

# Инжиниринг и «Индустрия 4.0».

## Разбор терминологии

Алексей ТРОШИН,  
к. ф.-м. н.  
Максим ПИСКАЙКИН  
info@mosep.ru

Стимулом для написания этой статьи стало общение с участниками рынка и журналистами «Форбс» и «Эксперт». Если для первой категории характерна некоторая путаница в терминологии, то для деловой прессы типичным явлением оказалось непонимание целостной системы — отсюда появление множества ошибок и нестыковок, включение в концепцию «Индустрии 4.0» технологических и цифровых решений, которые либо не являются составной частью самой концепции, либо уже устарели. Поэтому статья делится на две части: в первой максимально просто описаны основы инжиниринговой деятельности с привязкой к отраслевой специфике, во второй предложено толкование терминов, часто смешивающихся даже в профессиональной среде.

### Введение в инжиниринг

Что подразумевается под понятием «инжиниринг»? Как правило, разработка нового продукта. Возьмем всем знакомый айфон, многие считают его технологическим прорывом, но это не совсем так. Большинство заложенных технологий уже существовали: Интернет и протоколы TCP/IP, DNS, GPS, сенсорный экран, службы распознавания голоса, поисковые алгоритмы на стадии фундаментальных разработок — все они финансировались государством, чаще всего военными и разведывательными ведомствами. Большинство знает, что Интернет появился благодаря DARPA — исследовательскому подразделению Минобороны США, но мало кому известно, что разработку всем привычного сенсорного экрана финансировало в основном ЦРУ. Умоляет это заслуги Стива Джобса? Ни в коем случае. Объединить все компоненты и предложить рынку продукт, который стал необходимым элементом современной жизни, — это и есть искусство инжиниринга, это понимание потребностей, порой даже еще не определенных самим потребителем, и, конечно, это уже коммерческий продукт с высокой добавленной стоимостью. Поскольку только принципиально новый продукт фактически

не имеет ограничений в конкурентном ценообразовании. С технологической точки зрения Джобс не сделал почти ничего, с инжиниринговой — он гений.

Насколько опыт Джобса уникален? По оценкам 2014 года, в Интернете было доступно 114 млн научных публикаций на английском языке (хотя лишь около четверти из них имеют открытый доступ), к 2018-му одна платформа Web of Science за два года своего существования объединила более 100 млн публикаций из 33 000 научно-технических изданий. Сегодня нам доступен такой объем информации, который и не снился Джобсу. У нас появились цифровые среды для разработки и контрактные производители: нам не надо больше паять в гараже собственные платы, как это делал Джобс. У нас есть аддитивные технологии, те самые 3D-принтеры, которые позволяют сделать прототип или напечатать деталь. Все это дорого и недоступно? Нет, у нас есть центры коллективного пользования, где можно получить доступ к дорожному оборудованию, у нас работают облачные платформы, которые позволяют не покупать дорогие лицензии на специализированный софт. Поэтому с полной уверенностью можно сказать, что сейчас существуют гораздо более развитые условия для инжинирингового творчества, чем у Джобса.



Мы разобрались в продуктовой ветви инжиниринга, но она далеко не единственная. Следующий, более сложный уровень — промышленный инжиниринг, в общем случае он подразумевает проектирование и создание заводов, производственных цехов, всей промышленной инфраструктуры. Казалось бы, что сложного: стенки поставил, оборудование подключил — и все ОК, выпускай свой айфон. Но, к сожалению, так заводы строились в XIX веке, сейчас все усложнилось. Чем сложнее продукция, тем сложнее технологии ее изготовления, и, как правило, это коррелируется и с организацией производства. В России устоявшийся формат инжиниринга пришел из советской системы. Огромные НИИ и КБ, проектные институты, отраслевые министерства, ответственный за строительство Госстрой составляли своеобразную инжиниринговую пирамиду, каждый сегмент которой отвечал за свой маленький объем работ. Система не была идеальной, но она работала вплоть до начала трансформации в сторону рыночных механизмов, совпавших с развалом СССР, результатом которого для промышленности стал распад годами действовавших цепочек поставок. Для проектных институтов итогом краха Союза стало разрушение всей пирамиды управления с распределенными по территории фактически всех 15 республик проектными мощностями, еще и привязанными к отраслевой специфике. Спрос на модернизацию промышленности оказался слабым, и даже там, где он возникал, ответить на него смогли те немногие проектные институты, сумевшие консолидировать все направления профильной деятельности внутри собственных структур. И даже этого оказалось мало: рынок просто заменил спрос на отечественные товары тотальным импортом. В итоге вплоть до 2000-х годов проектирование оставалось за пределами происходящих в экономике процессов: проектировать было просто нечего.

Период начавшегося в 1970-х кризиса советской школы промышленного строительства совпал с идущей во всем мире полупроводниковой революцией, точнее с одним из ее эффектов, известных как эмпирический закон Мура: «количество транзисторов, размещаемых на кристалле микросхемы, удваивается каждые 24 месяца». Миниатюризация привела к появлению специфических требований к организации производств микроэлектроники, но ориентированная на типовые проекты система советского промстроительства слишком долго отвечала на новые технологические вызовы. Впрочем, он и вызовом-то не казался, для нацеленной на военное производство промышленности размер компонентов не представлял особого значения. Катастрофической ошибкой отраслевого руководства оказался и курс на реверсивный инжиниринг западных аналогов с последующим отказом от собственных НИОКР по критически важным направлениям развития полупроводниковых элементов. В итоге с переходом на рыночную экономику вся компьютерная техника и комплектующие в Россию импортировались, и это отставание мы с тех пор не преодолели. Другим итогом стал кризис самого производства отечественной микроэлектроники: не освоив передовые техпроцессы, она не смогла конкурировать с иностранными производителями и упустила огромный рынок компьютерной техники, а затем и мобильных устройств.

Полупроводниковое производство — самое сложное по организации. Почему? Чем меньше нанометров в процессоре, тем в более рафинированных условиях он производится. Среди этих условий: отсутствие статического электричества, магнитных полей, стабильная температура и влажность на всех производственных участках и чистые помещения, где создается атмосфера, в которой фактически отсутствуют сторонние примеси. Навысший класс чистоты, допускающий концентрацию в 1 м<sup>3</sup> воздуха до 10 частиц размером 0,1 мкм (толщина человеческого волоса 40–120 мкм), характерна именно для полупроводникового производства. Для сравнения: в самых требовательных к чистоте хирургических помещениях уровень чистоты не превышает среднего класса чистоты, свойственного микроэлектронике. Все полупроводниковое производство стоит на физических процессах и химических реакциях: чтобы они проходили корректно, нужно к оборудованию подводить процессные газы и жидкие среды, порой

несколько десятков к одной установке. При этом количество реагентов чаще всего должно быть строго дозированным, вариант «просто подключить условный шланг к установке и заполнить его до краев требуемой химией» здесь и близко не рассматривается. Многие из реагентов ядовитые и взрывоопасные, и их нужно утилизировать. В результате инженерная инфраструктура на таких производствах зачастую кратно превышает само производство. Сюда еще нужно добавить высочайший уровень автоматизации и роботизации.

Выше мы рассмотрели различия между продуктовым и промышленным инжинирингом: первый отвечает за разработку нового продукта, второй — за появление заводов и целых отраслей, которые эти продукты будут выпускать. Развитие технологий привело к увеличению сложности промышленных объектов, что в свою очередь стало стимулом для развития мирового проминжиниринга в сторону охвата все больших видов работ и реализации требований промышленности не только выполнять часть проектных работ, но и управлять всем ходом реализации инвестиционного проекта. Итогом все более увеличивающейся нагрузки на инжиниринг стало развитие его комплексных форматов, объединяющих несколько видов работ (ЕРС-контрактинг закрепляет схему работы, где один подрядчик осуществляет проектные работы, поставки оборудования и строительство) либо обязывающих подрядчика осуществлять управленческие функции (ЕРСМ-контрактинг). Почему так произошло? Чем сложнее проект, тем больше в нем участников, чем выше уровень его технологичности, тем больше вероятность мелких ошибок, приводящих в итоге к достаточно крупным проблемам. В общем случае, запуская технологически сложный проект, его инициатор должен учитывать, что среди участников будут владелец технологии и технологический брокер, проектная организация (их может быть две-три по различным разделам проектной документации, тогда добавляется генпроектировщик), поставщики оборудования, поставщики стройматериалов, генподрядчик, ряд строительных подрядчиков по специфическим видам работ (строительство чистых помещений, организация инженерной инфраструктуры и пр.), ряд поставщиков ПО, системный интегратор. Комплексные модели позволяют объединять определенные виды работ, но в России форматы ЕРС/ЕРСМ, контракты жизненного цикла (КЖЦ) только недавно стали применять в проектировании объектов в госсекторе, который сегодня и является инициатором основной массы инвестиционных проектов.

Тем не менее профессиональная ответственность или ориентация на экспорт инжиниринговых услуг (в России это инжиниринг в энергетическом и нефтегазовом секторе) дали определенный импульс развитию отечественных комплексных направлений еще с 2010-х. Например, в Национальной инжиниринговой корпорации актуальны три основных вида деятельности: инжиниринговая, связанная с проектированием сложных промышленных объектов и управлением ходом реализации проектов; технологическая, относящаяся к развитию и трансферу технологий; цифровая, в которой главное внимание уделяется цифровизации производственных процессов, внедрению новейших решений на базе искусственного интеллекта, промышленного «Интернета вещей», цифровых двойников и пр. Расширение компетенций — основной источник для развития комплексных форматов, но особую роль для инжиниринговых компаний играет технологическая составляющая.

Как известно, далеко не все технологии нам доступны, не только по политическим, но и по сугубо коммерческим причинам. В R&D, то есть в исследованиях и разработке, сейчас инвестируют огромные средства, и компания должна окупить результаты своей исследовательской работы, поэтому новейшие технологии редко доступны рынку. Сегодня затраты только на один техпроцесс среди нескольких десятков других, пытающихся решить одну и ту же проблему увеличения производительности микроэлектроники, могут перекрывать бюджеты на НИОКР достаточно развитых в технологическом плане стран. Причем технологическая модернизация производства, помимо прямых затрат на реализацию трансфера как такового, это еще три взаимоувязанных, достаточно затратных и долгосрочных процесса:



закупка и установка оборудования, модернизация инженерной инфраструктуры и реконструкция производственных площадок. Что делать, если мы хотим выпускать продукцию, но не имеем технологии ее изготовления? Здесь мы попадаем в очень сложную область, которая называется «трансфер технологий». На первый взгляд все просто: трансфер — это перенос, нам нужно из одного места перенести технологию на наш завод. Не акцентируясь на самом процессе, мы должны сначала провести технологический аудит на заводе, определить наиболее перспективную технологию, учесть логистику и стоимость сырья и комплектующих по всем цепочкам поставок, найти наиболее актуальные техпроцессы и попытаться договориться с разработчиками или как минимум с производителями оборудования. Далее, учитывая стоимость оборудования, нужно подсчитать, во что обойдется модернизация предприятия, так как новое оборудование почти наверняка предполагает изменения по меньшей мере в инженерных коммуникациях. После этих операций мы зачастую приходим к тому, с чего начинали, но уже с полной уверенностью, что лучшую технологию нам получить не удастся. Что делать, опустить руки? К счастью, нет такого термина в инжиниринге. Начинается поиск форсайтов и дорожных карт по развитию технологии, тех научных коллективов и ученых, которые работали в нужном нам технологическом направлении и способны предложить доступную альтернативу. Например, спускаемся на ступень ниже той технологии, которая сегодня наиболее актуальна, то есть берем за основу не ее, а предыдущее поколение. Строим новейший исследовательский центр и затем запускаем завод на том же оборудовании, что и R&D-центр: завод изготавливает продукцию, ученые совершенствуют техпроцессы. Почему на том же оборудовании? Это обеспечит повторяемость техпроцесса и быструю перенастройку технологических линий на производстве. На этих принципах в стране появилось производство солнечных панелей, полный цикл выпуска оптоволокна и ряд сугубо технологических направлений, компетенций в которых до этого в стране не было.

Теперь мы вплотную подошли к современности. Конечно, у всех на слуху цифровизация. И это неслучайно, именно она подтолкнула новую промышленную революцию, в центре которой мы сейчас находимся. Почему в центре? Потому что в мировой промышленности полным ходом идет преобразование, связанные с целым пластом уже всем доступных цифровых решений, но мы еще не подошли к предельной точке этих изменений, которая носит название концепции «Индустрия 4.0». Думаю, все эти решения на слуху, хотя иногда возникает определенная путаница, поскольку развиваются они просто невероятными темпами: промышленный «Интернет вещей», облачное хранение данных — сегмент обмена данными, иногда и 5G сюда относят, но эта технология в большей степени ориентирована на человека; проблема интерфейсов решена с помощью искусственного интеллекта, если точнее, то нейросетей. Следующий эшелон: сенсорные системы — это система датчиков, которые снимают нужные для машины показатели окружающей среды, грубо говоря, через нее машина «чувствует». Цифровые двойники в совокупности с автоматизированными и роботизированными комплексами обеспечивают производственную цифровую инфраструктуру. Обработку и анализ данных реализует искусственный интеллект, предиктивная анали-

тика, Big Data, которая уже трансформировалась в целый класс аналитических систем, например Data Mining, способный осуществить поиск неучтенной информации и контекстов. Все эти компоненты уже внедряются и показывают превосходные результаты, но все-таки они еще далеки от того образа промышленности, который строит «Индустрия 4.0».

Несколько примеров: один из голландских заводов Philips работает в неосвещенном помещении, где установлено 128 роботов. Весь персонал завода состоит из девяти работников. Классическим примером стала цифровизация производственных площадок Harley Davidson, проведенная еще в 2009–11 гг. Основной проблемой, была возросшая конкуренция при ограниченной возможности кастомизации дилерами пяти выпускаемых моделей. В результате была создана единая сборочная площадка, выпускающая мотоциклы всех пяти моделей с возможностью их кастомизации, заказчику предлагается выбор более чем из 1300 вариантов. В ходе всего производственного процесса используются датчики, управляемые MES-системой. Каждый станок, каждая деталь имеет RFID-метку, однозначно идентифицирующую изделие и его место в производственном цикле. Информация от датчиков передается на платформу обработки данных, выполняющую роль информационной шины для сбора данных с датчиков и различных информационных систем, как внутренних производственных и бизнес-систем компании Harley Davidson, так и информационных систем контрагентов компании. В результате производственный цикл сокращен с 21 дня до 6 ч (каждые 89 секунд с конвейера сходит мотоцикл, полностью настроенный под будущего владельца); реализовано сквозное управление изделием на всем его жизненном цикле; стоимость акций компании выросла более чем в 7 раз.

В целом облик будущего промышленного производства уже определен «Индустрией 4.0». И хотя это еще гибкая концепция, мы знаем, к чему двигаться, но насколько успешно и безболезненно мы пройдем эту промышленную революцию, зависит исключительно от инжиниринга, способного объединить уже существующие технологические и цифровые решения в единый комплекс, в то, что называется «киберфизические системы». «Индустрия 4.0» — это вызов прежде всего для компаний, действующих в сфере промышленного инжиниринга. Да, разработка и интеграция компонентов и систем играет огромную роль, но эффект целостной самодостаточной системы можно получить, только объединив разрозненные элементы в единый производственный комплекс.

Терминология «Индустрии 4.0» всегда была перегружена огромным количеством интерпретаций и альтернативных «сущностей». Дело здесь не в том, что кто-то чего-то недопонял или сознательно вводит в заблуждение, просто концепция не является окончательной, ее элементы находятся в постоянном развитии и часто перекрываются более перспективными решениями, изменяющими как общий тренд, так и значимость отдельных направлений. Кроме того, попытка описать этапность перехода от текущего уровня развития промышленности к «Индустрии 4.0» также не добавила ясности, а скорее еще больше запугала общее понимание концепции. Поэтому следующая часть статьи будет рассматривать категории, наиболее близкие к раскрытию логики «Индустрии 4.0», первые две из них описывают базовые понятия, следующие — пытаются предложить видение переходных этапов промышленной цифровизации.

## «Индустрия 4.0»

«Индустрия 4.0» — концептуальная основа четвертой промышленной революции, объединившая в понятии киберфизической системы несколько существующих и разрабатываемых технологических и цифровых направлений, способных кардинально изменить структуру промышленности и производственных отношений. Понятие возникло в 2011 году в Германии и эволюционирует параллельно с развитием включенных в нее технических решений, отраслевой и страновой специфики, что зачастую вносит путаницу в понимание

термина. В связи с этим лучше определить «Индустрию 4.0» не через перечень постоянно меняющихся, поглощаемых новыми и непропорционально развивающихся технологий, а с использованием функционального подхода. При этом основная цель всех планируемых изменений — высший уровень конкурентоспособности производства на макроуровне. Конкурентные преимущества определяют и человеческий фактор как наиболее слабое звено в производственном процессе и устанавливают функционал системы:

- Высокое качество продукции за счет автоматизации и роботизации производства, отсутствия отбракованных изделий, в случае нерентабельности робототехнических решений в переходный период — превентивное устранение брака посредством цифровизации производственных процессов.
- Высокая эффективность производства за счет ускоренного автоматизированного внедрения новых технологических и производственных решений.
- Высокая планируемость будущей загрузки предприятий, снижение издержек за счет оптимизации ресурсоемких процессов и планирования эксплуатационных расходов. Предиктивная аналитика дает возможность получения многоуровневого прогнозного ресурса, от планирования загрузки технологических линий до управления процессом внедрения новых продуктов.
- Увеличение конкурентных преимуществ в пределах производственного цикла. Переход от вертикальной интеграции производственных процессов к горизонтальной, при которой производственный цикл не концентрируется в рамках одной тяжеловесной и слабо управляемой компании, а распределяется между несколькими компаниями, производящими близкие товары/услуги в одной производственной нише.
- Высокая гибкость производственных процессов, быстрая автоматизированная перенастройка ведет к кастомизации продуктовой линейки, промышленный продукт, изготовленный по индивидуальному дизайну, становится стандартом.
- Полная производственная загрузка за счет минимизации простоев оборудования и производственных аварий.
- Прямое взаимодействие «продукт – потребитель», смерть традиционного маркетинга и замена на автоматический сбор и машинную обработку данных. Оптимизация производства как под выпуск нестандартной продукции с заданными техническими характеристиками (персонализированное производство), так и для выполнения типовых операций.

Базовым для «Индустрии 4.0» является предельный уровень автоматизации и цифровизации: ручной механический труд исключается за счет роботизации, инструменты искусственного интеллекта обеспечивают принятие решений, широкие возможности передачи данных и их интерпретации на уровне человек-машина предоставляют возможность восприятия машиной потребительских качеств продукции. Итог — «безлюдное производство» и полное исключение человека из производственных отношений, автоматизация логистики и традиционных маркетинговых инструментов. Однако с психологической точки зрения человеку, тем более занятому на руководящих постах, крайне сложно представить себе систему, из которой в обозримом будущем он сам себя исключает; с практической — подобная организация промышленности (здесь не идет речь об отдельном производстве) еще далека от существующих технологических и инженерных возможностей.

Поэтому в дорожных картах и программах развития, в том числе в российском Технете, выделялись два варианта фабрик будущего («цифровая» и «умная», рассмотрены далее), описывающих промежуточные структурные единицы трансформирующихся в ходе цифровизации производств. В свою очередь виртуальная фабрика в такой системе представляется итогом этой трансформации и одновременно системообразующим элементом «Индустрии 4.0». Каждая из фабрик будущего определяется через перечень программных и технологических изменений и целевых показателей. Однако с точки зрения практического инжиниринга разграничение между ними

искусственно и не учитывает последовательности и связи между пересекающимися программными продуктами, технологическими и цифровыми решениями. Другими словами, «Индустрия 4.0» — это гибкая, развивающаяся концепция будущей промышленности, технические средства и промежуточные этапы которой подвержены слишком частым изменениям, чтобы на современном этапе появился консенсус по оптимальной реализации концепции «Индустрии 4.0».

Тем не менее базовый набор технологических направлений уже сейчас прозрачен. Основные, можно сказать критические, компоненты «Индустрии 4.0», напрямую влияющие на ее становление, часто путают с самой идеологией, объединяющей «сумму технологий», которые уже были перечислены выше по нескольким сегментам: накопление данных в киберфизических системах, обмен данными, интерфейсы взаимодействия, цифровая и производственная инфраструктура, обработка и анализ данных. Это базовый перечень для фабрики будущего, хотя далеко не исчерпывающий и не исключающий замещений. Тот же блокчейн, как механизм контрактинга по обеспечению материально-технической базы производства, необходим в системе «Индустрии 4.0», но на нынешнем этапе еще не критичен.

Стадии развития компонентов «Индустрии 4.0». Экстраполяция существующих технологических трендов:

#### 1. Состояние компонентов «Индустрии 4.0» сегодня:

- Облачное хранение, искусственный интеллект и нейронные сети, АСУТП и роботизированные комплексы, сенсорные системы и инфраструктурные решения доступны уже сегодня, их воплощение в концепции «Промышленности 4.0» — вопрос интеграции программного обеспечения с другими элементами системы.
- Цифровое моделирование уже используется для создания цифровых двойников, сервисного обслуживания оборудования и систем. Кроме того, это базовая технология для проектирования новой продукции и выходного контроля продукции («с конвейера», сокращения периода тестирования опытных образцов при разработке новых продуктов. Результат: полная автоматизация управления производственными процессами.

#### 2. Текущие направления развития компонентов «Индустрии 4.0»:

- Системы промышленной безопасности стандартизируются на национальном и региональном уровне.
- Промышленное оборудование и системы обеспечиваются достаточным числом и уровнем совместимости датчиков для самодиагностики и взаимодействия на уровне нейросетей.
- Системы обработки больших объемов информации Big Data (термин уже устарел, здесь приводится для характеристики класса технологий, извлекающих практический смысл из разрозненных данных) в состоянии систематизировать и предложить легко интерпретируемые человеком массивы данных, исходящих от машин. В развитом состоянии интерпретация данных происходит посредством машинного обучения, в частности нейросетей и глубокого обучения, хотя остается актуальной проблема «черного ящика» — непонимание человеком, как обученная машина пришла к тем или иным выводам. В современном состоянии изначально сугубо программный характер вычислений расширяется на уровень программируемых интегральных схем под задачи искусственного интеллекта, периферийных вычислений и пр.
- Системы машинного обучения ML обеспечат автоматизированную настройку оборудования и целых производственных линий без участия человека.
- Промышленный «Интернет вещей» (IIoT) начинает работать на уровне промышленных предприятий, IIoT — на уровне логистических сетей и мегаполисов, что обеспечит один из значимых аспектов «Индустрии 4.0» — обратную связь «пользователь — производитель продукции».

3. В будущем — автоматизированное управление интеллектуальными системами в режиме реального времени при постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в региональные промышленные сети.

## Киберфизическая система

Киберфизическая система (cyber-physical system, CPS) — информационно-технологическая концепция, объединяющая кибернетику, мехатронику, теорию и практику управления процессами и подразумевающая интеграцию вычислительных ресурсов в физические объекты и процессы, их взаимодействие с помощью протоколов IoT и PoT для прогнозирования, самонастройки и адаптации к изменениям в реальном времени. В такой системе датчики, оборудование и информационные системы объединены на протяжении всей цепочки создания стоимости в единую структуру, влияние которой выходит за рамки одного предприятия. CPS способствует принятию более точных и своевременных решений, основанных на реальных событиях, а не на их человеческой интерпретации.

Часто между «Индустрией 4.0» и CPS не делают различия, так как класс используемых технологий фактически совпадает, но «Индустрия 4.0» — это сценарий развития будущего производства, а CPS, по сути, тот инфраструктурный фундамент, который должен стать основой для реализации этого сценария. Сегодня человечество функционирует в двух параллельных мирах: физическом и цифровом, они взаимодействуют посредством человека и (по крайней мере в промышленном сегменте) для человека. Упрощенно сущность «Индустрии 4.0» можно охарактеризовать как процесс вывода человека из производственных отношений, поскольку роботы, интеллектуальные машины и ИИ справляются с производственными задачами гораздо эффективнее. Однако для этого нужно, чтобы физический и цифровой мир стали единой системой, существующей независимо от нынешней антропоцентричной модели промышленности и способной, подобно человеку, воспринимать и анализировать информацию о себе и окружающем мире, делать выводы и принимать решения, транслируемые во внешний мир и исполняемые другими устройствами, без вмешательства человека. Поэтому главной задачей развития киберфизических систем можно назвать глубокое взаимодействие между физическими и цифровыми элементами системы.

Исходя из такой интерпретации становятся понятными и технологические направления, критически влияющие на становление CPS. По аналогии с нервной системой человека, нервные клетки системы — это сенсоры, охватывающие весь физический комплекс, участвующий в ее работе. Нервный импульс обеспечивает передачу информации от рецепторов к нервным центрам — в случае с CPS эти функции обеспечиваются технологиями обмена данных IoT/IIoT. Нервные центры, обработав информацию, передают импульс к исполнительным органам — соответственно, обработку информации обеспечивает целый комплекс инструментов от анализа на основе Big Data и более сложных инструментов предиктивной аналитики и Data Mining, ориентированных уже на недоступные для человека логические последовательности, до искусственного интеллекта с присутствующими ему методами самообучения (искусственные нейронные сети, глубинное/теневое обучение). Вопрос включения перечисленных технологий анализа в CPS спорен, для реализации типового техпроцесса они избыточны, но, с другой стороны, управление изменениями в этих процессах без них невозможно. Исполнительным органом в системе может быть человек или машина: машина — это робот или станок, здесь взаимодействие строится на базе технологий M2M, сейчас такие задачи эффективно решаются машинным обучением. Человек в CPS избыточен, хотя взаимодействие с цифровым миром на этом уровне и не представляет затруднений и строится на основе традиционных интерфейсов или решений VR, AR, MR (виртуальная, дополненная, смешанная реальность), тем не менее этот уровень в техносфере CPS уже не входит.

## Фабрика будущего

Фабрика будущего (factory of the future) — обобщенное описание организации производственных предприятий в будущем. Поиск оптимального набора постоянно эволюционирующих технологических

и цифровых решений определяет состав и соподчинение существующих и перспективных технологий, что делает саму концепцию достаточно размытой. Даже основные формации, возникшие в разные периоды эволюции общей концепции, — цифровые, виртуальные, «умные» фабрики не имеют четких границ и представляются либо как массивы взаимоувязанных технологий (в предложенном ниже варианте), либо как этапы развития, либо определяются по охвату производственно-управленческих функций. Сочетание двух последних представлено в отечественном Технете.

В терминологии Технета цифровая фабрика (digital factory) представлена первым этапом трансформации производств в фабрику будущего, охватывающим стадии проектирования и планирования изделий и производства с приоритетом технологий цифрового моделирования. «Умная» фабрика (smart factory) — второй этап, принимающий технологии предыдущего периода, но концентрирующийся на организации гибкого серийного производства, технологиях автоматизации и роботизации и построения сенсорной инфраструктуры. Виртуальная фабрика — суммарная система, включающая технологии и «умных», и цифровых заводов, но делающая акцент на создании распределенной сети производств, использующих в виде единого объекта виртуальную модель всех организационных, технологических, логистических и прочих процессов на уровне глобальных цепочек поставок. При этом в качестве базовых определяются не технологии «Интернета вещей» или цифровых двойников, подходы Agile или PLM-системы, а информационные системы ERP (планирование ресурсов предприятия), CRM (управление взаимоотношениями с заказчиками) и SCM (управление цепочками поставок), что имеет смысл для этапов эксплуатации и обслуживания, выделенных в качестве основных, но с технической точки зрения упомянутые системы должны уже функционировать.

В предложенной ниже интерпретации цифровой завод — это сквозная цифровизация отдельного предприятия; «умная» фабрика — построение киберфизической производственной системы на этом отдельном предприятии; виртуальная фабрика — масштабирование этой системы уже на уровень нескольких предприятий, в другой терминологии — «Индустрия 4.0».

## Цифровая фабрика/завод

Цифровая фабрика/завод (digital factory) — одно из видений концепции «Фабрики будущего», приоритет в которых отводится операциям, основанным на цифровом проектировании, дизайне и моделировании продуктов и производственных процессов на всем протяжении их жизненного цикла. Система основана на автоматизированном проектировании (САПР) и программных продуктах группы CAx (CAD, CAE, CAM), цифровом BIM-моделировании продуктов, процессов, производственной и инженерной инфраструктуры предприятия. Аппаратная часть системы здесь подчиняется задачам цифровизации производственных и технологических процессов, поэтому нацелена на построение сенсорной инфраструктуры и цифровых двойников на уровне всего предприятия, его процессов и продукции.

С точки зрения эволюции производственных систем цифровой завод является переходным состоянием между традиционным заводом и «умной» фабрикой. Однако если принять во внимание существующую в современной полупроводниковой отрасли модель Fables, где проектирование и серийное производство интегральных схем разделено между самостоятельными компаниями, то в подобной системе цифровые фабрики могут выступать в роли самодостаточной производственной единицы, ориентированной на проектирование и выпуск мелкосерийной продукции. В данном контексте обосновано распространение определения цифрового завода как самодостаточной системы, дополненной такими компонентами, как станки с ЧПУ и 3D-принтеры на аппаратном уровне. В свою очередь на программном уровне — это функционирующие системы PDM (обеспечивают управление всей информацией об изделии) и PLM (поддерживают



коллективную разработку, управление, распространение и использование информации об изделии на протяжении всего его жизненного цикла).

### «Умная» фабрика

«Умная» фабрика (smart factory) — организация производственной системы на базе цифровых средств сквозного управления автоматизированными технологическими, инженерными и производственными процессами, включая робототехнические комплексы на аппаратном уровне, а на уровне программного обеспечения — системы управления класса PLM, ERP, MES (системы автоматизации оперативного управления производственными заказами, качеством продукции, контроля производительности оборудования) или BPMS (системы управления бизнес-процессами для автоматизации производственных операций, обслуживания оборудования, контроля качества, инжиниринга, складских операций и т. п.). Если цифровой завод ориентирован на создание цифровой или киберсистемы, то «умная» фабрика — это уже организация киберфизической системы, то есть системы, объединяющей в единой среде программный и аппаратный комплекс. В зависимости от уровня автоматизации функционал «умной» фабрики может варьироваться от гибкого производства с приоритетом быстрой перенастройки производственных систем на выпуск другой продукции или мелкосерийных кастомизированных продуктов до «безлюдного» производства, исключаящего человеческий труд в производственном цикле (человек занимается только мониторингом и обслуживанием системы). Технет рассматривает «умную» фабрику как продолжение цифровой на уровне наладки технологических линий и организации серийного

производства, но с точки зрения проектирования таких объектов оба процесса настолько взаимосвязаны, что их разделение приводит только к путанице. Например, внедрение аналитических ресурсов системы — BigData, предиктивная аналитика, искусственный интеллект — должно быть предусмотрено еще на уровне организации цифровой фабрики, хотя их полноценное использование характерно для «умной» фабрики. Напротив, без учета аппаратного уровня автоматизации и роботизации предприятия, состава технологических линий, которые в классическом понимании не актуальны для цифровой фабрики, построение необходимых для этой системы цифровых двойников на уровне технологических процессов или инженерной инфраструктуры невозможно.

### Виртуальная фабрика

Виртуальная фабрика (virtual factory) — имитационная модель сети цифровых и «умных» фабрик, в которую также включены поставщики услуг/компонентов на входе и автоматизированные процессы дистрибуции и логистики, сбыта и обслуживания продукции, организации потоков обратной информации на выходе. Увеличение добавленной стоимости через управление цепочками поставок и распределенными производственными активами, а также посредством оптимизации каналов распространения продукции здесь являются определяющими характеристиками. Модель виртуальной фабрики акцентирует вопросы сетевого планирования и управления производственными процессами с помощью корпоративных программных продуктов ERP, PLM, MES, но не на уровне предприятия, а на уровне сети предприятий, поставщиков и прочих контрагентов. С практической точки зрения все обозначенные программные

решения, необходимые для функционирования виртуальной фабрики, должны работать еще на уровне цифрового завода. Тогда же обеспечивается и работа сегментов обмена данными посредством IIOT, облачного хранения данных; интерфейсов взаимодействия между машинами и человеком. По сути, виртуальная фабрика — это сетевое масштабирование фабрики будущего.

### Заключение

Можно заметить некоторое несоответствие между направленностью «Индустрии 4.0» и киберфизических систем на полное устранение человеческого фактора из производства и массой сугубо антропоцентричных программных средств автоматизации (ERP, PLM, MES...), используемых в переходных структурных единицах, от цифровых до виртуальных фабрик. Вероятно, это обусловлено попыткой практического внедрения концепции на базе существующих и уже достаточно хорошо зарекомендовавших себя решений, но в любом случае доля искусственного интеллекта будет постоянно расти, постепенно вытесняя актуальные для нашего времени средства автоматизации. Тем не менее, чтобы прийти к полностью автоматизированной промышленности уже сегодня, необходимо внедрять доступные решения, проектировать свои «умные» и «темные» фабрики (lights out/dark factory — полностью автономные заводы, которые в отсутствие людей не требуют освещения), примеры которых уже довольно давно присутствуют в мировой индустрии и дают отличные показатели конкурентоспособности.

Прошу прощения за отсутствие ссылок и источников, число которых во второй части приблизилось к 400, включая англоязычные ресурсы, но тезаурус изначально разрабатывался сугубо для внутреннего пользования. ■