

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА



Сергей Осипенко,
замдиректора по
техническому развитию
унитарного предприятия
«ЦНИИТУ-ИТ»



Алексей Козлов,
начальник научно-
технического управления
Министерства
промышленности
Республики Беларусь



Сергей Соловьев,
генеральный директор
ОАО «ЦНИИТУ»

Концепцию четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) впервые сформулировали в 2011 г. в Ганновере как внедрение в заводские процессы киберфизических систем. Предполагается, что они объединятся в одну сеть, будут связываться друг с другом в режиме реального времени, самонастраиваться и учиться новым моделям поведения. Такие сети смогут выстраивать производство с меньшим количеством ошибок, взаимодействовать с производимыми товарами и при необходимости адаптироваться под новые потребности потребителей [1].

Отличительными особенностями Индустрии 4.0 являются:

- **Цифровизация и вертикальная интеграция по цепочке создания стоимости.** Процессы при этом выстраиваются по вертикали в рамках всей организации, начиная от разработки продуктов и закупок и заканчивая производством, логистикой и сервис-



ным обслуживанием. Все данные об операционных процессах, их эффективности, управлении качеством и операционном планировании доступны в режиме реального времени в едином информационном пространстве, оптимизированы под различные платформы [2].

- **Цифровизация и горизонтальная интеграция нескольких цепочек создания стоимости.** Данная интеграция выходит за пределы деятельности одного предприятия и охватывает поставщиков, потребителей и всех ключевых партнеров по цепочке создания стоимости. Используются инструменты интегрированного планирования, учитывающие входящие параметры от партнеров (смещение сроков поставок, изменение объемов производства и др.), что позволяет оперативно корректировать планы [3].
- **Цифровизация продуктов и услуг,** предполагающая их дополнение интеллектуальными датчиками или устройствами связи, совмести-

мыми с инструментами анализа данных. Благодаря внедрению новых методов аналитики у компаний появляется возможность получать сведения об использовании продуктов и дорабатывать их в соответствии с новыми требованиями конечных пользователей [2].

- **Цифровые бизнес-модели и доступ клиентов.** Ведущие отраслевые компании расширяют спектр предоставляемых ими услуг, предлагая революционные цифровые решения, например комплексное персонализированное обслуживание на основе данных и интегрированные платформы [3].
- **Новые цифровые бизнес-модели.** Они зачастую направлены на получение дополнительной выручки от цифровых решений, оптимизацию взаимодействия с клиентом и улучшение их доступа. Цифровые товары и услуги часто предназначены для обслуживания путем предоставления им комплексных решений в обособленной цифровой экосистеме [4].

- Развитая технологическая платформа.**
 Предприятия используют высокотехнологичные машины и оборудование, информационно-коммуникационные решения и киберфизические системы, обеспечивающие цифровизацию и интеграцию. Без развитых технологий проблематично реализовать все предыдущие атрибуты с практической точки зрения [3].

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ИНДУСТРИИ 4.0

Согласно исследованию Национальной академии науки и техники Германии [4], на сегодняшний день компании все еще решают проблемы, связанные с созданием базовых условий для Индустрии 4.0. Соответственно, путь развития начинается с цифровизации. Хотя сама по себе она не является частью Индустрии 4.0, информатизация и связанность представляют собой базовые требования для ее реализации. За этими двумя первоначальными этапами следуют четыре других, в ходе которых развиваются характеристики, необходимые для Индустрии 4.0 (рис. 1).

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ

Информатизация уже довольно распространена в большинстве компаний и главным обра-

зом используется для более эффективного выполнения повторяющихся задач. Она открывает важные преимущества, например помогает удешевить производство и одновременно привести его к более высоким стандартам и точности, без которой было бы невозможно изготавливать многие современные продукты. Тем не менее мы до сих пор видим множество оборудования без цифрового интерфейса. Это особенно актуально в отношении оборудования, имеющего длинные циклы или аппаратов, управляемых вручную. В таких случаях недостающим звеном в связи между бизнес-приложениями и оборудованием зачастую становятся терминалы.

Одним из примеров этапа информатизации является фрезерный станок с ЧПУ типа CNC. Хотя некоторые его узлы характеризуются высокой точностью за счет использования числового программного управления, данные САПР, в которых подробно указаны действия для выполнения, нередко приходится передавать на станок вручную. Другими словами, здесь не хватает связанности. Еще один пример – системы для коммерческого применения, не подключенные к ERP компании. В результате может возникнуть такая ситуация, когда, к примеру, полуавтоматический контроль качества будет выполняться на испытательной станции, но зафиксированные дан-

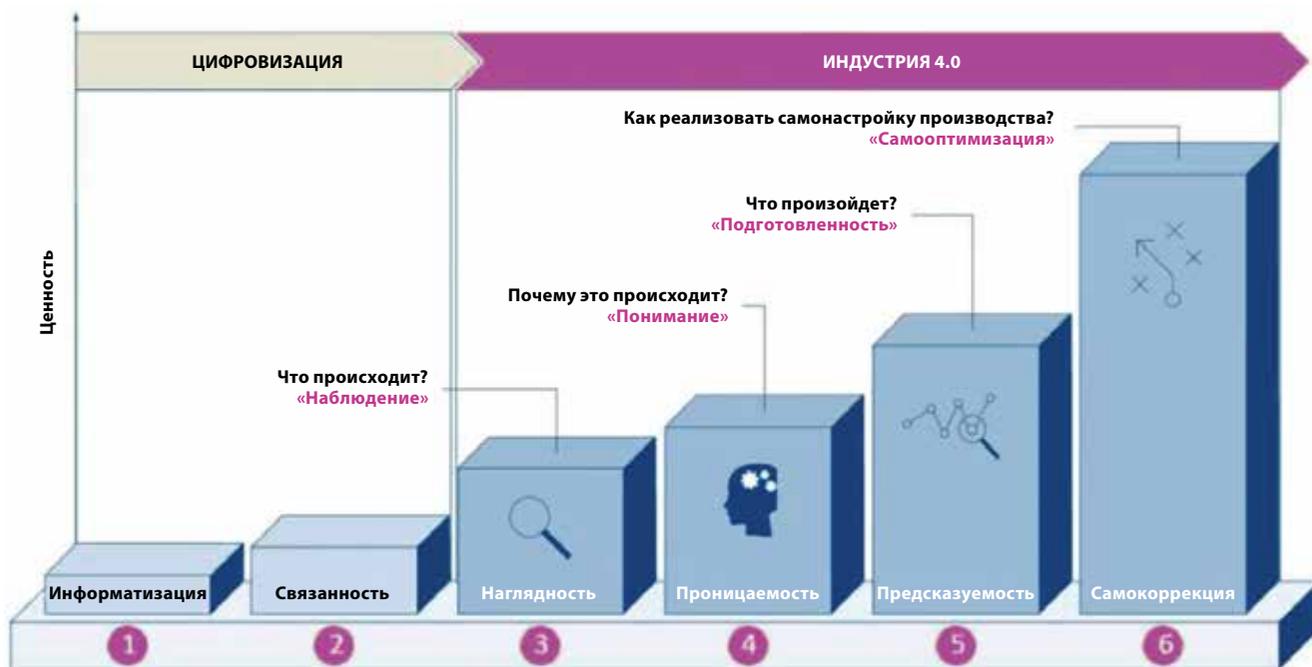


Рис. 1. Этапы развития Индустрии 4.0 (Институт управления промышленной деятельностью (FIR) при Рейнско-Вестфальском техническом университете Ахена)

ные не будут связаны с соответствующим рабочим заданием. Из-за этого впоследствии становится гораздо труднее определить, какие проблемы возникли на определенных этапах.

СВЯЗАННОСТЬ

На данном этапе взаимосвязанные элементы приходят на смену разделному внедрению информационных и эксплуатационных технологий, однако полная интеграция их уровней еще не достигнута.

IP-протокол все чаще применяется на производстве. Поскольку текущая версия IPv6 дает возможность использовать гораздо более длинные адреса, чем ее предшественник IPv4, теперь все компоненты могут быть соединены друг с другом без необходимости преобразования сетевых адресов. Это ключевое требование для Интернета вещей. Связанность означает, к примеру, что после создания проекта его данные передаются на производство для выполнения работ по изготовлению (процессы CAD/CAM). После завершения цикла возможно автоматическое предоставление подтверждения в реальном времени посредством системы управления производством (MES).

На существующих предприятиях производственные активы находятся в использовании до тех пор, пока с их помощью можно изготавливать качественные продукты. Нередко встречается оборудование, которому более 50 лет. Поскольку IP-протокол обеспечивает возможность стандартизированной коммуникации на производственной площадке, применение новых сенсорных технологий означает, что эти активы, не утратившие своей продуктивности, могут быть с легкостью соединены с другими системами для предоставления данных.

НАГЛЯДНОСТЬ

Датчики позволяют фиксировать выполнение процессов с начала и до конца с огромным количеством точек ввода данных. Благодаря снижению цен на датчики, микрочипы и сетевые технологии теперь можно записывать события и состояния в реальном времени во всей компании и за ее пределами, а не просто в отдельных областях, таких как производственные участки, как это было ранее. За счет этого стала доступна актуальная цифровая модель предприятия. Она может пока-

зать, что происходит в компании в определенный момент времени, чтобы управленческие решения были основаны на реальных данных, и, следовательно, представляет собой краеугольный камень для последующих этапов. Создание цифровой модели – серьезная проблема, состоящая в том, что обычно отсутствует единый источник достоверных данных, поскольку зачастую они хранятся в децентрализованных хранилищах. Кроме того, часто в таких сферах, как производство, логистика и обслуживание, по-прежнему собирается очень мало данных, даже в рамках централизованных процессов. Помимо этого, полученные сведения видит только ограниченное число людей, которое имеет к ним доступ и разбирается в соответствующих системах. Более широкое использование запрещено ввиду границ системы. Для создания постоянно развивающегося, гибкого предприятия обязательно условие общих прав на получение данных. Так важные сведения об операциях будут предоставляться всему учреждению.

Благодаря этому можно гораздо быстрее определить изменение даты поставки, вызванное какой-либо проблемой, посредством ключевых показателей эффективности в реальном времени и панелей управления. Таким образом, руководитель может скорректировать планирование производства, а клиенты и поставщики будут в курсе дел.

Это область, в которой компаниям необходимо изменить свой образ мышления. Вместо сбора данных для конкретного анализа или поддержки определенной операции следует иметь возможность в любой момент создать актуальную модель всей компании, не связанную с отдельными событиями анализа данных. Их сбор с помощью существующих и новых датчиков сулит значительные преимущества. Интеграция систем PLM, ERP и MES обеспечивает комплексную картину, которая позволяет увидеть текущее положение дел. Кроме того, модульные подходы и приложения могут помочь в создании единого источника достоверных данных.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Этот этап помогает компании понять, почему происходят определенные события, и использовать эту информацию, чтобы иметь необходимые знания путем анализа первопричин. Для определения и интерпретации взаимосвязей в цифровой модели сведения должны быть проанализированы

посредством применения инженерных знаний. Семантическая связь, агрегация данных для получения необходимой информации и соответствующая контекстуализация обеспечивают знание процессов, необходимое для поддержки сложного и быстрого принятия решений.

Новые технологии, поддерживающие анализ больших объемов данных, могут оказаться чрезвычайно полезными в этом отношении. Как правило, приложения для их обработки развертываются параллельно с корпоративными системами, такими как ERP или MES, и представляют собой общую платформу, которая может использоваться, к примеру, для выполнения анализа объемных случайных данных с целью выявления взаимосвязей в цифровой модели компании. Такая прозрачность в отношении важных взаимосвязей может применяться, например, для мониторинга состояния станков и оборудования. В записанных параметрах выполняется поиск общих событий и зависимостей, которые затем объединяются для формирования составных событий, отражающих состояние станка или оборудования. Следовательно, прозрачность, среди прочего – требование для профилактического технического обслуживания.

ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ

При достижении этого этапа компания может моделировать различные будущие сценарии и определять наиболее вероятные из них. В результате можно предвидеть будущие события и, как следствие, своевременно принять решение и надлежащие меры. Хотя действия в рамках таких мер все еще нужно выполнять вручную, благодаря более длительному времени на подготовку сокращаются возможные негативные последствия. Уменьшение количества непредвиденных случаев, вызванных, к примеру, поломками или отклонением от плана, обеспечивает более стабильную работу предприятия. Оно может обратить внимание на периодические проблемы в сфере логистики, такие как сбои в работе перевозчика, даже до их возникновения и предотвратить их.

Предсказуемость в значительной мере зависит от проделанной работы. Должным образом сформированная цифровая модель и знание соответствующих взаимосвязей помогут делать прогнозы и давать рекомендации высокого качества.

САМОКОРРЕКЦИЯ

Это фундаментальное требование для автоматизированных решений и автоматизированного процесса их принятия. Постоянная адаптация позволяет компании переложить обязанности по определенным решениям на ИТ-системы, чтобы иметь возможность максимально быстро адаптироваться к меняющейся бизнес-среде.

Степень предсказуемости зависит от сложности решений и соотношения затрат и выгод. Зачастую оптимальным вариантом является автоматизация отдельных процессов. Соответственно, необходимо изучить, насколько целесообразно выполнять повторяющиеся операции в автономном режиме. При этом важно внимательно оценить риски автоматизации утверждений и подтверждений для клиентов и поставщиков. В качестве примера можно привести изменение последовательности запланированных задач из-за ожидаемых сбоев оборудования или во избежание задержек поставки. Цель предсказуемости считается достигнутой, когда компания может использовать данные цифровой модели для принятия решений, которые принесут наилучшие результаты в максимально короткий срок, и автоматически, то есть без участия человека, реализовывать соответствующие меры.

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СТЕКА ИНДУСТРИИ 4.0

Американский институт стандартов и технологий (ANSI) дает, на наш взгляд, наиболее точное и полное определение киберфизических систем: «Киберфизическая, или умная, система (CPS, КФС) – это сеть взаимодействующих физических и вычислительных компонентов, проектируемая как единая система, организованная в рамках единой базовой киберфизической модели и адаптирующаяся к изменениям реального мира».

Принципиальная новизна подходов при проектировании КФС заключается в интеграции кибер- (вычисление, связь, управление) и физического мира, которая приводит к пересечению, конвергенции ИТ и ОТ (операционных технологий); со-дизайну аппаратных и программных компонентов; созданию цифровой копии физического мира.

Основными «вызовами» здесь являются повышенный уровень ответственности, критичность скорости принятия решений, необратимая динамика процессов, сложность моделирования физической реальности.

При разработке КФС стоит целый ряд задач:

- *разработка алгоритмов принятия решений гарантированной производительности, надежности и безопасности;*
- *создание самообучаемых алгоритмов сенсорно-моторной координации;*
- *развитие естественных интерфейсов человеко-машинного взаимодействия;*
- *технологическое дополнение человека в физическом пространстве и социально ответственная робототехника;*
- *внедрение технологий EDGE/FOG вычислений в конвергенции с облачными вычислениями;*
- *реализация мероприятий в области информационной безопасности.*

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

ПоТ – ключевая технология построения киберфизических систем, Интернет вещей для корпоративного/отраслевого применения, представляющая собой объединенные компьютерные сети с подключенными промышленными (производственными) объектами со встроенными датчиками и ПО для сбора и обмена данными с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном режиме без участия человека.

Принцип работы технологии заключается в следующем: первоначально устанавливаются датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и человеко-машинные интерфейсы на ключевые части оборудования, после чего осуществляется сбор информации, которая впоследствии позволяет компании приобрести объективные и точные данные о состоянии предприятия. Они доставляются во все отделы компании, что помогает наладить взаимодействие между сотрудниками и принимать обоснованные решения. При этом можно быстро менять устаревающую бумажную документацию, а также аккумулировать экспертные знания специалистов.

Внедрение ПоТ дает возможность увеличить эффективность активов на 10–15% за счет сокращения количества незапланированных простоев; снизить затраты на техническое обслуживание на 5–10%, усовершенствовав процедуры прогнозирования и предот-

вращения катастрофических отказов оборудования и выявляя неэффективные операции; повысить производительность на 5–10%, увеличить уровень энергоэффективности и сократить эксплуатационные расходы до 20% за счет более рационального использования энергии.

В конечном итоге индустриальный Интернет вещей позволяет не только повысить качество технической поддержки оборудования за счет развитых средств телеметрии, но и обеспечить переход к новой бизнес-модели его эксплуатации, когда оборудование оплачивается заказчиком по факту использования его функций.

Внедрение сетевого взаимодействия между машинами, оборудованием, зданиями и информационными системами предоставляет возможность осуществлять мониторинг и анализ окружающей среды, процесса производства и собственного состояния в режиме реального времени, а передача функции управления и принятия решений интеллектуальным системам приводит к смене парадигмы технологического развития.

ПоТ может последовательно эволюционировать от подключения отдельных продуктов и объектов с целью их диагностики и контроля до объединения различных объектов управления в сети, а последние – в более сложные сетевые платформы и комплексные производственные решения [5].

По мнению J'son & Partners Consulting, за количественным ростом Интернета вещей и организационно-технологической трансформацией производства стоят важные качественные изменения в экономике:

- *данные, которые раньше были недоступны, с ростом проникновения встроенных устройств представляют собой ценную информацию о характере использования продукта и оборудования для всех участников производственного цикла, являются основой формирования новых бизнес-моделей и обеспечивают дополнительный доход от предложения новых услуг (контракт жизненного цикла на промышленное оборудование, контрактное производство как сервис, транспорт как сервис, безопасность как сервис и др.);*
- *виртуализация производственных функций сопровождается формированием экономики совместного использования, характеризующейся существенно более высокой эффективностью и производительностью за счет*

мобилизации имеющихся ресурсов, изменения функционала устройств без внесения изменений в физические объекты, путем совершенствования технологий управления ими;

- моделирование технологических процессов, сквозное проектирование и, как результат, оптимизация цепочки создания стоимости на всех этапах жизненного цикла продукта в режиме реального времени позволяют производить штучный или мелкосерийный продукт по минимальной цене для заказчика и с прибылью для производителя, что в традиционном производстве возможно только при массовом его характере;
- эталонная архитектура, стандартизированные сети и удобная модель аренды делают совместную производственную инфраструктуру доступной для среднего и малого бизнеса, что облегчает их усилия по управлению производством, позволяет ускорить реагирование на изменяющиеся требования рынка и сокращение жизненного цикла продукции и влечет за собой разработку и появление новых приложений и сервисов;
- анализ данных о пользователе, его производственных объектах (машинах, зданиях, оборудовании) и характере потребления открывает для поставщика услуги возможности по улучшению клиентского опыта, созданию большего удобства пользования, лучшего решения и сокращению затрат, что ведет к повышению удовлетворенности от работы с данным поставщиком;
- функционирование различных отраслей экономики будет непрерывно усложняться под воздействием развития технологий и осуществляться за счет автоматического принятия решений самими машинами на основе анализа большого объема данных с подключенных устройств, что приведет к постепенному снижению роли производственного персонала, в том числе квалифицированного. Потребуется качественное профессиональное образование, включая инженерное, специальные обучающие программы для работников и тренинги.

УСЛОВИЯ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ IIOT

Анализ лучших мировых практик внедрения IIoT в исследовании J'son & Partners Consulting [5] показывает, что основными сферами применения решений в сфере промышленного интернета явля-

ются производства, характеризующиеся наличием одного либо нескольких следующих важных условий: выпуск широкой номенклатуры продукции, использование большого перечня комплектующих; значительная энергоемкость производства; сложные производственные условия; необходимость системной интеграции широкого спектра, потребность в повышении качества выпускаемой продукции и снижении степени брака, в обеспечении эффективного сервисного обслуживания ранее поставленной продукции, в снижении эксплуатационных затрат, в оперативной диагностике неисправностей технологического оборудования для снижения незапланированных простоев производства; в обеспечении высокой производительности персонала и его безопасности.

СЕТИ IIOT НА ОСНОВЕ ГРАНИЧНЫХ (EDGE), ТУМАННЫХ (FOG) И ОБЛАЧНЫХ (CLOUD) ВЫЧИСЛЕНИЙ

IIoT система в облачной среде позволяет повысить эффективность использования без увеличения инвестиций и снижения производительности. Тем не менее существуют проблемы, которые ограничивают развитие умного производства.

Пропускная способность. Данные, генерируемые различными производственными ресурсами, которые могут быть географически распределены, переживают взрывной рост. Они передаются по сети в облако, где выполняется их обработка. Растущий объем и скорость передачи требуют высокой пропускной способности, что очень дорого. При серьезных перегрузках сети возможны потери.

Недоступность. Несмотря на то что к данным, хранящимся в облаке, можно получить доступ из любого места в любое время, пользователь в значительной степени зависит от наличия подключения к Интернету. При недоступности сети ресурсы облака становятся непригодными для использования.

Задержки. Некоторые производственные процессы реального времени и параллельные сценарии требуют синхронизации, что выдвигает особые требования к задержкам.

Достоверность данных. Передача большого количества незначительных данных в облако приводит к излишнему задействованию вычислительных ресурсов. До сих пор необходимости фильтрации первых не уделялось должного внимания.

Безопасность и конфиденциальность. Постоянное развитие новых источников атак приводит к многочисленным проблемам безопасности. Кроме того, когда все данные передаются в облако, они также содержат конфиденциальные сведения, что увеличивает риски злонамеренного воздействия и раскрытия информации.

Неэффективное взаимодействие. Облачная связь между предприятиями, пользователями и машинами, которые могут находиться на одной площадке, ограничивает гибкость и эффективность подключения и интерактивного обмена сообщениями.

В результате, несмотря на широкое использование облачных вычислений в интеллектуальном производстве, некоторые приложения чувствительны к реальному масштабу времени, точной и безопасной реакции на события.

Современные тенденции и требования приложений Индустрии 4.0 диктуют необходимость пересмотра парадигмы исключительного использования, или облачных, или локальных решений. Наиболее перспективным видится переход к конвергентным ИТ сетям на основе граничных, туманных и облачных вычислений. Разберем каждый из них, а также модель конвергенции технологий.

Облачные вычисления – это парадигма, которая обеспечивает повсеместный, удобный сетевой доступ по запросу к общему пулу настраиваемых ресурсов. Благодаря технологии виртуализации облачные вычисления скрывают разнообразие базовых устройств и предоставляют пользователям различные услуги прозрачным образом, включая IaaS (инфраструктура как услуга), PaaS (платформа как услуга) и SaaS (программное обеспечение как услуга). Из-за увеличения количества устройств доступа здесь могут возникнуть проблемы, связанные с пропускной способностью, задержкой, недоступностью сети, безопасностью и конфиденциальностью и т.д.

Туманные вычисления рассматриваются как расширение облачных к пограничной сети, предоставляющее услуги доступа к устройствам, расположенным рядом с пользователем (например, сетевым маршрутизаторам, различным информационным системам и т.д.) вместо отправки данных в облако. В парадигме туманных вычислений хранение и обработка данных в основном зависят от локальных устройств, а не от облачного центра обработки данных. Это делает приложения более удобными, обеспечи-

вая максимально широкий диапазон доступа к узлам. Подобно туманным, граничные вычисления также позволяют выполнять операции на границе сети, но в непосредственной близости от источников данных. Разница между ними заключается в том, что туманные вычисления основаны на возможностях взаимосвязи между узлами, тогда как граничные осуществляются в изолированных граничных узлах.

Граничные вычисления предоставляют граничные услуги рядом с источником данных для удовлетворения критически важных требований в отношении гибкого подключения, оптимизации в реальном времени, интеллектуальных приложений, безопасности и конфиденциальности. В качестве дополнительных туманные и граничные вычисления, которые обеспечивают вычисления, хранение и сетевые услуги между конечными устройствами и традиционными облачными вычислениями, открывают перспективы для интеллектуальных производственных приложений.

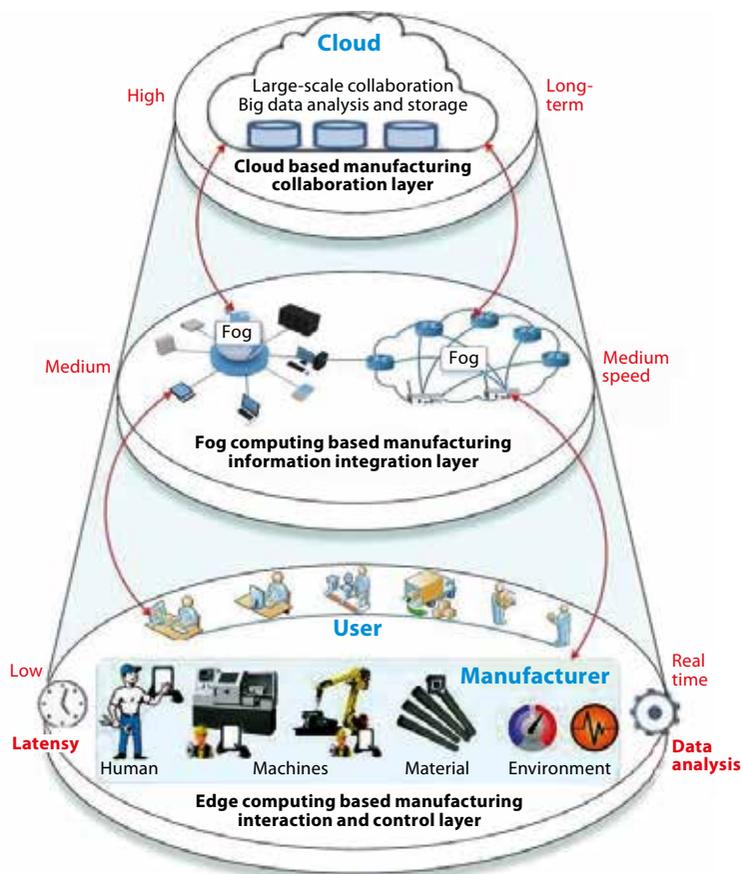


Рис. 2. Упрощенное видение архитектуры, основанной на граничных, туманных и облачных вычислениях

Для расширения возможностей интеллектуальных производственных приложений в облачной среде и обеспечения перспектив внедрения решений, требующих очень низкой и предсказуемой задержки, предлагается упрощенное видение архитектуры, основанной на граничных, туманных и облачных вычислениях для интеллектуального производства [7]. Как показано на рис. 2, эталонная архитектура включает в себя три уровня.

ПоТ состоит из граничных, туманных (FOG) и облачных архитектурных слоев, которые дополняют друг друга. Туманные вычисления используют централизованную систему, которая взаимодействует с промышленными шлюзами и встроенными компьютерными системами в локальной сети, тогда как граничные выполняют большую часть обработки на встроенных платформах, непосредственно взаимодействующих с датчиками и контроллерами.

Граничные вычисления предлагают множество преимуществ по сравнению с традиционными архитектурами, например оптимизацию использования ресурсов в системе облачных вычислений. Выполнение операций на границе сети снижает сетевой трафик, что минимизирует риск возникновения узких мест. Граничные вычисления также повышают безопасность, шифруя данные ближе к ядру сети и оптимизируя те, которые находятся дальше от него для повышения производительности. Контроль очень важен для периферийных вычислений в промышленных средах, поскольку для обработки информации требуется двунаправленный процесс. Встроенные системы могут собирать сведения на границе сети в режиме реального времени и обрабатывать их перед передачей в вычислительную среду более высокого уровня.

Предприятия нашей страны отстают от мировых лидеров в вопросе производительности труда. Применение технологий промышленного Интернета вещей может стать одним из факторов, способных это изменить. Внедрение ПоТ приведет к ускорению цифровизации экономики, усилению контроля и экономии в расходовании ресурсов, создаст более комфортные условия проживания в стране и благоприятный климат для внешних и внутренних инвесторов. Ключевым фактором, препятствующим развитию промышленного Интернета вещей в Беларуси, является отсутствие единых стандартов ПоТ. Задача научно-исследовательских предприятий сегодня – стандартизация подходов и формирование методологий внедрения технологий ПоТ. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. В. Трачук, Н. В. Линдер. Инновации и производительность: эмпирическое исследование факторов, препятствующих росту методом продольного анализа // Управленческие науки. (2017) Т. 7, №3. С. 43–58.
2. Bauer H., Patel M., Veira J. The Internet of Things: sizing up the opportunity. New York (NY): McKinsey & Company // <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/ourinsights/the-internet-of-things-sizing-up-the-opportunity/>.
3. Geissbauer R., Schrauf S., Koch V. et al. (2014) Industry 4.0 – Opportunities and Challenges of the Industrial Internet assessment / PricewaterhouseCoopers // www.pwc.nl/en/assets/documents/pwcindustrie-4-0.pdf.
4. «Индустрия 4.0»: создание цифрового предприятия (2016) / PricewaterhouseCoopers // www.pwc.ru/ru/technology/assets/global_industry-2016_rus.pdf.
5. Российский рынок межмашинных коммуникаций и Интернета Вещей по итогам 2019 г., прогноз до 2025 г. // json.tv/ict_telecom_analytics_view/rossiyskiy-rynok-mejmachinnyh-kommunikatsiy-i-interneta-veschey-po-itogam-2019-goda-prognoz-do-2025-goda-20200717045903.
6. Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies, (2020) Günther Schuh, Reiner Anderl, Roman Dumitrescu, Antonio Krüger, Michael ten Hompel, National Academy of Science and Engineering // <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity>.
7. A Smart Manufacturing Service System Based on Edge Computing, Fog Computing and Cloud Computing, (2019), Qinglin Qi, and Fei Tao, DOI/ACCESS.2019.2923610.
8. Industrial Cybersecurity, (2018), Frost & Sullivan, RESEARCH CODE: K617-01-00-00-00SKU: IA01628-GL-MR_25883.
9. Gustavo Caiza, Morelva Saeteros, William Oñate, Marcelo V. Garcia (2020) Fog computing at industrial level, architecture, latency, energy, and security: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03706>.
10. Palattella M.R., Thubert P., Vilajosana X., Watteyne T., Wang Q. and Engel T., Internet of Things. IoT Infrastructures: Second International Summit, 2016.
11. Xu L.D., He W. and Li S., Internet of things in industries: A survey, IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014.
12. Wollschlaeger M., Sauter T. and Jasperneite J., The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0, IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 11, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2017.
13. He W. and Xu L., A state-of-the-art survey of cloud manufacturing, Int. J. Comput. Integr. Manuf., vol. 28, no. 3, pp. 239–250, 2015.
14. O'Donovan P., Leahy K., Bruton K. and D. T. J. O'Sullivan, An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities, J. Big Data, vol. 2, no. 1, Nov. 2015.
15. Qu S.P. Lei Z.Z. Wang D.X. Nie X. Chen and G.Q. Huang, IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 84, no. 1, pp. 147–164, Apr. 2016.
16. Pease S.G. et al., An intelligent real-time cyber-physical toolset for energy and process prediction and optimisation in the future industrial internet of things, Future Gener. Comput. Syst., vol. 79, pp. 815–829.
17. Szymanski T.H., Supporting consumer services in a deterministic industrial internet core network, IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 6, pp. 110–117, Jun. 2016.
18. Weyrich M. and Ebert C., Reference architectures for the internet of things, IEEE Softw., vol. 33, no. 1, pp. 112–116, Jan./Feb. 2016.
19. X. Jia, Q. Feng, T. Fan and Q. Lei, Rfid technology and its applications in internet of things (IoT), Proc. 2nd Int. Conf. Consum. Electron. Commun. Netw., pp. 1282–1285, 2012.
20. Domingo M.C., An overview of the internet of things for people with disabilities, J. Netw. Comput. Appl., vol. 35, no. 2, pp. 584–596, 2012.
21. Atzori L., Iera A. and Morabito G., The internet of things: A survey, Comput. Netw., vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

Полный список использованных источников размещен

 http://innosfera.by/2022/03/digital_transformation