



## СЕНСОРНЫЕ СЕТИ ДЛЯ INDUSTRY 4.0

Н.А. Захаров (МТУСИ, НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)

*Рассмотрено применение беспроводных сенсорных сетей для решения различных задач в промышленности. Показан подход к созданию интуитивно понятного человеко-машинного интерфейса с дополнительной функциональностью обеспечения безопасности персонала. Описана система диагностики подвижного оборудования. Рассмотрено применение программно-конфигурируемых сетей. Показана интеграция сенсорной сети со средой облачных вычислений. Рассмотрена организация диагностики датчиков, объединенных сенсорной сетью.*

*Ключевые слова: Industry 4.0, сенсорная сеть, Industrial Internet of Things, человеко-машинный интерфейс, программно-конфигурируемая сеть, киберфизическая система, диагностика, обслуживание по состоянию.*

### Введение

Понятие Industry 4.0 является синонимом четвертой промышленной революции, которая продвигает на производства новые способы взаимодействия людей, машин и данных. Industry 4.0 подразумевает интеграцию физических средств производства и виртуального мира информационных и коммуникационных технологий. Выделяют пять основных особенностей Industry 4.0 — это цифровизация, оптимизация, индивидуальное производство, автоматизация и адаптация.

Промышленные беспроводные сенсорные сети способны облегчить развертывание промышленных приложений широкого спектра, включая мобильные решения, которые объединяют мобильных роботов, транспортные средства, изделия и персонал. Сенсорные сети эффективно интегрируются со средой облачных вычислений, что позволяет привлекать значительные вычислительные ресурсы для решения сложных задач диагностики и оптимизации.

### Исследование человеко-машинного взаимодействия

Подключение мобильных устройств к сенсорной сети для организации человеко-машинного взаимодействия описано в [1]. Исследование выполнено с целью создания социально стабильных предприятий и устранения социальных потрясений при переходе к цифровым производствам. В условиях цифровизации производства требуется умный и квалифицированный оператор (Оператор 4.0), взаимодействующий с машинами, роботами и киберфизическими системами. В рамках исследования создан прототип завода с эмуляцией различных сценариев «умного» производства. На предприятии развернута среда туманных вычислений, к которой входит шлюз с сетью Bluetooth Low Energy (BLE). Через этот шлюз в производственную систему передаются данные от средств индивидуальной защиты и диагностики, выдаваемых персоналу.

В рамках реализуемого проекта предлагается оснастить оператора на производстве «интеллектуальным» брасле-

том. В браслет встроены трехосевые гироскоп, акселерометр и магнитометр, а также датчики пульса и давления. Датчик пульса используется для оценки эмоционального состояния оператора. Считается, что оператор испытывает стресс, если пульс становится на 16 % чаще обычного. Вместе с браслетом оператору могут быть предоставлены шумозащитные наушники и каска. Каска комплектуется акселерометром и датчиком давления, наушники — датчиком давления. Акселерометр служит для обнаружения ударов. Информация от акселерометра в каске и датчика пульса используются для информирования диспетчера о возможных проблемах с оператором. Датчики давления заложены в систему для будущих разработок. Предоставляемые оператору устройства и технологическое оборудование подключены к беспроводной ячеистой (mesh) сети, выполненной по технологии Bluetooth Low Energy.

Но информирование о нештатных ситуациях в целях обеспечения безопасности оператора представляет собой дополнительную функцию браслета. Основной же функцией является реализация человеко-машинного интерфейса, основанного на жестах. Для обращения к конкретному устройству используется двойное касание. Факт двойного касания распознается при помощи встроенного в браслет акселерометра. Ближайшее к оператору устройство, к которому осуществляется обращение, определяется по уровню сигнала. Для реализации человеко-машинного интерфейса используются следующие движения:

*закручивание* — поворот руки из нейтрального положения вправо и обратно три раза;

*осмотр* — движение руки к предмету, находящемуся на уровне пояса, поворот руки с подъемом на уровень глаз и возврат предмета в исходное положение;

*упаковка* — закрытие коробки, начинающееся с касания снизу, затем следуют касания по бокам, завершается касанием сверху;

*информирование* — три раза повторяющееся движение ладони возле любой части тела или ближайшей поверх-

ности. Используется для обращения к диспетчеру за помощью в случае опасности.

Первичная обработка сигналов датчиков выполняется в самом браслете, распознавание сигналов осуществляется в среде туманных вычислений, организованной на заводе.

Предложенное решение позволяет вовлечь в производство людей с опытом работы на обычных производствах, не обладающих знаниями новых технологий. Операторский интерфейс не имеет кнопок и не требует подготовки персонала в части цифровизации. Основанный на жестах интерфейс интуитивно понятен людям любого возраста и социального происхождения. Разработанный алгоритм распознавания движения обеспечивает быстрое обучение операторов.

#### Контроль состояния подвижного оборудования

Сенсорная сеть, используемая для контроля исправности подвижного технологического оборудования, рассмотрена в [2]. Подвижной мостовой кран оснащен датчиками вибрации с целью обнаружения неисправностей и предотвращения аварий. Кроме того, кран оснащен ПЛК, подключенным к удаленному серверу, что делает возможным мониторинг критических параметров крана и контроль его работы в реальном времени. Доступ к серверу предоставляется пользователям без ограничений по местонахождению, а не ограничивается пультом машиниста крана. До разработки системы непрерывное измерение таких важных для диагностики параметров, как вибрация и температура подшипников главного привода, а также редуктора не осуществлялось. Использование в условиях подвижного мостового крана проводов для подключения датчиков и передачи данных сопряжено с риском их обрыва и потери информации. Более практичным является использование беспроводных технологий.

Предложено две конфигурации системы. В первой конфигурации контроллер, базовая станция беспроводной сети и компьютер для граничных вычислений объединены проводной сетью Ethernet через Wi-Fi роутер. Роутер обеспечивает компьютер информацией от датчиков и ПЛК. Компьютер по протоколу Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) через Wi-Fi передает данные в локальную сеть предприятия, а оттуда в облако. Протокол MQTT работает поверх TCP/IP, он ориентирован на применение в Internet вещей (IoT), характеризуется невысокой нагрузкой на коммуникационные каналы, работоспособен в условиях частой потери связи. В облачной среде выполняется анализ полученных данных с использованием предопределенных алгоритмов, по его результатам пользователям системы направляются уведомления и рекомендации. Пользователи могут получить доступ к данным из любого географического местоположения при условии наличия у них соответствующих прав.

Вторая конфигурация предложена для случая отсутствия сети Wi-Fi на предприятии. В этой ситуации к роутеру подключается 4G LTE модем, данные передаются в об-

лако по сети сотовой связи. В остальном система устроена и работает аналогично первому варианту. В перспективе предполагается разработка унифицированного решения — при наличии сети Wi-Fi связь будет осуществляться через Wi-Fi, при ее отказе или отсутствии будет осуществлен переход на 4G LTE.

#### Программно-конфигурируемые сети

Внедрение промышленного Internet вещей в современных производственных системах сталкивается с проблемами и вызовами на уровне организации информационного взаимодействия. В контексте Industry 4.0 все типы оборудования и устройств должны эффективно работать совместно. Для традиционных сетей, если нужно обеспечить новый механизм взаимодействия, следует поочередно обновить коммуникационные протоколы во всех связанных устройствах. Поэтому требуются новые методы для быстрого управления и конфигурирования всех сетевых ресурсов. Эта задача решается при помощи технологии программно-конфигурируемых сетей.

В [3] описан прототип платформы гибкого производства на основе программно-конфигурируемой сети, выполнен анализ его архитектуры, представлены функции и характеристики каждого уровня.

Четырехуровневая архитектура прототипа включает: промышленные машины и оборудование, сетевую инфраструктуру, облачные технологии, терминалы. На уровне оборудования в рассматриваемом решении представлены автоматические транспортные средства (беспилотники), манипуляторы, гибкие конвейерные системы, производственное оборудование, средства автоматизации складов.

Сетевая инфраструктура прототипа построена на беспроводных сетях, технологии ближней бесконтактной связи (NFC) (для связи с оборудованием радиочастотной идентификации (RFID)), с использованием промышленного Ethernet, Internet и т. д.

Облачная среда обеспечивает хранение большого объема данных, некоторые простые операции анализа данных (data mining), реализует вычисления для оптимизации производства и принятия решений, например, для задач планирования заказов, оптимальной загрузки оборудования гибкой конвейерной системы и др.

Облачная среда развернута на пяти серверах. Программное обеспечение облака базируется на платформе для серверной виртуализации и управления гипервизором Citrix XenServer 6.5 и Apache Hadoop. Последнее представляет собой программную библиотеку, которая действует как фреймворк<sup>1</sup>, позволяющий распределять обработку больших массивов данных между кластерами компьютеров с использованием простых моделей программирования. Для хранения данных используется система баз данных MySQL.

Терминалы используются для отображения соответствующей информации и ключевых данных с помощью Web-страниц, приложений обмена сообщениями или электронной почты. Они предназначены для эффективного

<sup>1</sup> Фреймворк - программное обеспечение, облегчающее разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта.

взаимодействия работников и руководства с системой. Уровень терминалов формируют большие жидкокристаллические экраны, смартфоны и компьютеры. Структура отображаемого и передаваемого контента может быть настраиваться в соответствии с потребностями пользователей и производства.

Программно-конфигурируемая сетевая архитектура разделена на три уровня: физической инфраструктуры, управления и прикладного уровня. Уровень физической инфраструктуры образуют сегменты сети устройств нижнего уровня (устройства, связанные интегрированной беспроводной сетью и полевыми шинами, например, EtherCAT), сети роботов, основной коммуникационной сети (например, шлюз, базовые станции, коммутаторы или маршрутизаторы), сети облачной инфраструктуры и т. д. Информация может передаваться от одного устройства к другому в режиме реального времени. Кроме того, пропускная способность каждого сегмента сети и требования к производительности в реальном времени могут изменяться в зависимости от различных приложений, это может динамически определяться на уровне управления.

Уровень управления реализует взаимодействие между прикладным уровнем и уровнем физической инфраструктуры. На этом уровне реализуется управление физическим оборудованием (например, сетью роботов, полевой шиной) и выполняется настройка его различных функций в соответствии с требованиями к производительности. В то же время уровень управления может предоставлять информацию (например, коэффициент использования оборудования) прикладному уровню через программный системный интерфейс и интерфейс прикладного программирования API. Уровень управления может настраивать предоставляемые услуги в соответствии с требованиями приложения путем сбора, передачи и обработки данных.

На прикладном уровне предоставляемые API-интерфейсы используются для разработки различных прикладных приложений (например, мониторинг неисправностей оборудования, мониторинг коэффициента использования оборудования и мониторинг состояния обработки продукта). Кроме того, наличие API-интерфейсов позволяют разработчикам ускорить разработку новых приложений, настроив сбор, передачу и обработку данных. Таким образом, аппаратные ресурсы могут быть легко разделены, производительность системы может быть оптимизирована, а затраты на проект могут быть снижены.

Для отработки прототипа платформы программно-конфигурируемой сети разработан стенд, включающий разнообразное физическое оборудование, такое как облачный центр обработки данных, промышленный робот, автоматическое транспортное средство, беспроводную сеть, RFID-считыватель, конвейер, заготовки и т. д.

Для оценки характеристик программно-конфигурируемой сети проведено ее сравнение с другими традиционными схемами. Применение программно-конфигурируемого PoT позволило предоставлять более интеллектуальные сервисы за счет эффективного взаимодействия между компонентами. В традиционных схемах отсутствие взаимодействия между устройствами приводит к снижению

возможностей принятия решений устройствами автономно. Например, одновременно на конвейере может обрабатываться только один тип продукции.

Поскольку данные от обрабатываемых заготовок, конвейера и промышленного робота собираются в режиме реального времени, то эта информация может использоваться различными единицами оборудования для поддержания автоматической работы производственной линии. Так, с использованием программно-конфигурируемой сети можно обрабатывать два вида заготовок одновременно, в то время как традиционные схемы не обеспечивают для этого достаточно гибкой настройки. Эксперименты на стенде показали, что применение программно-конфигурируемой сети ведет к повышению коэффициента использования оборудования и снижению потребления электроэнергии.

#### Киберфизическая производственная система

В [4] производственная линия интегрируется с облачной средой, в результате чего получается киберфизическая система. Для управления гетерогенными производственными устройствами используется программная архитектура модульного расширяемого программного обеспечения на основе OSGi framework. OSGi (Open Services Gateway Initiative) - спецификация динамической модульной системы и сервисной платформы для Java-приложений, разрабатываемая консорциумом OSGi Alliance. Данная спецификация определяет модель построения приложения из компонентов, которая динамически может связывать различные модули. Состав компонентов может изменяться во время выполнения приложения (run-time). Взаимодействие между компонентами осуществляется с помощью сервисов, которые зарегистрированы в регистре сервисов (Service Register). Таким образом, технология OSGi определяет сервис-ориентированную платформу построения приложений с поддержкой модульности.

Производственная линия — это физическая система, контролируемая физической сенсорной сетью. Целью предложенной киберфизической системы является интеграция физической системы в виртуальную среду. Сбор данных может осуществляться двумя различными способами: использованием интерфейса ПЛК с промышленными протоколами и применением беспроводной сенсорной сети, подключаемой к облачной среде через шлюз. Эта гибкость требуется для облегчения внедрения сенсорной сети в различных промышленных приложениях. Беспроводная сенсорная сеть будет простым решением во многих случаях, когда затруднительно добавлять новые датчики в электрическую схему физической системы, например, производственной линии. Использование сенсорных сетей также эффективно для интеграции физических датчиков в среду облачных вычислений. Рассматриваемая архитектура охватывает производственную линию, контролируемую беспроводной сенсорной сетью, и шлюз, поддерживающий двунаправленную связь со средой облачных вычислений.

Шлюз — это устройство, соединяющее интерфейс ПЛК с облачной средой. Связь ПЛК со шлюзом осу-

ществляется по таким промышленным протоколам, как PROFIBUS, PROFINET, Modbus, EtherCAT и т. д. Современные ПЛК также могут передавать большие файлы через FTP, электронную почту и т. д. Шлюз может быть определен как устройство для управления двунаправленным обменом данными между облачной средой и физической системой с датчиками, машинами и оборудованием. Другой важной особенностью шлюза является интеграция, взаимосвязь и взаимодействие с несколькими датчиками. Узел шлюза может взаимодействовать с датчиками той же производственной линии или из других систем, поэтому он должен реализовывать гибкий механизм для повышения эффективности и безопасности обмена данными.

Необходимым инструментом цифровизации предприятий является облачная среда. Концепция облачных вычислений включает хранение данных на внешних ресурсах и сервисы анализа данных, моделирования и визуализации. Применительно к умному производству облачные вычисления позволяют хранить и обрабатывать на нескольких интеллектуальных устройствах данные, полученные от уровня технологического процесса. Другим их преимуществом является возможность обрабатывать большие данные без типичных проблем и ограничений, связанных с оборудованием, поскольку облачные серверы обладают высокой производительностью. Анализ данных отделен от их получения, что особенно актуально при работе с несколькими производственными линиями, когда для каждой линии могут требоваться свои алгоритмы. Может быть использовано большинство известных алгоритмов машинного обучения.

Рассмотренная архитектура была протестирована на линии по изготовлению металлических фильтров компании SIFIM Srl (Ези, Италия), специализирующейся на изготовлении фильтров для бытовой техники и оборудования предприятий общественного питания.

Основные цели, которые требовалось достичь на этапе испытаний:

- мониторинг состояния производственной линии;
- интеграция новых пакетов (бандлов) в OSGi Framework и новый коммуникационный протокол в режиме plug and play;
- формирование политики передачи данных (скорость их получения от ПЛК и отправки в облако).

Основными переменными, используемыми для расчета показателей производительности и организации технической поддержки, являются: время цикла, ожидаемое среднее время цикла, код продукта, флаг старта/останов, предупредительная и аварийная сигнализации, годное изделие, бракованное изделие, основные задействованные приводы (двигатели, насосы и т. д.).

По итогам обработки полученных данных рассчитаны численные показатели эффективности производственной линии, проанализированы причины остановов.

*Между наукой и жизнью существует  
теснейшая, неразрывная связь: чем  
более наука служит жизни, тем более  
жизнь обогащает науку.*

Г.В. Плеханов

Результаты предварительных испытаний показывают, что с помощью предлагаемой инфраструктуры, реализованной для управления данными, облачными и физическими устройствами, можно получить всю информацию, связанную с производственной линией. Через Web-приложение, доступное из любого браузера, также можно управлять такими данными, как смены операторов, производственные расписания и различная документация. Все данные в облачном хранилище были использованы для определения индивидуальных услуг для фирмы.

#### Оценка достоверности показания датчиков

Для предприятий Industry 4.0 общепринятым подходом является эксплуатация оборудования по состоянию. Своевременное выявление отклонений параметров от нормы является необходимой предпосылкой для значительного сокращения времени простоя техники и эффективного управления ресурсами для ремонта неисправных компонентов. Прогнозирование поведения оборудования зависит от точного сбора данных с установленных на нем датчиков. Отсюда следует актуальность оценки достоверности их показаний. Все решения по техническому обслуживанию и контролю хороши настолько, насколько достоверны данные датчиков, на которых они основаны. Современные алгоритмы прогнозирования технического обслуживания, как правило, основаны на предположении, что показания датчиков точны и надежны, что часто не соответствует действительности.

В [5] предлагается подход к динамическому моделированию сенсорной сетевой системы использующий дискретно-временные цепи Маркова и средство проверки вероятностных моделей PRISM<sup>2</sup> ([www.prismmodelchecker.org](http://www.prismmodelchecker.org)). Подход позволяет обнаруживать неисправности при работе датчиков. Входные данные для создания модели - начальная матрица вероятности перехода цепи Маркова - задаются экспертом. Затем модель эволюционирует с течением времени, поскольку система постоянно изучает поведение датчиков с помощью анализа накопленных данных. Собранные с датчиков данные сравниваются с их нормальным поведением, используя методы анализа временных рядов и оценки, так что любое отклонение от нормы может быть обнаружено в реальном времени. Как только обнаруживается неисправность датчика, матрица переходов базовой модели обновляется с учетом меньшей уверенности в достоверности данных датчика. По сути, это означает, что

<sup>2</sup> PRISM - программный инструмент формальной проверки для моделирования и анализа систем, демонстрирующих вероятностное поведение. Одним из источников таких систем является использование рандомизации, например, в протоколах связи, таких как Bluetooth и FireWire, или в протоколах безопасности, таких как Crowds и Onion routing. Стохастическое поведение также возникает во многих других компьютерных системах, например, из-за отказов оборудования или непредсказуемых задержек связи.

модель постоянно обновляется в реальном времени для получения соответствующей вероятности переходов состояний. Отслеживаются как показания датчиков, так и их прогноз для сравнения и проверки. Это позволяет оценивать надежность системы во время работы и прогнозировать ее потенциальные сбои. По уровню шума, отклонению от расчетного значения, дрейфу показаний оценивается количественный показатель достоверности каждого датчика.

Рассмотренный в [5] подход применен к токарно-фрезерному станку NTX1000, оснащенный сенсорной сетью для контроля состояния главного шпинделя и режущего инструмента. Сенсорная сеть состоит из трех типов датчиков, а именно, датчиков силы тока, вибрации и температуры.

#### Заключение

Сенсорные сети совместно с промышленным Internet вещей являются эффективным инструментом построения предприятий Industry 4.0. Они обеспечивают интеграцию человека в производственный процесс, при этом реализуется интуитивно понятный человеко-машинный интерфейс и позволяют принимать дополнительные меры обеспечения безопасности работника за счет контроля его состояния. Устройства с беспроводным интерфейсом удобны для установки на подвижном оборудовании. Также ими удобно оснащать действующие объекты, поскольку не требуется прокладка дополнительных коммуникационных линий. Современный уровень

развития сенсорных сетей и смежных технологий позволяет повышать эффективность работы предприятия за счет использования программно-конфигурируемых сетей. Взаимодействие сенсорной сети со средой облачных вычислений дает возможность применять сложные ресурсоемкие алгоритмы диагностики и оптимизации.

#### Список литературы

1. Garrido-Hidalgo C., Hortelano D., Roda-Sanchez L., Olivares T., Ruiz M. C., Lopez V. IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0 // IEEE Access, vol. 6, pp. 28417-28437, 2018.
2. Singh K.A., Chatterjee K.R., Khemani V. Remote Monitoring of Critical Systems in Overhead Cranes Using Wireless Data Telemetry // IEEE Midwest Industry Conference (MIC), Champaign, IL, USA, 2020, pp. 1-5.
3. Wan J. et al. Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0 // IEEE Sensors Journal. 2016. vol. 16, no. 20, pp. 7373-7380.
4. Prist M. et al. Cyber-Physical Manufacturing Systems for Industry 4.0: Architectural Approach and Pilot Case. 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), Naples, Italy, 2019, pp. 219-224.
5. Xin X., Keoh S. L., Sevegnani M., Saerbeck M. Dynamic Probabilistic Model Checking for Sensor Validation in Industry 4.0 Applications // IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). 2020. Beijing, China, pp. 43-50.

**Захаров Николай Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теория электрических цепей» МТУСИ, зам. руководителя научно-производственного подразделения «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ». Контактный телефон (495) 640-09-47. E-mail: nazakharov@npp-dozor.ru

#### От щелчков к волнам, инновации в области взаимодействия с машинами

Инновации в таких областях, как машинное зрение, пространственное восприятие и искусственный интеллект открывают возможности для создания новых способов человеко-машинного взаимодействия.

Управление жестами - это один из новых способов взаимодействия с компьютером без щелчков и прикосновений. Технология использует комбинацию датчиков, камер, лазеров и инфракрасного излучения для определения конкретных движений пользователя. Затем программное обеспечение переводит эти изображения в действия устройства.

Распознавание жестов все еще находится в стадии разработки, но к 2025 г. его стоимость может достигнуть 30,6 млрд. долл. США во всем мире. Управление жестами может иметь целый ряд приложений, упрощая опыт работы человека с домашними компьютерами и смартфонами. Это может даже позволить инженерам или дизайнерам интуитивно управлять 3D-объектами на экранах или в среде виртуальной реальности.

Глобальная пандемия COVID-19 также демонстрирует особенно убедительное использование управления жестами: возможность доступа к компьютерам, не касаясь их, означает снижение риска физического распространения

микробов. Технология RealSense Touchless от Intel делает эту функциональность возможной благодаря камере, которая использует компьютерное зрение для плавного преобразования сенсорного взаимодействия в бесконтактное, обеспечивая гигиеничный доступ к общедоступным и частным экранам.

Распознавание голоса - это еще одна форма взаимодействия с компьютером без помощи рук. Уже широко доступные умные помощники для домашних хабов, такие как Amazon Alexa, стали обычным явлением в домах по всему миру.

Некоторые исследования показывают, что в ближайшие пять лет распознавание голоса станет функцией почти во всех приложениях. Например, более совершенная технология распознавания голоса может усилить биометрические меры безопасности. Это также может обеспечить большую доступность технологий для пользователей с ослабленным зрением или других лиц, которые не могут касаться экрана и проводить пальцем по экрану.

Intel заключила партнерское соглашение с Amazon, чтобы создать Intel Speech Enabling Developer Kit, помогающий разработчикам создавать приложения для большего числа устройств с голосовым управлением.

[Http://intel.com](http://intel.com)