

УДК 658.5

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-50-63

Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 1

Г.Б. Евгеньев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Russian Technologies for Creation of Industry 4.0 Systems. Part 1

G.B. EvgenevBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: g.evgenev@mail.ru



В настоящее время в мире происходит четвертая промышленная революция, получившая название «Индустрия 4.0». Цель этой революции заключается в создании цифровых производств, призванных кардинально повысить эффективность и качество производства. Низкий уровень этих показателей является вызовом для нашего государства. Проведен системный анализ, и описаны отечественные системы, учитывающие российские стандарты и методы, используемые для построения цифровых производств в России. Рассмотрены облачные технологии, технологии интернета вещей, а также вертикальной и горизонтальной интеграции систем.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, цифровые производства, интеллектуальные системы, системы класса CAPP, системы CAM, системы MES



The fourth industrial revolution, named Industry 4.0, is taking place in the world now. The objective of this revolution is to create digital industries that would dramatically increase efficiency and quality of production, the current low level of which is a challenge for Russia. This work presents a system analysis and description of domestic systems based on Russian standards and methods used for constructing digital production in Russia. Cloud technologies, Internet of things as well as vertical and horizontal integration systems are examined.

Keywords: Industry 4.0, digital manufacturing, intelligent systems, CAPP, CAM, MES

В настоящее время в мире происходит четвертая промышленная революция (4ПР) [1–6]. В исследовании, посвященном этой теме [4], опубликована глобальная карта стран Америки, Европы и Азии, в которых ведутся работы по развитию 4ПР. России на этой карте нет.

Вместе с тем руководство нашей страны ставит задачу создания цифровой индустрии, основанной на знаниях. Правительством РФ утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Программой определены цели, задачи, направления и сроки реали-

зации основных мер государственной политики по созданию необходимых условий для развития в России цифровой экономики, где цифровые данные являются ключевым фактором производства.

Цель работы — рассмотрение российских технологий, необходимых для создания систем класса «Индустрия 4.0».

Для обозначения 4ПР используют термин «Индустрия 4.0», появившийся в Европе в 2011 г. на одной из промышленных выставок в Ганновере, когда правительство Германии заго-

ворило о необходимости более широкого применения информационных технологий в производстве. Суть 4ПР заключается в том, что материальный мир соединяется с виртуальным, в результате чего рождаются новые киберфизические комплексы, объединенные в одну цифровую экосистему.

Роботизированное производство и «умные» заводы — один из компонентов трансформированной отрасли. Четвертая промышленная революция означает все большую автоматизацию процессов и этапов производства: цифрового проектирования изделия, создания его виртуальной копии, совместной работы инженеров-конструкторов и технологов в едином цифровом пространстве, удаленной настройки оборудования на заводе под технические требования для выпуска спроектированного продукта, автоматический заказ необходимых компонентов в нужном количестве, контроль их поставки, мониторинг пути готового продукта от склада на фабрике до магазина и конечного клиента.

В работе [4] отмечены девять цифровых промышленных технологий, с помощью которых строятся системы класса «Индустрия 4.0»:

- 1) развитая робототехника;
- 2) аддитивные технологии;
- 3) дополненная реальность (AR) — среда с прямым или косвенным дополнением физического мира цифровыми данными в режиме реального времени с помощью компьютерных устройств;
- 4) моделирование;
- 5) горизонтальная и вертикальная интеграция;
- 6) промышленный интернет;
- 7) облачные технологии;
- 8) информационная безопасность;
- 9) большие данные и аналитика.

Описание шестой, восьмой и девятой технологий выходит далеко за рамки настоящей статьи, поэтому их рассматривать не будем.

Что касается облачных технологий, то они должны применяться на всех этапах создания систем класса «Индустрия 4.0». Диаграмма прецедентов использования облачных технологий при создании таких систем приведена на рис. 1.

Конечный пользователь, эксплуатирующий цифровое производство, применяет программные средства как услугу. В данной статье описаны программные средства автоматизации проектирования и программирования технологи-

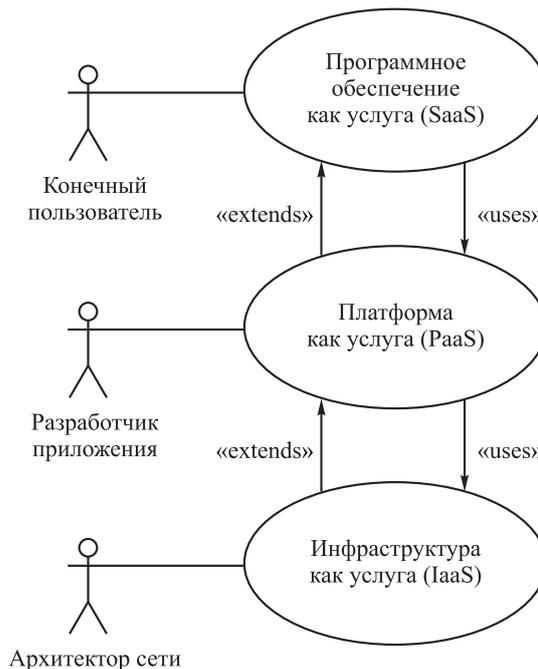


Рис. 1. Диаграмма прецедентов использования облачных технологий при создании систем класса «Индустрия 4.0»

ческих процессов (ТП), а также оперативного управления производством. Разработчик приложений для цифрового интеллектуального производства пользуется как услугой той или иной платформой для создания баз знаний. Здесь рассмотрены методы и средства построения баз знаний проектирования ТП. Архитектор цифрового производства (сети) использует концептуальную модель, в которой содержится инфраструктура этого производства.

К девяти перечисленным технологиям необходимо добавить еще одну — искусственный интеллект (ИИ), позволяющий непрограммирующим специалистам строить системы, автоматизирующие их деятельность, на основе неалгоритмических языков описания знаний, максимально приближенных к человеческим языкам деловой прозы. Примеры таких систем рассмотрены далее.

Создание систем класса «Индустрия 4.0» дает преимущества по четырем направлениям. Первое — повышение производительности путем сокращения штучного времени и лучшего управления производством. Второе — гибкость, обеспечиваемая широкими возможностями современных станков (обрабатывающих центров) и роботов с ЧПУ. Третье — высокое качество продукции за счет использования в реальном времени автоматизированных средств кон-

троля и измерений. Четвертое — сокращение сроков проектирования и производства благодаря интеграции систем.

В Германии сформулировано несколько основных принципов построения Индустрии 4.0, следуя которым компании могут внедрять сценарии 4ПР на своих предприятиях [4]. Первый — это совместимость, что означает способность машин, устройств, сенсоров и людей взаимодействовать и общаться через интернет вещей.

Второй принцип — прозрачность — появляется в результате такого взаимодействия. В виртуальном мире создается цифровая копия реальных объектов, систем функций, точно повторяющая все, что случается с ее физическим клоном. В итоге накапливается максимально полная информация обо всех процессах, которые происходят с оборудованием, «умными» продуктами, производством в целом и т. д. Для этого требуется обеспечить возможность сбора всех данных с сенсоров и датчиков и учета контекста, где они генерируются.

Третий принцип — техническая поддержка. Его суть состоит в том, что компьютерные системы помогают людям принимать решения благодаря сбору, анализу и визуализации указанной информации. Эта поддержка также может заключаться в полном замещении людей машинами при выполнении опасных или рутинных операций.

Четвертый принцип — децентрализация управленческих решений, делегирование не-

которых из них киберфизическим системам. Его идея заключается в том, чтобы автоматизация была настолько полной, насколько это вообще возможно. Везде, где машина способна эффективно работать без вмешательства людей, рано или поздно возникнет безлюдное производство. Сотрудникам при этом отводится роль контролеров, которые могут подключиться к управлению в экстренных и нестандартных ситуациях.

Рассмотрим применение перечисленных принципов на основе российских программных средств. Первый принцип связан с использованием интернета вещей (IoT — Internet of Things). На рис. 2 приведена общая схема IoT [4] в рамках проекта Industrie 4.0 (Германия).

На нижнем уровне производства расположены устройства, представляющие собой средства технологического оснащения: технологическое оборудование (в том числе контрольное и испытательное), технологическая оснастка (включая рабочие инструменты и средства контроля) и средства механизации и автоматизации ТП. В условиях 4ПР эти устройства, оснащенные ЧПУ, соединены средствами локальных проводных и беспроводных вычислительных сетей, в том числе с использованием облачных технологий. Для управления такими устройствами используются системы САМ (Computer-aided manufacturing), в частности отечественная система SprutCAM [7–9], входящая в пятерку лучших мировых систем такого класса.

В производственных условиях бизнес-процессы (см. рис. 2) делят на два подуровня: инженерный и организационный. Первый, заключающийся в проектировании ТП, базируется на применении систем САPP (Computer-Aided Process Planning). Второй, связанный с оперативно-календарным планированием, реализуется с помощью систем MES (Manufacturing Execution System). Планирование ТП в России регламентировано как по форме, так и по содержанию. Форма ТП определяется стандартами единой системы технологической документации, а содержание — документацией по нормированию ТП. Рассмотрим отечественные системы класса САPP (СПРУТ-ТП) и MES (СПРУТ-ОКП) [10].

Диаграмма использования интегрированной системы. На рис. 3 приведены диаграммы прецедентов управления предприятием и производством в рамках 4ПР, где в явном виде отоб-

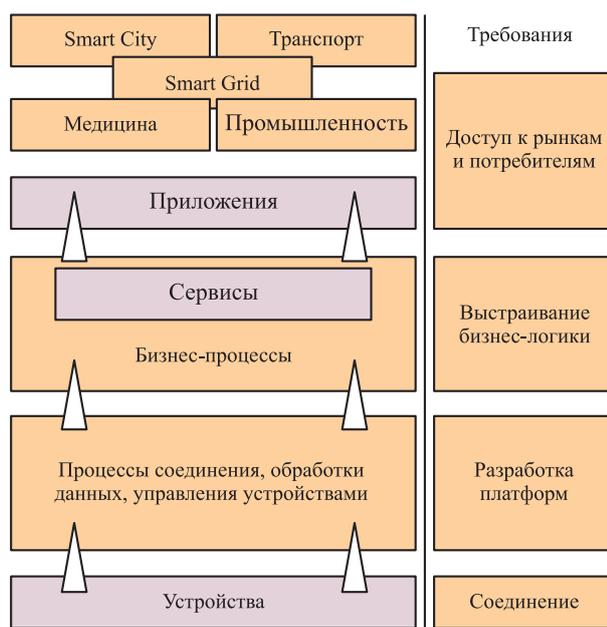


Рис. 2. Общая схема IoT в рамках Industrie 4.0

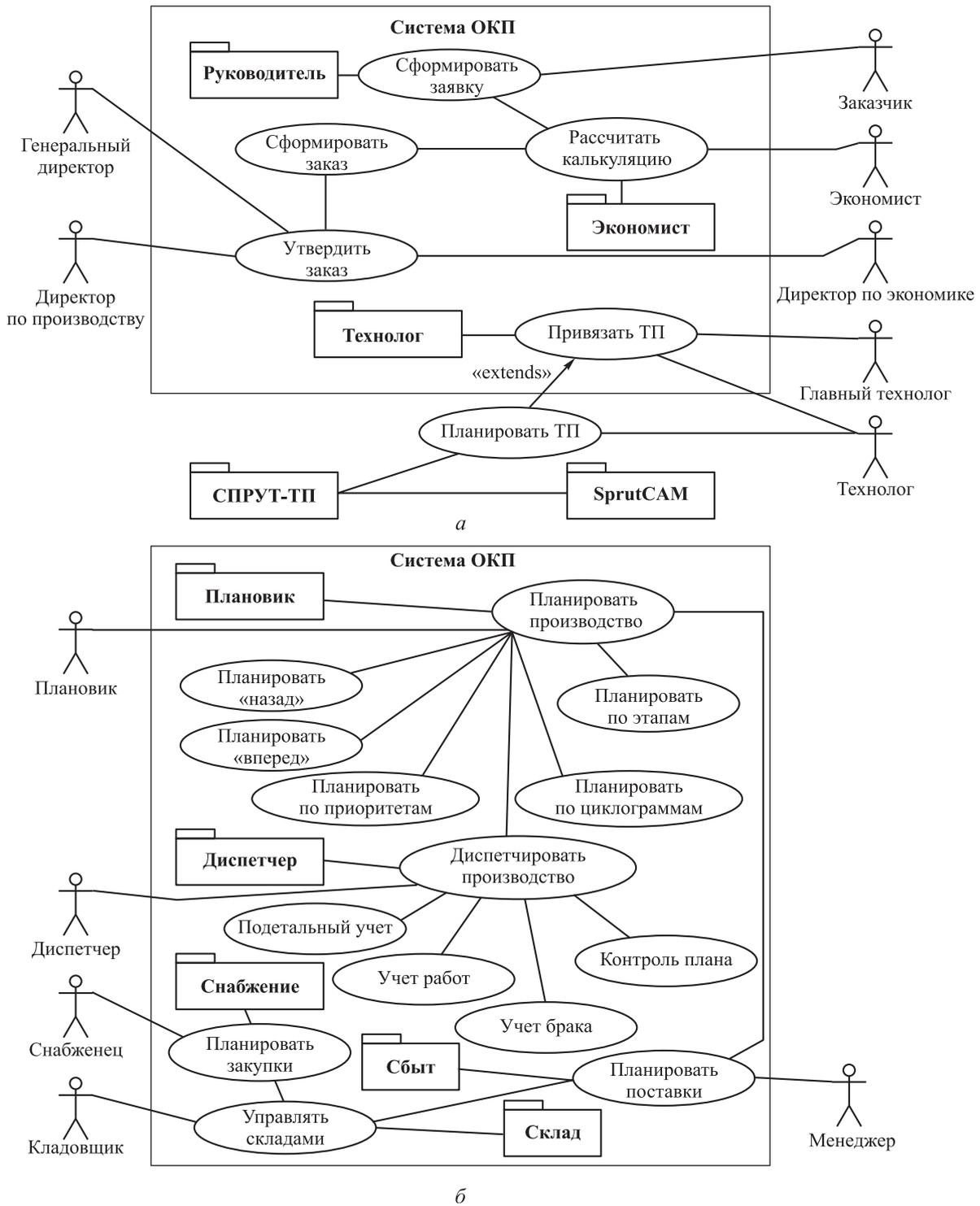


Рис. 3. Диаграммы прецедентов управления предприятием (а) и производством (б)

ражена технология горизонтальной и вертикальной интеграции.

Горизонтальная интеграция связана с программными средствами, поддерживающими различные этапы жизненного цикла изделий. Из их числа отмечены взаимосвязанные средства планирования (СПРУТ-ТП) и программи-

рования (SprutCAM) ТП (рис. 3, а), используемые технологами, а также средства оперативно-календарного планирования (ОКП).

Вертикальная интеграция связана с административными уровнями управления (от генерального директора до кладовщика). Первоначальный импульс для начала планирования

производства дает заказчик, которым может быть как частное, так и юридическое лицо, включая государственные органы. Используя подсистему «Руководитель», заказчик может сформировать заявку.

На ее основе экономист с помощью подсистемы «Экономист» рассчитывает калькуляцию, на основании которой формируется заказ. Подсистема предназначена для автоматизации учета и определения фактических затрат на производство. В этом модуле проводятся вычисления для оценки:

- трудовых и материальных затрат на изготовление продукции в подразделениях основного производства на дату расчета в течение месяца и за месяц,

- фактической себестоимости товарной продукции цеха за отчетный период,

- незавершенного производства,

- потерь от брака,

- косвенных расходов.

Вся информация передается в блок управления производственной системой.

Процедуру утверждения заказа проводит генеральный директор совместно с директорами по экономике и производству, используя подсистему «Руководитель».

На основе утвержденного заказа технологи осуществляют привязку процессов, разработанных в СПРУТ-ТП, к рабочим центрам производства. Для этого разработана подсистема «Технолог», с помощью которой описываются и заполняются справочники, формирующие виртуальную модель предприятия. Подсистема предназначена для автоматизации работ по поддержанию в актуальном состоянии данных производственного состава изделий и их сборочных единиц, а также для ввода технологических маршрутов изготовления предметов производства из системы СПРУТ-ТП.

Подсистема «Технолог» применима на предприятиях с разной организацией конструкторской подготовки производства: как с разработкой конструкторской документации на предприятии, так и с ее получением извне. При этом в рамках системы управления предприятием обеспечена комплексная автоматизация основных функций инженерного уровня, выполняющая две основные стратегические задачи: автоматизацию главных элементов конструкторско-технологической подготовки производства и поддержку в актуальном состоянии первичных конструкторско-технологических норма-

тивов для функционирования СПРУТ-ТП. Пользователи этой подсистемы получают информацию справочного характера.

На основе полученной информации в подсистеме «Плановик» (рис. 3, б) осуществляется планирование «назад», «вперед», по приоритетам, циклограммам и этапам. Планирование «назад» применяют при запуске изделий в производство под заказ (дата выпуска фиксируется, рассчитывается дата запуска), планирование «вперед» — для пополнения склада (дата запуска фиксируется, рассчитывается дата выпуска).

При планировании по циклограммам и этапам сроки запуска и выпуска устанавливаются директивно. В первом случае заказы создаются по введенным циклограммам с заданными интервалами изготовления, во втором планируется раздельное изготовление состава узлов и их сборки согласно директивным этапам.

Даты запуска и выпуска партий при планировании заказов с учетом загрузки оборудования вычисляют, принимая во внимание другие производственные заказы без перегрузки оборудования.

Для тонкой настройки планирования применяют методы последовательного и параллельно-последовательного движения операций, а также организацию труда с помощью альтернативных рабочих мест [11].

Функцию диспетчирования производства с формированием оперативных данных о его ходе осуществляет подсистема «Диспетчер». Эта подсистема может использоваться в заготовительных, обрабатывающих, сборочных цехах и цехах термообработки и покрытий машиностроительных предприятий с разным типом производства (от единичного до крупносерийного) в условиях цеховой и бесцеховой структуры управления. В цехах организовано движение материального потока в виде «сквозных» партий по всем операциям маршрута. В подсистеме проводится подетальный учет, учет работ и брака, а также контроль плана (см. рис. 3, б).

Системы класса «Индустрия 4.0» выходят за рамки одного предприятия, что обеспечивается подсистемами «Снабжение» и «Сбыт», позволяющими планировать соответственно закупки и поставки.

Подсистема «Склад», созданная для управления складами предприятия, выполняет функцию учета материальных ценностей, в результате чего генерируются данные об их движении, что, в частности, используется при пла-

нировании производства. Эта подсистема предназначена для автоматизации рабочих мест кладовщиков с одновременным удовлетворением потребностей всех остальных модулей СПРУТ-ОКП в информации о движении материальных ценностей на предприятии.

При создании модуля «Склад» преследовались две основные цели:

- обеспечить потребности остальных модулей достоверной информацией о движении материальных ценностей на предприятии;
- разработать основу для создания автоматизированных рабочих мест заведующих складами/материально ответственных лиц предприятия.

Эти цели определяют два режима эксплуатации подсистемы: совместный (с остальными модулями СПРУТ-ОКП) и автономный. Пользователями подсистемы являются кладовщики, в обязанности которых входит учет движения материальных ценностей. Предусмотрено обслуживание трех основных типов движения на складе: прихода (поступления на склад), расхода (выдачи со склада) и инвентаризации — актуализации системных данных о запасах по результатам их подсчета (взвешивания).

Для обработки прихода и расхода объектов допускается одновременное использование разных документов, определяемых пользователем при настройке и инсталляции системы. Например, для обработки прихода можно применять счет-фактуру, и/или приходный ордер, и/или бухгалтерскую справку и т. д. Документом считается форма экранной функции, выдаваемая в результате печати. Термин «документ» предназначен для описания как бездокументальной, так и ручной обработки складских движений.

Инвентаризация осуществляется на основе стандартного по виду документа — инвентаризационной ведомости, выдаваемой системой.

Интеллектуальная система планирования ТП.

Как уже отмечалось, помимо девяти технологий, предложенных специалистами Boston Consulting Group [4] для создания современных систем класса «Индустрия 4.0», необходимо также использовать технологию ИИ. Рассмотрим основные положения десятой технологии на примере автоматизации проектирования ТП.

Традиционное проектирование изделий включает в себя стадии, определенные стандартом. В их число входят эскизное, техническое и рабочее проектирование. Эскизный проект должен содержать принципиальные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия. Технический проект включает в себя окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации. В результате рабочего проектирования формируется документация, позволяющая изготавливать изделия в соответствии с техническими требованиями.

Фундаментом для построения интеллектуальных систем являются базы знаний [12–15]. При построении их структуры целесообразно воспользоваться многовековым опытом создания материальных изделий. На рис. 4 приведена пирамида знаний, соответствующая описанным ранее принципам конструирования изделий.

На верхнем уровне пирамиды размещена концептуальная модель цифрового интеллектуального производства, соответствующая эскизному проекту системы. На ее базе генерируется

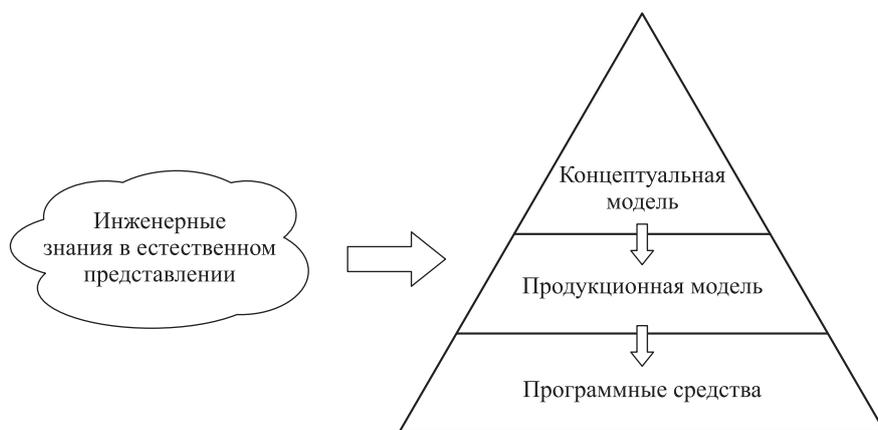


Рис. 4. Пирамида знаний

производственная модель, выполненная по техническому проекту. В основе пирамиды расположены программные средства, представляющие собой рабочий проект системы.

Преобразование знаний при переходе от одного уровня к другому обеспечивают соответствующие инструментальные средства. Для построения верхних уровней пирамиды используются инженерные знания, имеющиеся в книгах и методиках. При создании концептуальных моделей целесообразно применять методы и средства, утвержденные международными стандартами [12, 14, 15]. Для проектирования ТП наиболее подходит методология IDEF3, являющаяся стандартом описания ТП, которая определяет представление метамodelей структуры процессов и последовательности изменений свойств изготавливаемого изделия.

Средства документирования и моделирования IDEF3 позволяют решать следующие задачи:

- документировать знания о вариантах последовательности выполнения технологических операций и переходов изготовления изделий определенного класса для разработки баз знаний генерации структуры ТП обработки конкретной детали или сборки и сварки сборочной единицы;
- строить диаграммы состояния обрабатываемых изделий в процессе выполнения ТП.

Рассмотрим применение методологии IDEF3 на примере формирования метамodelи ТП обработки цилиндрических зубчатых колес (рис. 5, а). Первым функциональным элементом (УОВ) этой метамodelи является блок заготовительных операций, который целесообразно декомпозировать отдельно в виде дочерней модели (рис. 5, б).

Дочерняя модель начинается с перекрестка типа исключаящего ИЛИ. Такие перекрестки наиболее часто используют при формировании метамodelей ТП. Помимо формального идентификатора J6 этот перекресток имеет имя «Заготовка» и относится к типу разветвления (Fan-out Junction) стрелок. Каждая из отходящих от него стрелок имеет собственное имя: «литье», «штамповка» и «круг».

Таким образом, можно считать, что «Заготовка» является символьной переменной, принимающей одно из трех перечисленных значений, в зависимости от которых выполняются различные заготовительные операции. Если переменная принимает значение «литье», то осуществляется соответствующая литейная

операция. При выборе значения «штамповка» выполняется операция «Пило-отрезная», с помощью которой подготавливается заготовка для штамповки, и собственно операция «Штамповка». Если значением переменной «Заготовка» является «круг», то заготовка колеса отрезается от проката соответствующего профиля посредством операции «Фрезерно-отрезная». Во всех случаях заготовка колеса поступает на операцию «Отжиг» для улучшения обрабатываемости материала.

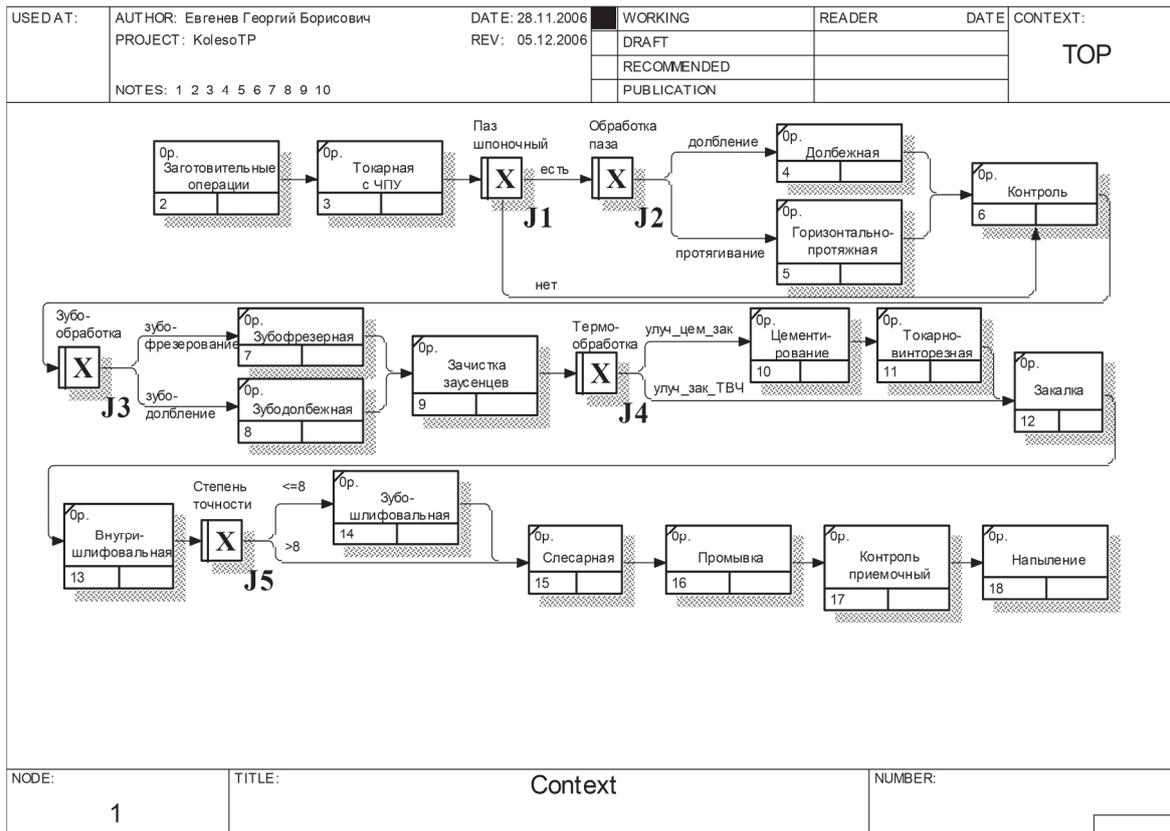
После заготовительных операций основные поверхности обода, диска и ступицы зубчатого колеса, включая осевое отверстие, подвергаются операции «Токарная с ЧПУ» (см. рис. 5, а).

В общем случае описанная метамodelь ТП представляет собой И/ИЛИ-граф. Связки типа И задают безусловную последовательность операций. В связках типа ИЛИ имеются перечисляемые переменные с фиксированным набором допустимых значений, влияющие на выбор одного из вариантов ТП.

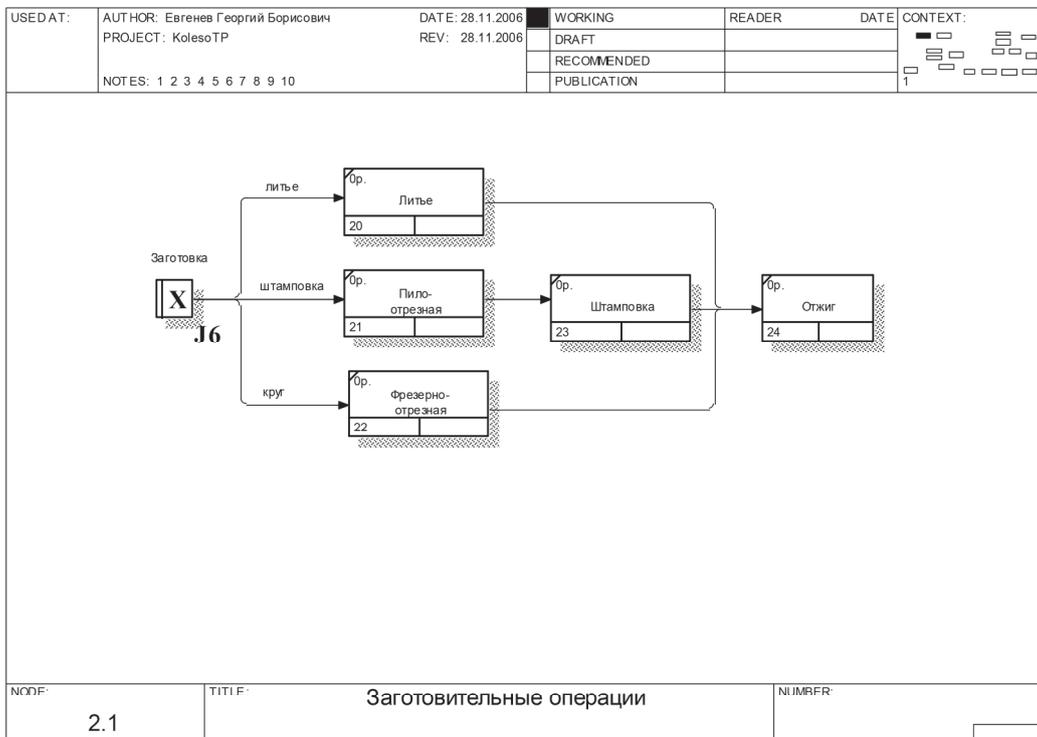
Эти переменные делятся на два класса: свободные и связанные. Значения первых может выбрать технолог, вторые определены конструкторской документацией. В описанной метамodelи ТП связанными переменными являются «Паз шпоночный», «Термообработка» и «Степень точности», а свободными — «Заготовка», «Обработка паза» и «Зубообработка».

Рассмотренные диаграммы процессов в стандарте IDEF3 представляют собой концептуальные модели знаний структурного синтеза ТП. Эти знания необходимо ввести в компьютер и обеспечить автоматическую генерацию маршрутных ТП в зависимости от значений свободных и связанных переменных.

Язык представления таких знаний должен быть максимально упрощен и доступен для непрограммирующих пользователей. Для технологов наиболее естественным является заполнение стандартной технологической документации, например маршрутных карт. По этой причине в системе СПРУТ-ТП для представления знаний о структуре операций ТП использованы модернизированные стандартные маршрутные карты. Чтобы получить возможность формировать диаграммы процессов в стандарте IDEF3, к числу стандартных технологических строк необходимо добавить строки, позволяющие задавать условия входимости операций в итоговый ТП и описывать логические связки типа исключаящего ИЛИ.



a



b

Рис. 5. Диаграммы ТП обработки цилиндрических зубчатых колес (а) и заготовительных операций для них (б)

ГОСТ 3.1118-82 форма 1

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-----|----|-------|----------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------|----|----|----|------|----|----|------|-----|------|--|
| ООО "Центр СПР" г.г. Москва, (426) 200-00-00, www.sprid.ru | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Директ. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Разработал | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Н.контроль | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| И | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| И | Код | ЕВ | ИД | ЕН | Н.разр. | КММ | Код загот. | Профиль и размеры | | КД | МЗ | | | | | | | | |
| | | кг | | | | | #Загот# | | | | | | | | | | | | |
| А | Цех | Уч. | РМ | Отпр. | Код. наименование операции | | С.М. | | Проф. | Р | УТ | КР | КОИД | ЕН | ОП | Кол. | Тиз | Тул. | |
| Б | Код. наименование оборудования | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Условие | #Загот# = "лите" | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 1000 | Литье | И 51024-7.5.3-15-2 | | | | | | | | | | | | |
| Кольцошлица | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Условие | #Загот# = "шляпозка" | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 4285 | Пило-отрезка | ИО ТЗТ-104.050-92 | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 2110 | Шляпозка | ИО ЗТ.104.52.182-84 | | | | | | | | | | | | |
| Кольцошлица | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Условие | #Загот# = "фуг" | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 4285 | Фрезерно-отрезка | ИО ТЗТ.104.050-91 | | | | | | | | | | | | |
| Кольцошлица | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 5010 | Отжиг | ИО ТЗТ.104.52.0562-8 | | | | | | | | | | | | |
| А | | | | | 4233 | Токарная с ЧПУ | ИО ТЗТ-104.0525-95 | | | | | | | | | | | | |
| Условие | #Разд# = "ест" | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| МК | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 6. Форма ввода диаграммы процесса обработки цилиндрических зубчатых колес

Для задания логических связей в форму маршрутной карты введены строки типа «Условие» и «Конец условия». Эти строки в совокупности с заключенными между ними стандартными технологическими строками представляют собой аналог производственного правила. Весь массив такой информации можно рассматривать как своеобразный аналог базы знаний производственного типа с упорядочением правил во времени.

На рис. 6 приведена форма ввода диаграммы процесса обработки цилиндрических зубчатых колес, соответствующая IDEF3-диаграмме, показанной на рис. 5, б.

Таким образом, в СПРУТ-ТП удалось совместить функции программного обеспечения как услуги (SaaS), поскольку конечный пользователь — технолог — проектирует конкретный ТП непосредственно в стандартной маршрутной карте, и платформы как услуги (PaaS), используемой разработчиком баз знаний структурного синтеза групповых ТП.

Однако помимо структурного синтеза при любом проектировании следует проводить параметрический синтез. Применительно к технологическому проектированию он состоит в нормировании, при котором определяются нормы штучного и подготовительно-заключительного времени.

Базы знаний при параметрическом синтезе, как правило, не связаны с параметром времени. Для представления концептуальных моделей целесообразно использовать стандарт IDEF0 [12, 14, 15].

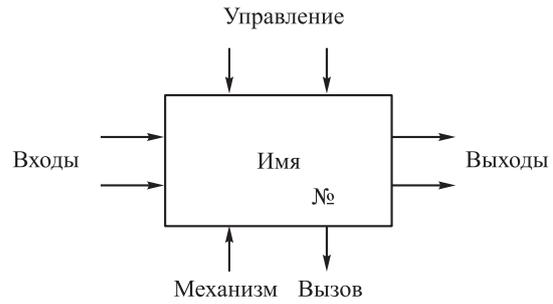


Рис. 7. Функциональный элемент IDEF0

На рис. 7 приведено внешнее представление объект-функции в стандарте IDEF0 — функциональный элемент IDEF0.

Функциональный элемент IDEF0 можно рассматривать как эквивалент производственного правила: управление определяет «Условие», а действие заключается в преобразовании входов в выходы с использованием блока «Механизм» или с помощью вызова соответствующего программного средства.

В экспертном программировании [12, 14, 15] производственное правило носит название модуля знаний (МЗ). Механизмы МЗ должны обеспечивать реализацию всех функций, которые могут потребоваться при формировании баз знаний. В их число входят следующие основные функции: расчет по формулам (в том числе присвоение значений переменным), определение значений по таблицам, выбор значений из баз данных, обновление этих значений и занесение в базы данных, вычисление значений с использованием подпрограмм и методов, сгенерированных из МЗ, нахождение значений

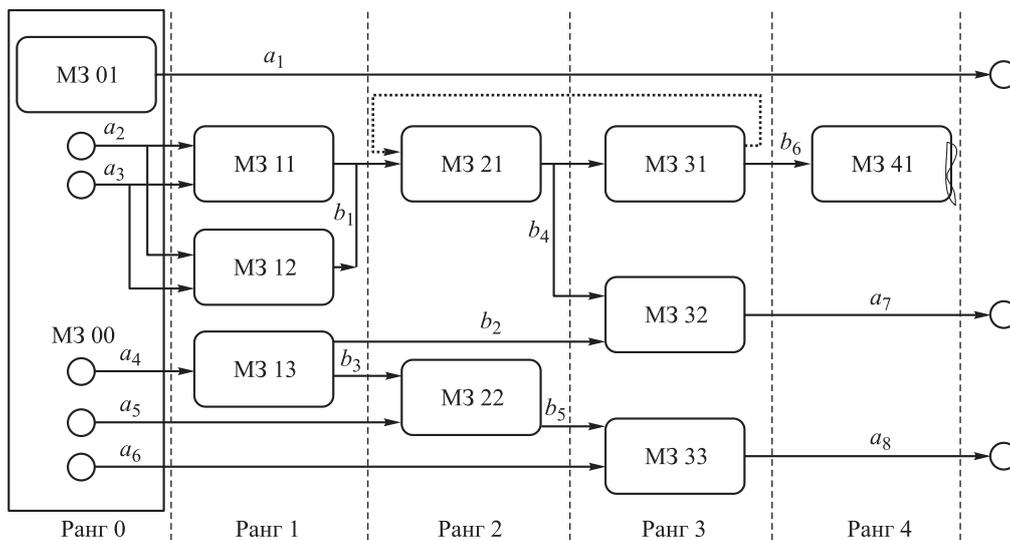


Рис. 8. Ранжированная семантическая сеть МЗ:

a_1-a_6 — входные переменные; a_7-a_8 — выходные переменные; b_1-b_6 — промежуточные переменные

с помощью исполняемых exe-модулей или dll-библиотек, сгенерированных другими системами. Для генерации 3D-моделей разработан соответствующий механизм [16].

Модули знаний, представляющие собой элементарные порождающие системы, объединяют в структурированные порождающие системы, носителями моделей которых они являются. Моделью структурированных порождающих систем с точки зрения ИИ служат семантические сети. Ранжированная семантическая сеть МЗ (рис. 8) — это ациклический ориентированный граф. Ацикличность необходима для выполнения семантической сетью ее функционального назначения — определения значений выходных переменных по заданным входным.

В экспертном программировании ранжированная семантическая сеть МЗ генерируется автоматически [12, 14, 15], что позволяет получить первый элемент базисного множества структурного программирования — последовательность. Второй элемент структурного программирования обеспечивается наличием предусловий МЗ, а третий элемент, связанный с генерацией циклов, — с помощью выделенной переменной FinCalc, при появлении которой строится цикл, гарантирующий повторное выполнение множества МЗ вплоть до изменения значения этой переменной.

С точки зрения стандарта IDEF0 ранжированная семантическая сеть МЗ реализует процесс, состоящий из операций, проводимых МЗ. Действия по преобразованию свойств информационной модели осуществляют механизмы МЗ.

МЗ можно рассматривать как фреймы. Таким образом, экспертное программирование интегрирует в себе все способы представления знаний.

Синергетическая система генерации знаний включает в себя следующие уровни знаний: математические, четкие и нечеткие [13–15]. Ядром для построения синергетической системы ИИ являются четкие знания классического ИИ. Математика, оперируя только числовой информацией, не содержит в явном виде семантику своих моделей. Одни и те же математические модели могут быть применены в самых разных прикладных областях.

В соответствии с трактовкой ИИ математические знания являются четкими, так как нечеткие знания строятся на базе лингвистических переменных. Для наполнения математических знаний семантикой над ними нужно надстроить систему четких знаний. При этом формальные

математические переменные, связанные с переменными словаря базы знаний, получают смысловое содержание. Чтобы оперировать понятиями нечетких знаний, им необходимо дать четкие описания. Фундаментом для построения четких знаний является словарь.

Словарь имеет имя и методы, обеспечивающие сортировку и поиск слов, а также их импорт из текстовых документов. Каждое из слов, содержащихся в словаре, обладает именем-идентификатором, общепринятым наименованием и типом (целым, действительным или символьным). Имеются методы добавления и удаления слов, а также определения входимости слов в МЗ. Со словами могут быть связаны ассоциативные списки допустимых значений, также имеющие имя-идентификатор, наименование списка и тип значений. С ассоциативными списками связаны методы добавления, удаления, сортировки и поиска списка. Списки состоят из элементов, каждый из которых должен иметь значение и может быть добавлен или удален.

На основе словаря строятся МЗ. Каждый МЗ имеет литературное наименование, имя-идентификатор, имя предусловия и версию. С МЗ связаны методы добавления, выбора модуля-аналога, трансляции и тестирования МЗ, определения входимости МЗ в базы знаний и другие модули, а также удаления МЗ.

У модуля есть свой словарь, представляющий собой подмножество терминов из словаря базы знаний и включающий в себя входные и выходные переменные. Кроме того, модуль может иметь предусловие, задающее область его определения и содержащее набор взаимосвязанных логических выражений.

МЗ может быть составным и включать в себя другие модули. Каждый из них обладает своим механизмом, с помощью которого входные переменные преобразуются в выходные. При проектировании изделий расчеты можно выполнять либо на основе инженерных методик, либо на базе математических моделей [14, 15]. В инженерных методиках задействованы формулы, таблицы и базы данных. Математические модели используют решения линейных, нелинейных и дифференциальных систем уравнений. Особую разновидность математических моделей формируют геометрические модели.

Высшим уровнем представления знаний являются нечеткие знания, которые могут формироваться с помощью средств четких знаний [14, 15].

МЗ: "VtTok" – Расчет скорости резания при токарной обработке Предусловия запуска

| имя | наименование | тип | условие |
|---------------------------|-------------------------|--------|---------------------------------|
| NaimPer\$ | Наименование перехода | STRING | Расточить |
| ElDet\$ | Элемент детали | STRING | отверстие осевое цилиндрическое |
| So | Подача на оборот, мм/об | REAL | (0,) |
| t_ | Глубина резания, мм | REAL | (0,) |

Входные свойства

| имя | наименование | тип | значение |
|--------------------|-------------------------|------|----------|
| uv | Показатель uv | REAL | 0.25 |
| Cv | Коэффициент Cv | REAL | 141 |
| t_ | Глубина резания, мм | REAL | 0.1 |
| So | Подача на оборот, мм/об | REAL | 0.03 |
| xv | Показатель xv | REAL | 0.15 |

Механизм - Формула

$$Vt = Cv / (t_^{xv} * So^{uv})$$

Выходные свойства

| имя | наименование | тип | значение |
|--------------------|---------------------------------|------|----------|
| Vt | Скорость резания базовая, м/мин | REAL | 77 |

Рис. 9. Внешнее представление МЗ расчета скорости резания при токарной обработке

На рис. 9 показано внешнее представление МЗ расчета скорости резания при токарной обработке. Этот модуль используют при нормировании расточки осевых цилиндрических отверстий. Вычисления проводят по формуле.

Выводы

1. Отмечено, что Россия обладает всеми девятью технологиями, необходимыми для свершения 4ПР.

2. Рассмотрены облачные технологии и технология вертикальной и горизонтальной интеграции систем. Приведены принципы построения Индустрии 4.0. Показано их применение на основе российских программных средств.

3. Описана технология искусственного интеллекта, которая, по мнению автора, очень важна для дальнейшего развития систем в период 4ПР. Системы, созданные на основе этой технологии, могли бы получить название «Индустрия 4.1».

Литература

- [1] The Future is Smart – Image Processing is an Important Component of Industry 4.0. URL: <https://www.baslerweb.com/en/news-press/news/the-future-is-smart-image-processing-is-an-important-component-of-industry-40/9740/> (дата обращения 15 марта 2018).
- [2] *Industrial IoT platform Nerve*. URL: <https://www.tttech.com/products/industrial/industrial-iot/fog-computing-nerve/> (дата обращения 15 марта 2018).
- [3] Industrie 4.0: The hour of implementation has arrived. URL: <https://www.siemens.com/press/en/events/2017/processindustries-drives/2017-11-sps.php> (дата обращения 15 марта 2017).
- [4] Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth. URL: <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx> (дата обращения 03 января 2017).
- [5] *Industry 4.0: the fourth industrial revolution – guide to Industrie 4.0*. URL: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0> (дата обращения 28 декабря 2017).

- [6] *Цифровая Индустрия 4.0*. URL: <http://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu> (дата обращения 29 декабря 2017).
- [7] Евгеньев Г.Б., Частухин М.В. Интеграция систем проектирования и программирования технологических процессов обработки. *Инженерный вестник*, 2015, № 10, с. 507–513. URL: <http://engsi.ru/doc/816454.html> (дата обращения 10 марта 2018).
- [8] Частухин А.В., Романов Н.А. SprutCAM — расширение технических возможностей. *РИТМ Машиностроения*, 2016, № 3, с. 22–23.
- [9] СПРУТ-Технология. URL: <https://www.sprut.ru/> (дата обращения 15 января 2018).
- [10] Центр СПРУТ. СПРУТ Технология. URL: <https://www.csprut.ru> (дата обращения 15 января 2018).
- [11] Крюков С.С., Рубахина В.И. Уровни планирования производства. *РИТМ Машиностроения*, 2016, № 4, с. 63–64.
- [12] Евгеньев Г.Б. *Интеллектуальные системы проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 420 с.
- [13] Евгеньев Г.Б. Синергетическая методология интеграции знаний. *Информационные технологии*, 2011, № 1, с. 15–23.
- [14] Евгеньев Г.Б., ред. *Основы автоматизации технологических процессов и производств. Т. 1: Информационные модели*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 441 с.
- [15] Евгеньев Г.Б., ред. *Основы автоматизации технологических процессов и производств. Т. 2: Методы проектирования и управления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 479 с.
- [16] Евгеньев Г.Б., Кокорев А.А., Пиримяшкин М.В. Интеллектуальные системы полуавтоматического проектирования и быстрого прототипирования изделий машиностроения. *Евразийский Союз Ученых*, 2015, № 9(18), с. 19–25.

References

- [1] The Future is Smart – Image Processing is an Important Component of Industry 4.0. Available at: <https://www.baslerweb.com/en/news-press/news/the-future-is-smart-image-processing-is-an-important-component-of-industry-40/9740/> (accessed 15 March 2018)
- [2] *Industrial IoT platform Nerve*. Available at: <https://www.tttech.com/products/industrial/industrial-iot/fog-computing-nerve/> (accessed 15 March 2018).
- [3] *Industrie 4.0: The hour of implementation has arrived*. Available at: <https://www.siemens.com/press/en/events/2017/processindustries-drives/2017-11-sps.php> (accessed 15 December 2017).
- [4] Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth. URL: <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx> (accessed 3 January 2017).
- [5] *Industry 4.0: the fourth industrial revolution – guide to Industrie 4.0*. Available at: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0> (accessed 28 December 2017).
- [6] *Tsifrovaia Industriia 4.0 [Digital Industry 4.0]*. Available at: <http://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu> (accessed 29 December 2017).
- [7] Evgenev G.B., Chastukhin M.V. Integratsiia sistem proektirovaniia i programmirovaniia tekhnologicheskikh protsessov obrabotki [Integration of processing process design and programming systems]. *Inzhenernyi vestnik [Engineering bulletin]*. 2015, no. 10, pp. 507–513. Available at: <http://engsi.ru/doc/816454.html> (accessed 10 March 2018).
- [8] Chastukhin A.V., Romanov N.A. Sprut CAM – rasshirenie tekhnicheskikh vozmozhnostei [SprutCAM – expansion of technical capabilities]. *РИТМ Mashinostroeniia [Rhythm of machinery]*. 2016, no. 3, pp. 22–23.
- [9] *SPRUT Tekhnologiia*. Available at: <https://www.sprut.ru/> (accessed 15 January 2018).
- [10] *Tsentr SPRUT. SPRUT Tekhnologiia [Center is the SPRUT. SPRUT Technology]*. Available at: <https://www.csprut.ru> (accessed 15 January 2018).
- [11] Kriukov S.S., Rubakhina V.I. Urovni planirovaniia proizvodstva [Levels of production planning]. *РИТМ Mashinostroeniia [Rhythm of machinery]*. 2016, no. 4, pp. 63–64.
- [12] Evgenev G.B. *Intellektual'nye sistemy proektirovaniia [Intelligent systems design]*. Moscow, Bauman Press, 2012. 420 p.

- [13] Evgenev G.B. Sinergeticheskaia metodologiya integratsii znaniy [Synergetic methodology of knowledge integration]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2011, no. 1, pp. 15–23.
- [14] *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv. T. 1: Informatsionnye modeli* [Fundamentals of automation of technological processes and productions. Vol. 1: Information models]. Ed. Evgenev G.B. Moscow, Bauman Press, 2015. 441 p.
- [15] *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv. T. 2: Metody proektirovaniia i upravleniia* [Fundamentals of automation of technological processes and productions. Vol. 2: Methods of design and management]. Ed. Evgenev G.B. Moscow, Bauman Press, 2015. 479 p.
- [16] Evgenev G.B., Kokorev A.A., Pirimiashkin M.V. Intellektual'nye sistemy poluavtomaticheskogo proektirovaniia i bystrogo prototipirovaniia izdelii mashinostroeniia [Intelligent systems for semi-automatic design and rapid prototyping of mechanical engineering products]. *Evrasiiskii Soiuz Uchenykh* [Eurasian union of scientists]. 2015, no. 9(18), pp. 19–25.

Статья поступила в редакцию 19.04.2017

Информация об авторе

ЕВГЕНЕВ Георгий Борисович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: g.evgenev@mail.ru).

Information about the author

EVGENEV Georgiy Borisovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Computer Systems for Industrial Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: g.evgenev@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Евгенов Г.Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 1. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 50–63, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-50-63.

Please cite this article in English as:

Evgenev G.B. Russian Technologies for Creation of Industry 4.0 Systems. Part 1. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 8, pp. 50–63, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-50-63.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
Ю.В. Никифорова, А.А. Казаковой, М.Б. Алехиной
**«Диффузия и адсорбция газов и паров
в инженерных задачах»**

Изложены теоретические основы мембранных и адсорбционных технологий и даны примеры расчета соответствующих процессов и аппаратов. Для специалистов в области очистки и разделения газовых смесей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru