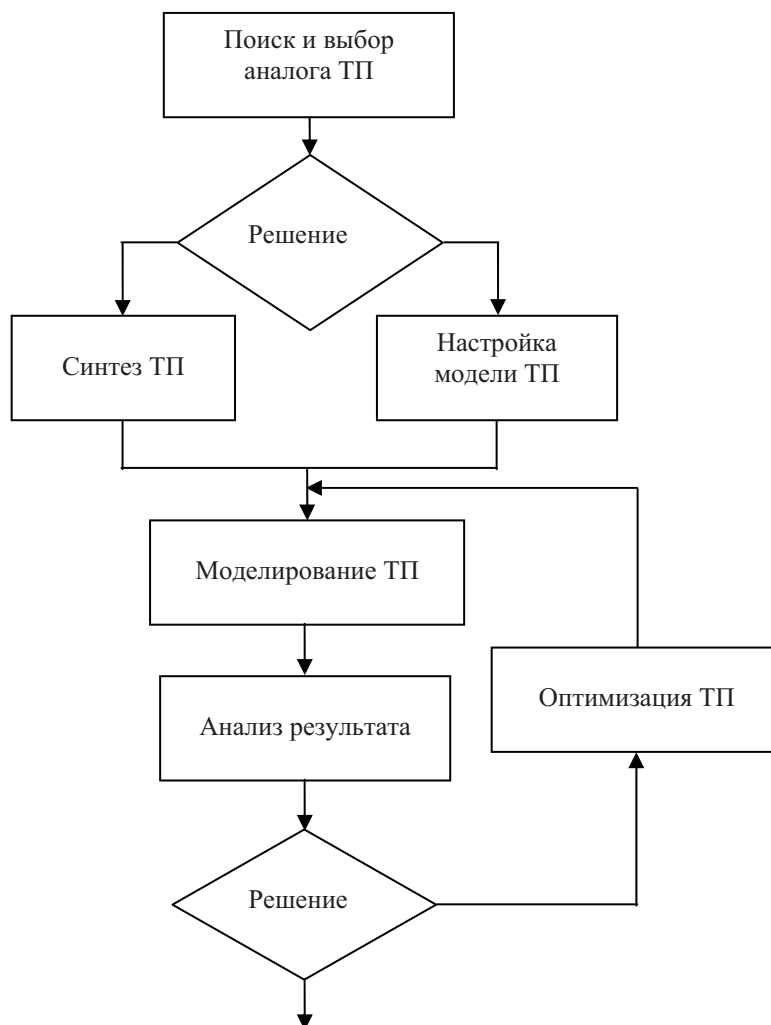


Рисунок 3 – Схема процесса синтеза ТП

По результатам поиска принимается решение. Если аналог существует, то блоком решения производится настройка процесса-аналога на проектируемую деталь. Затем анализируется результат на соответствие техническому заданию и производится моделирование полученного процесса. Если аналог не найден в базе данных, то переходят к варианту синтеза ТП. Проектировщик создаёт первоначальное решение и производится моделирование процесса. Результаты моделирования анализируются и принимается решение о выборе рационального варианта. Этот вариант оптимизируется, цикл повторяется, в результате нескольких итераций выбирается оптимальный вариант по критериям ТП.

Примером метода синтеза ТП может служить подход, описанный в [14]. Необходимым условием является предварительное заполнение базы данных, когда становится возможным автоматизированное принятие сложных логических решений, связанных, например, с выбором структуры процесса и операций, назначением технологических баз и другими подобными задачами. В работе [15] изложены основы разработки методов анализа и синтеза систем управления, учитывающих наличие обратных связей, сложную динамику процессов управления, физическую разнородность устройств и элементов, многокритериальность, неопределённость задаваемых параметров и возмущающих воздействий. Примером алгоритмического подхода к синтезу служит работа [16], в которой рассмотрена методика и процесс автоматического построения (генерации) схем электрической системы.

В работе [17] рассмотрено новое поколение САПР. Основная идея – перенос логики взаимосвязи технологических объектов из модели ТП в семантическую модель справочных данных. Это позволяет, с одной стороны, упростить настройку и конфигурирование объектной модели технологии, с другой, расширяет возможности системы управления за счёт консолидации знаний о поведении и взаимодействии технологических объектов. Ключевым сервисом организации данных является семантический поиск, при котором в качестве критериев отбора объектов можно задавать не только их атрибуты, но и взаимосвязи с другими объектами.

В [18] представлен обзор САПР ТП (методы проектирования, современные системы автоматического проектирования и др.), рассмотрены два метода проектирования ТП: метод синтеза и метод процессации. Метод синтеза (многоуровневый, итерационный метод проектирования) является универсальным методом, позволяющим проектировать достаточно сложные ТП, основан на аксиоматическом подходе и реализован как система проектирования в классе систем «искусственный интеллект». Проектирование операций ведётся от последней к первой операции (метод «обратного планировщика»). Метод процессации основывается на создании рабочих ТП путём настройки унифицированных (типовых или групповых) ТП на конкретные детали. Метод позволяет использовать все преимущества групповой технологии. В настоящее время оба метода из-за их высокой сложности не реализованы в полной мере. В частности, не решены задачи автоматического формирования маршрута процесса, определения структуры операции, базирования заготовок, поиска приспособлений и ряд других интеллектуальных задач.

Отдельно отметим теоретически проработанную САПР [19, 20], в которой были сделаны первые попытки автоматического синтеза ТП применительно к машиностроительным, радиоэлектронным, строительным и другим изделиям, сформулирована общая теория формального синтеза структур интерактивных систем. Основная идея синтеза структур заключалась в создании сетевой модели интерактивных систем на основе алгоритма функционирования и возможных взаимосвязей форматов данных с различными реализациями отдельных блоков, а также последующего формального выбора лучшей реализации в виде определения кратчайшего пути на сетевой модели.

Пример практической САПР, работающей на стыке групповых технологий и технологий синтеза, описан в работе [21], в которой представлена полнофункциональная система технологического проектирования, обладающая гибкими современными средствами разработки технологических проектов любой сложности. Система позволяет синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов. Блочный-иерархический подход к проектированию основан на декомпозиции сложных описаний объектов и средств их создания на иерархические уровни, вводит понятие стиля проектирования, устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней. Вся информация, необходимая для проектирования ТП, хранится в справочниках комплекса T-FLEX. Создаётся библиотека технологических решений, в которую заносятся профессиональные знания (операции с переходами, оснащением, инструкциями и т.п.). Сформированная таким образом база знаний становится важным информационным ресурсом предприятия. По выбранным критериям можно найти аналогичный ТП и на его основе спроектировать новый. При использовании на предприятии типовых или групповых ТП обеспечивается возможность их параметризации. В таких параметрических ТП могут автоматически пересчитываться значения параметров по всему ТП, а затем производиться автоматический подбор оснащения.

Примерами современных зарубежных программных решений, направленных на подготовку ТП, являются: программа Allplan компании Nemetschek [22], предназначенная для поддержки всех фаз жизненного цикла проекта; программа CADdy компании ZIEGLER-Informatics GmbH [23], предназначенная для автоматизации комплексных интегрированных технологий от стадии проектирования до стадии производства; система автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства SolidWorks компании SolidWorks Corporation [24]. Примерами отечественных программ для проектирования ТП в машиностроении являются «T-Flex Технология» [21], «Вертикаль» [25] и «ТехноПро» [26]. Даже в этой наиболее развитой области вопрос полностью автоматической генерации технологии изготовления объекта пока остаётся открытым.

Ввиду недостатков перечисленных выше методов САПР ТП всё большее развитие получают интеллектуальные системы – ИСАПР. Основные концепции ИСАПР представлены в работе [27].

Интеллектуализация САПР возможна тремя способами [28].

1. Внешняя универсальная интеллектуализация с помощью подключения инструментальных средств, настроенных на соответствующую ПРО (конструирование, технология и т.д.). В качестве таких средств могут выступать оболочки экспертных, диалоговых и обучающих систем.

2. Внешняя специализированная интеллектуализация с помощью специальных программных дополнений, работающих на принципах искусственного интеллекта. Способ целесообразно применять как развитие предыдущего в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к качеству работы САПР. Этот способ не требует существенного изменения внутренней структуры и алгоритмов ИСАПР, поскольку сводится, как правило, к улучшению сервисных характеристик, возможности формулировки типовой задачи проектирования на предметно-ориентированном языке, более близком к естественному. Совокупность средств общения пользователя с САПР на предметно-ориентированном языке называется интеллектуальным интерфейсом.

3. Внутренняя интеллектуализация с помощью встроенных технологий искусственного интеллекта. Способ затрагивает глубинные свойства САПР, включая её функциональные возможности проектирования, возможности синтеза, адаптации, самоорганизации, работы с нечёткой формулировкой задачи.

Типовая структура ИСАПР представлена на рисунке 4.

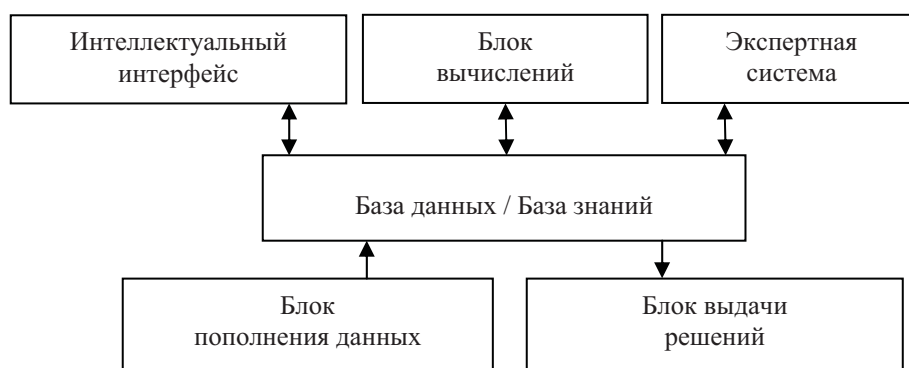


Рисунок 4 – Структура ИСАПР

Структурный синтез ТП в ИСАПР реализуется с помощью экспертных систем [29]. База знаний ИСАПР содержит необходимую информацию о ПрО, в которой решается задача проектирования, а также экспертную информацию о предполагаемых путях проектирования. Проектирование опирается на методы моделирования и опыт, накопленный проектировщиками и хранящийся в базе знаний. Задание на проектирование формируется с помощью интеллектуального интерфейса и переводится в специальное внутреннее представление (базу данных). Затем задача передаётся на вход экспертной системы ПрО, которая инициализирует вычисления и производит поиск решения. Представленные в базе знаний модели оперируют набором правил и утверждений, следуя которым можно прийти от начальных условий к логическим выводам.

При использовании ИСАПР повышается качество проектируемых объектов благодаря увеличению числа просматриваемых вариантов и детальности проработки, уменьшается время проектирования за счёт применения средств имитационного моделирования и численных методов, повышается эффективность благодаря планированию вычислений и контролю результатов. ИСАПР на данный момент не получили широкого распространения, поскольку отсутствует универсальность подобных систем, разработка ведётся с привязкой к определённой ПрО и носит фрагментарный характер.

### 3 Универсальные методы автоматической генерации технологических процессов

Базовая концепция алгоритмического выполнения систем операций над абстрактными и физическими объектами однородного и неоднородного характера, позиционируемая как «Общая формальная технология» (ОФТ), получила своё развитие в серии работ [30-32]. Основные её положения были обобщены в монографии [33]. Важно, что концепция может быть применена в теории автоматического построения универсальных технологических систем и процессов различного назначения. ОФТ опирается на фундаментальную алгебраическую систему вида  $U = \langle A, \Omega_F, \Omega_P \rangle$ , где  $A$  – основное множество системы;  $\Omega_F$  – множество операций, определённых на  $A$ ;  $\Omega_P$  – множество предикатов, заданных на множестве  $A$  [34]. Утверждается [33], что все другие практически важные модели являются её частными случаями. В ОФТ приняты аналогичные алгоритмические системы (называемые «технологиями»)  $T = \langle B, F_T, F_A \rangle$ , где  $B$  – множество некоторых физических объектов, являющихся исходными и конечными объектами-результатами операций множества  $F_T$ , называемых «конструкция-



ми»;  $F_T$  и  $F_A$  – конечные множества конечноместных технологических (типа синтеза и декомпозиции) и аналитических операций над объектами из  $B$ , причём ни одна из операций в  $F_T$  и  $F_A$  не может быть выражена через другие.

ОФТ позволяет сравнивать потенциальные возможности различных технологий. В таких метаматематических структурах легко строятся модели программируемых технологических систем примерно на тех же формальных базовых принципах. В свою очередь, эти модели позволяют использовать их в качестве базовых при построении практических универсальных программируемых технологических систем в самых различных областях. В соответствии с ОФТ сформулированы основные этапы разработки конкретных многоцелевых программно управляемых технологических систем:

- на основе анализа различных процессов обработки (преобразования) объектов в заданной технологической области выделяются наиболее часто используемые типы технологических операций; получающиеся при этом наборы технологических и аналитических операций должны образовывать совокупности операций, отвечающих критерию полноты;
- анализируются потенциальные возможности вариантов максимально широкого класса объектов в заданной технологической области; выбирается вариант полной технологии, который позволяет синтезировать и анализировать максимально широкий класс объектов и достаточно просто реализуется технически;
- выбирается конкретный вариант структуры для технической реализации, который корректируется с учётом реального состава технологических операций.

Перечисленным принципам ОФТ соответствует, например, универсальный метод [19, 20], нашедший применение в САПР радиоэлектроники, машиностроения, приборостроения. Он устанавливает взаимосвязи между характеристиками алгоритмов функционирования систем и реализациями (аппаратными, программными) алгоритмов, формализует процесс генерации вариантов структурной организации проектируемых систем. Источниками синтеза являются: операции со структурами алгоритмов, декомпозиция алгоритмов на части и их объединение, базы программной или аппаратной реализаций частей алгоритмов, способы преобразования характеристик объектов информации и систематизация реализаций, критерии оценки вариантов построения систем. Декомпозицию структур алгоритмов предлагается проводить по принципу связности операций в алгоритмах. Предполагается, что проектируемая система работает по заданному алгоритму функционирования  $E$ , который характеризуется следующей тройкой параметров:  $E = \langle P, O, \Gamma \rangle$ , где  $P$  – множество объектов системы,  $O$  – множество операций над объектами (операндами),  $\Gamma$  – множество связей между операциями. Применительно к синтезу информационно-вычислительных систем [20] объекты в свою очередь характеризуется двойкой  $P = \langle C, \Delta \rangle$ , где  $C$  – множество способов кодирования операндов,  $\Delta$  – множество точностей их представления. Действия над заданным алгоритмом выполняются по определённым правилам.

**Правило 1.** Первоначальное разделение алгоритма на локальные алгоритмы (ЛА) для их независимой реализации на локальных структурах (ЛС) выполняется при наличии хотя бы одного из следующих условий: 1) отсутствие информационной связи между ЛА, 2) наличие разной точности и/или разных способов кодирования операндов.

После операций разделения структуры алгоритма на ЛА и их покрытия ЛС образуется первый вариант структуры алгоритмов системы, характеризуемый определёнными показателями качества, который может быть подвергнут дальнейшему преобразованию путём объединения ЛА в более крупные с целью образования новых вариантов реализации системы. Операции объединения ЛА производятся многократно. При этом каждому ЛА соответствует в общем случае множество ЛС из соответствующей базы данных. По мере укрупнения ЛА

уменьшается количество блоков структуры и увеличивается их сложность. Операции объединения проводятся по следующему правилу.

**Правило 2.** При объединении локальных алгоритмов способы кодирования информации должны быть приведены к единой форме, причём точность представления данных в обобщённом алгоритме выбирается как  $\delta = \min\{\delta_i\}$ ,  $\forall i \in \{1, \dots, n\}$ , где  $n$  – число объединяемых ЛА.

При объединении возникает новый ЛА, которому соответствует новая ЛС, имеющая в общем случае увеличенный объём памяти по отношению к первоначальным ЛС. Таким образом, за счёт операций с алгоритмами генерируется множество вариантов структурной организации проектируемой системы.

На рисунке 5 в качестве примера показаны последовательно этапы синтеза вариантов структур измерительной системы [20]. Система предназначена для высокоточного измерения, нормализации и визуализации в десятичном коде четырёх параметров ТП. При решении задачи оптимального перехода к структуре системы можно ограничиться наиболее общими показателями качества, определяющими характеристики устройства, реализующего систему ЛА. К ним относятся показатели сложности реализации, быстродействия и надёжности.

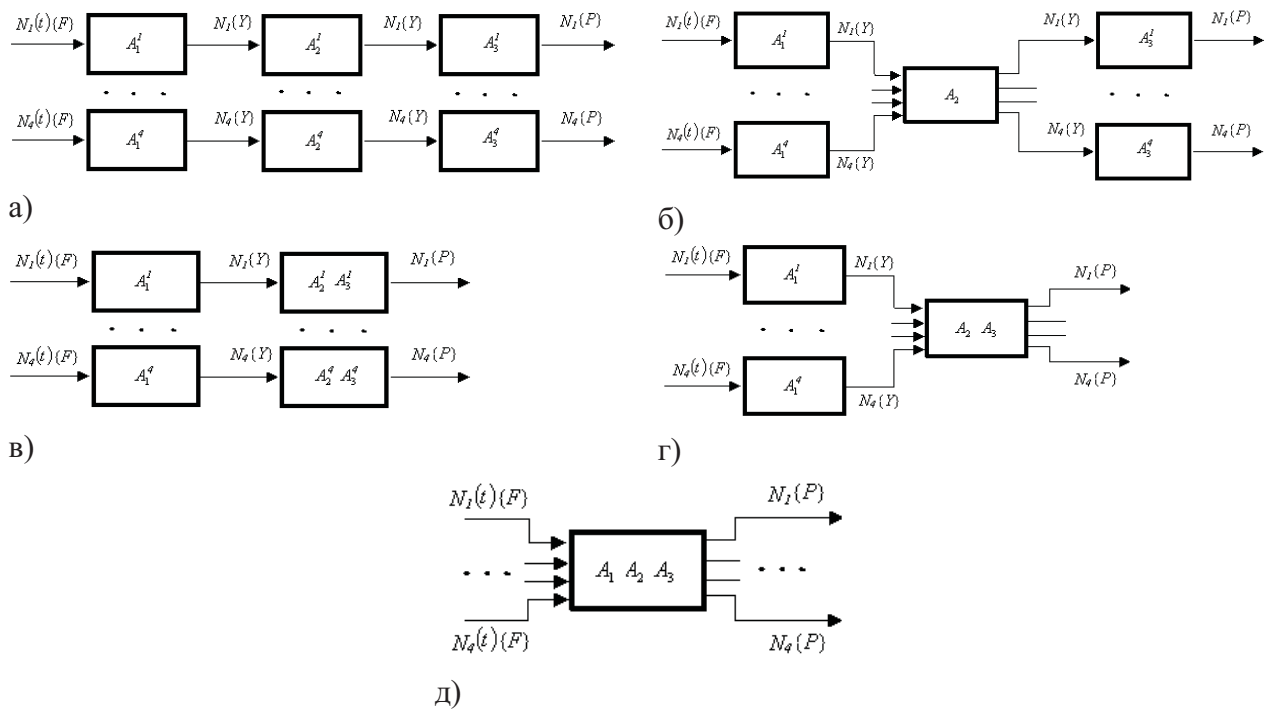


Рисунок 5 – Некоторые варианты синтезируемой измерительной системы

Вариант (а) соответствует первоначальному разбиению общего алгоритма функционирования системы на ЛА и их покрытие ЛС. Он содержит четыре независимых канала измерения и визуализации частотных сигналов. Каждый канал содержит следующие блоки: преобразователь частотного сигнала  $\{F\}$  в унитарный  $\{Y\}$ -код алгоритма  $A_1$ ; реверсивный счётчик импульсов  $\{Y\}$ -кода с преобразованием параллельного  $\{P\}$ -кода в унитарный  $\{Y\}$ -код, для реализации  $A_2$ ; двоично-десятичный счётчик с выводом числа в  $\{P\}$ -коде для последующего преобразования в десятичный код с целью визуализации измеряемого параметра (для реализации  $A_3$ ). Канал разделён на три части в соответствии с алгоритмами:  $A_1^i$ ,  $A_2^i$ ,  $A_3^i$ , поскольку они отличаются способами кодирования. В алгоритме  $A_1^i$  используется аналоговый ча-

стотный сигнал, в  $A_2^i$  – двоичный код, в  $A_3^i$  – десятичный код. Форма передачи промежуточной информации между локальными алгоритмами выбрана в виде унитарного двоичного  $\{Y\}$ -кода. Все последующие варианты показаны фрагментарно, и в них может применяться как двоичное кодирование, так и десятичный код  $\{P\}$ -код. Последний вариант (д) соответствует объединению всех ЛА  $A_1^i$ ,  $A_2^i$ ,  $A_3^i$  по всем каналам. Он характеризуется параллельным измерением частотного сигнала по всем каналам за короткие промежутки времени, для чего используется блок временного разделения импульсов от каждого датчика, один двоично-десятичный счётчик и четыре регистра. Накопленная в регистрах информация (за общее время измерения) преобразуется в десятичный код и визуализируется.

В другой работе этого направления [35] была рассмотрена задача оптимизации структурной организации программного обеспечения интерактивных средств 3D-систем геометрического моделирования, используемых для тренажеров и обучающих систем, средств автоматизированной настройки станков с ЧПУ и роботов. Проектирование сложного изделия осуществлялось универсальным методом путём генерации вариантов с помощью операций со структурами алгоритмов в соответствии с правилами, закладываемыми в базу знаний и последующим выбором оптимального по заданным критериям варианта.

### Заключение

Анализ современного состояния показывает, что, несмотря на обилие публикаций по отдельным направлениям синтеза ТЦ и ТП, теоретические исследования, объединяющие различные подходы в единую интеллектуальную технологию, достаточную для создания систем поддержки принятия научно-технических решений в приоритетных направлениях составляют их малую часть. Среди них выделяется так называемая «Общая формальная технология», которая создаёт теоретические предпосылки для полностью автоматического проектирования. Определённые перспективы связываются также с внедрением в САПР методов и технологий искусственного интеллекта. Внедрение указанных подходов позволит построить универсальные САПР, пригодные для различных ПрО. В этом случае ТП генерируется с помощью правил, хранящихся в базе знаний интеллектуальных систем при нечётких критериях.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-29-12839-офи\_м «Разработка моделей, методов и инструментальных средств для синтеза оптимизированных технологических цепочек и технологических процессов на основе интегрированных баз знаний и интеллектуальных технологий автоматической генерации и оценки планов».

### Список источников

- [1] Обзор современных систем автоматизированного проектирования. – URL: <http://bourabai.ru/graphics/dir.htm> (дата обращения 19.07.2016).
- [2] **Валов, А.В.** Методы автоматизированного проектирования электропривода. – Ч.1. / А.В. Валов, А.Е. Бычков // Учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 73 с.
- [3] **Назаренко, Г.И.** Основы теории медицинских технологических процессов. – Ч.1 / Г.И. Назаренко, Г.С. Осипов. – М.: Физматлит, 2005. – 144 с.
- [4] **Назаренко, Г.И.** Основы теории медицинских технологических процессов. – Ч.2. / Г.И. Назаренко, Г.С. Осипов. – М.: Физматлит, 2006. – 144 с.
- [5] **Осипов, Г.С.** Методы искусственного интеллекта / Г.С. Осипов. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.

- [6] **Partington, A.** Process Mining for Clinical Processes: a Comparative Analysis of Four Australian Hospitals / A. Partington, B. Valdivieso, V. Traver, J.M. Benedi // ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS) 5.4, 2015. – 19 p.
- [7] **Mans, R.S.** Healthcare Processes / R.S. Mans, W. van der Aalst, R.J.B. Vanwersch // Process Mining in Healthcare. – Springer International Publishing, 2015. – P. 11-15.
- [8] **Fernandez-Llatas, C.** Using Process Mining for Automatic Support of Clinical Pathways Design / C. Fernandez-Llatas, B. Valdivieso, V. Traver, J.M. Benedi // Data Mining in Clinical Medicine. – Springer New York, 2015. – P. 79-88.
- [9] **Малых, В.Л.** Управление и принятие решений в лечебно-диагностическом процессе / В.Л. Малых, Я.И. Гулиев, А.В. Еремин, С.В. Рудецкий // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014) (16-19 июня, 2014 г., Москва), 2014, с.6518-6528.
- [10] **Malykh, V.L.** Estimation of Accuracy of Recommended Diagnostic and Treatment Actions Based on Precedent Approach / V.L. Malykh, I.N. Kononenko, S.V. Rudetskiy // Proceedings of the International Conference e-Health 2016 (1-4 July 2016, Madeira, Portugal); 2016. – P. 52-58.
- [11] **Фролова, И.Н.** Анализ современных систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) / И.Н. Фролова, О.И. Кутилова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 1(80), Машиностроение и автоматизация, 2010, с.91-94. – URL: [http://www.nntu.ru/trudy/2010/01\\_91-94.pdf](http://www.nntu.ru/trudy/2010/01_91-94.pdf) (дата обращения 19.07.2016).
- [12] **Анисин, Д.А.** Автоматизация проектирования технологического процесса изготовления / Д.А. Анисин, И.В. Морозов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 51. – URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/a59/avtomatizatsiya-proektirovaniya-tekhnologicheskogo-protssessa.pdf>.
- [13] Методы автоматизированного проектирования ТП, 2011. – URL: <http://bittu.org.ru/umkd/sites/default/files/2.pdf> (дата обращения 19.07.2016).
- [14] **Аверченков, В.И.** Автоматизация проектирования технологических процессов / В.И. Аверченков, Ю.М. Казаков // Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Флинта, 2011. – 229 с.
- [15] **Носкова, Е.Е.** Автоматизированное проектирование средств и систем управления / Е.Е. Носкова, Д.В. Капулин, Ю.В. Краснобаев, С.В. Ченцов // Курс лекций. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 266 с.
- [16] **Лученков, В.В.** Автоматическое проектирование схем системы ЭЦ-12-03 с использованием типовых проектных решений / В.В. Лученков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 147-157.
- [17] **Андриченко, А.Н.** Тенденции и состояние в области управления справочными данными в машиностроении / А.Н. Андриченко // Онтология проектирования. – 2012. – №2(4). – С. 25-35.
- [18] **Куликов, Д.Д.** Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства / Часть 7. Системы проектирования технологических процессов / Д.Д. Куликов, Е.И. Яблочников, В.С. Бабанин // Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 136 с.
- [19] **Артамонов, Е.И.** Синтез структур специальных средств машинной графики / Е.И. Артамонов, В.М. Хачумов. – М.: Институт проблем управления, 1991. – 145 с.
- [20] **Артамонов, Е.И.** Интерактивные системы. Синтез структур / Е.И. Артамонов. – М.: Инсввязьиздат, 2010. – 185 с.
- [21] **Ковалев, А.** T-FLEX Технология 10 – ваша профессиональная система проектирования технологических процессов / А. Ковалев // САПР и графика. – 2006. – № 9. – URL: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=16671> (дата обращения 19.07.2016).
- [22] Allplan – BIM – CAD – BCM – FM Software. – URL: <https://www.allplan.com/> (дата обращения: 19.07.2016).
- [23] Das CADdy Forum. – URL: <http://www.caddy.de/> (дата обращения 19.07.2016).
- [24] SolidWorks Russia. – URL: <http://www.solidworks.ru/> (дата обращения 19.07.2016).
- [25] Система автоматизированного проектирования технологических процессов ВЕРТИКАЛЬ [Электронный ресурс]. – URL: <http://machinery.ascon.ru/software/developers/items/?prpid=420> (дата обращения 19.07.2016).
- [26] Комплекс автоматизации подготовки, планирования и управления производства «ТехноПро» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tehno.pro/> (дата обращения 19.07.2016).
- [27] Организация процесса автоматизированного проектирования | Архитектура интеллектуальных САПР. – URL: <http://3ys.ru/organizatsiya-protssessa-avtomatizirovannogo-proektirovaniya/arkhitektura-intellektualnykh-sapr.html> (дата обращения 19.07.2016).
- [28] **Романова, И.В.** Интеллектуальные подсистемы САПР / И.В. Романова // Конспект лекций. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 64 с.
- [29] **Семенов, В.С.** Системы автоматизации проектных работ / В.С. Семенов, В.П. Золотов // Курс лекций. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. – 134 с.
- [30] **Крылов, С.М.** Формальная технология и эволюция. – Самара: СамГТУ, 2012. – 324 с.

- [31] **Крылов, С.М.** Онтология метанауки. Аксиомы, технологии, алгоритмы, эволюция. – LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2012. – 404 с.
- [32] **Крылов, С.М.** Перспективы метаматематических структур в науке // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2013. – № 2(31). – С. 101-110.
- [33] **Крылов, С.М.** Метаматематические основы науки будущего: монография. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 247 с.
- [34] **Мальцев, А.И.** Алгебраические системы. – М.: Наука, 1970. – 392 с.
- [35] **Артамонов, Е.И.** Специализированные интерактивные системы в виртуальных производственных корпорациях / Е.И. Артамонов, А.В. Балабанов, С.Н. Григорьев, В.А. Ромакин // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 1. – С. 69-75.

## ANALYSIS OF SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL CHAINS AND PROCESSES DESIGNING

A.Yu. Agronik<sup>1</sup>, A.A. Talalaev<sup>2</sup>, V.P. Fralenko<sup>2</sup>, V.M. Khachumov<sup>3</sup>, O.G. Shishkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*KvadroSystems Ltd, Moscow, Russia  
aleksey@agronik.im*

<sup>2</sup>*Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Pereslavl-Zalessky, Russia  
alarmod85@hotmail.com*

<sup>3</sup>*Institute for Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
vmh48@mail.ru*

### Abstract

The current state of the problem of synthesis of technological chains and processes of the computer-aided systems for technological processes designing was reviewed. Some publications on the results of modern research were analyzed; features of modern system's program design were described. A classification of CAD for the technological processes of industrial and specific purpose was presented, taking into account new trends in medicine, as well as the classification methods, utilized in CAD. It is shown that the achieved level of modern theory does not allow us to create a universal synthesis technology that may be common to all subject areas. Prospects to solve the problem are associated with the construction of intelligent computer-aided design systems that implement the most common approach to synthesis, based on simulation and development activities, designed to support scientific, technical and technological solutions in the priority areas of science and technology. A general circuit of multilevel iterative synthesis process built on knowledge bases intended for storing precedents, select, configure, and options evaluating is presented. In case of absence of a suitable sample in the base, a direct synthesis of a new process is performed, using one of the possible formal approaches.

**Key words:** *computer-aided design, technology process, process chain, intelligent systems, process synthesis.*

**Citation:** *Agronik AYu, Talalaev AA, Fralenko VP, Khachumov VM, Shishkin OG. Analysis of systems for technological chains and processes designing [In Russian]. Ontology of designing. 2016; 6(21): 255-269. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-3-255-269.*

### References

- [1] Review of Modern Computer-aided Design Systems [In Russian]. Source: <http://bourabai.ru/graphics/dir.htm>.
- [2] *Valov AV, Bychkov AE. Methods of Computer-aided Design of Electric Drive [In Russian]. P.1. Uchebnoe posobie. – Chelyabinsk: South Ural State University Publishing Center; 2015.*
- [3] *Nazarenko GI, Osipov GS. Fundamentals of the Medical Processes Theory. P.1 [In Russian]. – Moscow: Fizmatlit; 2005.*
- [4] *Nazarenko GI, Osipov GS. Fundamentals of the Medical Processes Theory. P.2 [In Russian]. – Moscow: Fizmatlit; 2006.*
- [5] *Osipov GS. Methods of Artificial Intelligence [In Russian]. – Moscow: Fizmatlit; 2011.*
- [6] *Partington A, Valdivieso B, Traver V, Benedi JM. Process Mining for Clinical Processes: a Comparative Analysis of Four Australian Hospitals. ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS) 5.4; 2015.*

- [7] *Mans RS, Aalst van der W, Vanwersch RJB*. Healthcare Processes. Process Mining in Healthcare. Springer International Publishing; 2015. – P. 11-15.
- [8] *Fernandez-Llatas C, Valdivieso B, Traver V, Benedi JM*. Using Process Mining for Automatic Support of Clinical Pathways Design. Data Mining in Clinical Medicine. Springer New York; 2015. – P. 79-88.
- [9] *Malykh VL, Guliyev YaI, Eremin AV, Rudetskiy SV*. Management and Decision-making in Medical Diagnostic Process [In Russian]. Trudy XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija (VSPU-2014) (16-19 June 2014, Moscow); 2014. – P. 6518-6528.
- [10] *Malykh VL, Kononenko IN, Rudetskiy SV*. Estimation of Accuracy of Recommended Diagnostic and Treatment Actions Based on Precedent Approach. Proceedings of the International Conference e-Health 2016 (1-4 July 2016, Madeira, Portugal); 2016. – P. 52-58.
- [11] *Frolova IN, Kutilova OI*. The Analysis of Modern Systems of the Automation Design of Technological Processes [In Russian]. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. R.E. Alekseeva № 1(80), Mashinostroenie i avtomatizacija; 2010. – P. 91-94. Source: [http://www.nntu.ru/trudy/2010/01\\_/91-94.pdf](http://www.nntu.ru/trudy/2010/01_/91-94.pdf).
- [12] *Anisin DA, Morozov IV*. Design Automation of Technological Production Processes [In Russian]. Jelektronnyj zhurnal “Trudy MAI”; 2012; 51. Source: <http://www.mai.ru/upload/iblock/a59/avtomatizatsiya-proektirovaniya-tehnologičeskogo-protssesa.pdf>.
- [13] Methods of Computer-aided Design of TP [In Russian]; 2011. Source: <http://bittu.org.ru/umkd/sites/default/files/2.pdf>.
- [14] *Averchenkov VI, Kazakov JuM*. Design Automation of Technological Processes [In Russian]. Ucheb. posobie dlja vuzov. – 2-e izd., stereotip. – Moscow: Flinta; 2011.
- [15] *Noskova EE, Kapulin DV, Krasnobaev JuV, Chencov SV*. Computer-aided Design Tools and Control Systems [In Russian]. Kurs lekcij. – Krasnojarsk: IPK SFU; 2009.
- [16] *Luchenkov VV*. Automatic Design of ETs-12-03 System Schemes by Using Model Design Solutions [In Russian]. Proceedings of Petersburg Transport University; 2010; 3: 147-157.
- [17] *Andrichenko AN*. Tendencies and condition in the field of reference data management in the engineering industry [In Russian]. Ontology of designing. – 2012. – №2(4): 25-35.
- [18] *Kulikov DD, Jablochnikov EI, Babanin VS*. Intelligent Software Packages for Technical and Technological Preparation of Production. Part 7: System Engineering Processes [In Russian]. Textbook – St. Petersburg: SPbSU ITMO; 2011.
- [19] *Artamonov EI, Khachumov VM*. Synthesis of Structures of Special Means of Computer Graphics [In Russian]. – Moscow: Institute of Control Problems; 1991.
- [20] *Artamonov EI*. Interactive Systems. Synthesis of Structures [In Russian]. – Moscow: Insvjazizdat; 2010.
- [21] *Kovalev A*. T-FLEX Technology 10 – Your Professional System Design Processes [In Russian]. CAD and Graphics; 2006; 9. Source: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=16671>.
- [22] Allplan – BIM – CAD – BCM – FM Software. Source: <https://www.allplan.com/>.
- [23] Das CADdy Forum. Source: <http://www.caddy.de/>.
- [24] SolidWorks Russia [In Russian]. Source: <http://www.solidworks.ru/>.
- [25] Computer-aided Design of Technological Processes VERTICAL [In Russian]. Source: <http://machinery.ascon.ru/software/developers/items/?prpid=420>.
- [26] The Complex of “TekhnoPro” Company for Automation of Preparation, Planning and Management [In Russian]. Source: <http://www.tehnopro.com/>.
- [27] Organization of the Process of the Automated Designing | Architecture of Intelligent CAD [In Russian]. Source: <http://3ys.ru/organizatsiya-protssesa-avtomatizirovannogo-proektirovaniya/arkhitektura-intellektualnykh-sapr.html>.
- [28] *Romanova EV*. Intelligent CAD subsystems [In Russian]. Konspekt lekcij. – Omsk: Izd-vo OmGTU; 2008.
- [29] *Semenov VS, Zolotov VP*. Systems for the Automation of Design Work [In Russian]. Kurs lekcij. – Samara: Samara State Technical University; 2012.
- [30] *Krylov SM*. Formal Technology and Evolution. Ed. second, revised. and ext. [In Russian]. – Samara: Samara State Technical University; 2012.
- [31] *Krylov SM*. Ontology of Metascience. Axioms, Technology, Algorithms, 241 Evolutions [In Russian]. – LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland; 2012.
- [32] *Krylov SM*. Prospects of the Metamathematical Structures in Science [In Russian] // Bulletin of the Samara State Technical University. Physics and mathematics; 2013; 2: 101-110.
- [33] *Krylov SM*. Metamathematical Foundations of Science of the Future: a Monograph [In Russian]. – Samara: Samara State Technical University, 2014. – 247 c.
- [34] *Maltsev AI*. Algebraic Systems [In Russian]. – Moscow: Nauka, 1970. – 392 c.

[35] Artamonov EI, Balabanov AV, Grigoryev SN, Romakin VA. Specialized Interactive Systems in Virtual Manufacturing Corporations [In Russian]. Information Technology and Computer Systems; 2012; 1: 69-75.

## Сведения об авторах



**Агроник Алексей Юрьевич**, 1986 г. рождения. Окончил Московский государственный университет приборостроения и информатики в 2008 г. Инженер-исследователь ООО «Квадросистемс». Область научных интересов: автоматизация бизнес-процессов, повышение эффективности хранения и обработки данных, управление разработкой программного обеспечения, проектирование интерфейсов.

**Alexey Yurevich Agronik** (b. 1986) graduated from the Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science in 2008. Research engineer of “KvadroSystems”. Fields of research interest: automation of business processes, improving the efficiency of data storage and processing, software project management, interface designing.



**Талалаев Александр Анатольевич**, 1981 г. рождения. Окончил ЧОУ ВО «УГП имени А.К. Айламазяна» в 2006 г., к.т.н. (2013). Старший научный сотрудник Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: искусственный интеллект, машинная графика, высокопроизводительные вычисления.

**Alexander Anatolevich Talalaev** (b. 1981) graduated from the Ailamazyan Pereslavl University in 2006, PhD (2013). Senior Researcher of Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences. Fields of research interest: artificial intelligence, computer graphics, high performance computing.



**Фраленко Виталий Петрович**, 1985 г. рождения. Окончил ЧОУ ВО «УГП имени А.К. Айламазяна» в 2007 г., к.т.н. (2012). Старший научный сотрудник ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: искусственные нейронные сети, параллельные вычисления, защита компьютерных сетей, диагностика сложных технических систем, обработка изображений, графические интерфейсы.

**Vitaly Petrovich Fralenko** (b. 1985) graduated from the Ailamazyan Pereslavl University in 2006, PhD (2012). Senior Researcher of Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences. Fields of research interest: artificial neural networks, parallel computing, protection of computer networks, diagnostics of complex technical systems, image processing, graphical interfaces.



**Хачумов Вячеслав Михайлович**, 1948 г. рождения. Окончил Ленинградский кораблестроительный институт в 1971 г., д.т.н. (1997). Зав. лабораторией интеллектуального управления ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, зав. лабораторией методов интеллектуального управления ИСА ФИЦ ИУ РАН, профессор кафедры информационных технологий Российского университета дружбы народов, действительный член Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. В списке научных трудов более 200 работ в области искусственного интеллекта, машинной графики, вычислительной техники и управления.

**Vyacheslav Mikhailovich Khachumov** (b. 1948) graduated from the Leningrad Shipbuilding Institute in 1971, D. Sc. Eng. (1997). Head of the Laboratory of Intelligent control at Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, head of the Laboratory of Intelligent Control Methods at ISA FRC CSC RAS, professor at the People's Friendship University (Information Technologies sub-department), member of the Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics. He is co-author more than 200 papers in the field of artificial intelligence, computer graphics, computer science and management.



**Шишкин Олег Гарриевич**, 1988 г. рождения. Окончил ЧОУ ВО «УГП имени А.К. Айламазяна» в 2015 г. Аспирант ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: искусственные нейронные сети, диагностика сложных технических систем.

**Oleg Garrievich Shishkin** (b. 1988) graduated from the Ailamazyan Pereslavl University in 2015. Postgraduate at Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences. Fields of research interest: artificial neural networks, diagnosis of complex technical systems.