

## ВАЛИДАЦИЯ СЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ INDUSTRY 4.0

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

*Рассмотрена организация валидации сетевой инфраструктуры приложений Industry 4.0, включая эмуляцию каналов беспроводной сети на ПЛИС, тестирование алгоритмов синхронизации узлов PCU на стенде размером 50×10 км с оптоволоконными линиями связи. Представлена международная платформа 5G EVE для валидации решений 5G в масштабах вертикально интегрированных компаний.*

*Ключевые слова: Industry 4.0, валидация, беспроводные сети, 5G, синхронизация.*

### Введение

Технологии четвертой промышленной революции (Industry 4.0) активно используют децентрализацию выполняемых задач и функций, что приводит к требованию обеспечения обмена данными в режиме реального времени. Соответственно, для приложений Industry 4.0 приобретает актуальность задача валидации решений по построению сети, протоколам обмена, синхронизации узлов PCU. Под валидацией понимается проверка соответствия предлагаемого продукта, технологии, инженерного решения и т.д. предъявляемым требованиям. Валидация всех составляющих проекта Industry 4.0 на этапе внедрения приведет к затягиванию сроков его сдачи, а в случае выявления при этом недостатков их устранение обойдется намного дороже, чем на более ранних этапах выполнения проекта. Далее рассмотрим подходы к валидации решений по построению сетевой инфраструктуры объекта Industry 4.0 до ее развертывания на промышленной площадке.

### Эмуляция беспроводной сети в лаборатории

В приложениях Industry 4.0 большую роль играет беспроводная связь. В будущем беспроводные промышленные сети будут преобладать над проводными, поскольку они легко обеспечивают связь с мобильными объектами, а добавление устройств в сеть не зависит от кабельного плана и разъемов. Такое решение позволяет реализовать модульность и мобильность на предприятии. Однако присутствующие на производстве электромагнитные помехи и препятствия для распространения радиоволн затрудняют применение беспроводных коммуникаций в управлении технологическим процессом [1].

В работе [1] для валидации беспроводных сетевых решений предлагается использовать эмуляторы каналов связи, построенные на основе ПЛИС (FPGA) или заказных микросхем (ASIC). Пример реализации эмулятора на ПЛИС приведен в [2]. Имеется два типа эмуляторов. Первый работает во временной области. Он основан на модели линии задержки с ответвлениями. Хотя концептуально это очень простая модель, быстрое вычисление изменяющихся во времени по сложным законам коэффициентов является нетривиальной задачей. Для адаптации модели в соответствии с реальными характеристиками канала используются различные стохастические методы.

Второй тип работает в частотной области. Для эмуляции используются быстрое преобразование

Фурье и обратное быстрое преобразование Фурье. Основным его недостатком является невозможность внесения задержек в доставку сигнала.

Методика валидации в лаборатории промышленных беспроводных коммуникаций опирается на следующую информацию:

1) информация о промышленном приложении, в котором будет использоваться беспроводная связь. Она устанавливает ограничения с точки зрения задержки, скорости передачи данных и устойчивости к ошибкам. Эти ограничения задают параметры, которые должны быть измерены в ходе выполнения тестов валидации;

2) свойства каналов связи в условиях промышленного предприятия. Для их измерения выполняется зондирование каналов связи на объекте. Исследуются время прохождения сигнала, затухание, эффекты, связанные с отражением от зданий и препятствий и т.д.;

3) подробная информация о беспроводной системе связи, находящейся в процессе валидации, чтобы определить самый глубокий слой модели OSI, к которому можно получить доступ. Информация о доступных слоях модели OSI позволяет выбирать различные уровни взаимодействия сетевых устройств друг с другом.

Предлагаемая в [1] методика валидации состоит из следующих шагов:

1) измеряются характеристики канала на объекте;

2) на основе собранных данных о канале строится его математическая модель. Если она известна заранее, шаги 1 и 2 можно пропустить;

3) математическая модель канала загружается в его эмулятор;

4) в условиях лаборатории узлы сети подключаются к эмулятору канала, и путем обмена случайными наборами данных выполняется тестирование коммуникационной системы;

5) с использованием сетевых узлов и вспомогательных устройств (векторные анализаторы, осциллографы и т.д.) выполняются требуемые измерения;

6) если результаты измерений удовлетворяют требованиям приложения, коммуникационная система считается прошедшей валидацию.

В ходе валидации следует рассмотреть три аспекта: время передачи, ошибки пересылки и производительность.

### Время передачи

Этот аспект обязателен для приложений автоматизации технологических процессов и производств.

Измеряемые параметры — время прихода сигнала, средняя задержка доступа, задержка при пересылке и задержка при пересылке, связанная с подтверждением приема. Рассмотрим эти параметры подробнее.

1. Время прихода сигнала (time of arrival—ToA) — это время прохождения сигнала в среде от передатчика к приемнику. Обычно это время в условиях производства пренебрежимо мало.

2. Средняя задержка доступа — это время, в течение которого беспроводный узел ожидает после передачи данных на уровень канала (media access control — MAC) до момента, когда данные будут пересланы и канал освободится.

3. Задержка при пересылке (one-way delay — OWD) — это время, требуемое пакету данных для прохождения через сеть, которая может содержать несколько промежуточных узлов. Задержка, связанная с подтверждением приема (round-trip delay — RTD) отличается от предыдущего параметра тем, что отсчет времени заканчивается, когда передатчик получает пакет квитирования.

#### *Ошибки пересылки*

Измеряемый параметр — вероятность ошибки на пакет (packet error rate — PER). Определяется как отношение принятых с ошибками пакетов к общему числу переданных пакетов.

#### *Производительность*

Производительность определяется на прикладном уровне (Application layer) как количество успешно переданной по сети информации в единицу времени. Для ее измерения требуется пересылка значительного объема данных.

Предложенный подход к валидации беспроводной коммуникационной системы в лаборатории является выгодной альтернативой испытаниям на промышленной площадке. Испытания в полевых условиях характеризуются сложной логистикой, значительными финансовыми и временными затратами.

#### **Стенд для валидации алгоритмов синхронизации**

Среди важнейших требований, предъявляемых к узлам сетевой инфраструктуры Industry 4.0, является работа в едином для всей сети времени. Синхронизация требуется для определения и регистрации значений времени происходящих событий, сбора данных и обмена ими, инициации управляющих воздействий и т. д. [3, 4]. Вне помещений синхронизация может быть реализована на основе GPS. В производственных помещениях прием сигналов со спутников часто невозможен, поэтому требуются другие решения. Примеры подходов к синхронизации узлов РСУ приведены в [5–7].

На синхронизацию влияют отклонения от идеальных свойств узлов, каналов связи и окружающей среды. Для узла РСУ следует учитывать такие

аспекты, как разрешение и стабильность тактовой частоты, задержка пакетов между процессором и радиомодулем и задержки, обусловленные временем обработки. При анализе влияния на синхронизацию функционирования каналов связи следует учитывать изменяющееся время задержки доступа к каналу, время прохождения сигнала, джиттер<sup>1</sup>. Наличие помех в окружающей среде (например, промышленных помех) может привести к высокой частоте ошибок пакетов и повторных передач пакетов, что может снизить производительность и затруднить синхронизацию.

Для отработки и валидации алгоритмов синхронизации в статье [8] предложен распределенный стенд, состоящий из четырех сетевых узлов, расположенных в вершинах прямоугольника размером 50 x 10 км. Такой размер достигнут за счет размещения узлов в различных зданиях кампуса университета Кассино (Италия). По сторонам прямоугольника проложены оптоволоконные линии связи, по диагоналям организованы виртуальные каналы связи.

Сетевые узлы реализованы на микроконтроллерах Raspberry Pi 3b+. Каждое устройство имеет несколько сетевых интерфейсов: два порта Ethernet, позволяющих соединить узлы в кольцо, Bluetooth с низким энергопотреблением (Bluetooth Low Energy—BLE), Wi-Fi для подключения внешних устройств и порт приемника GPS для получения точного времени, требуемого для оценки эффективности алгоритмов синхронизации. В сеть включен единый для всех узлов пульт управления, обеспечивающий удаленное конфигурирование микроконтроллеров Raspberry и управление ими. С этого пульта задаются следующие параметры передачи данных от одного узла к другому в прямом и обратном направлении:

- статическая задержка в диапазоне 0...1000 мс;
- джиттер (отклонение задержки от среднего значения, определяемого статической задержкой) в диапазоне 0...1000 мс;
- доля потерянных пакетов 0...100%;
- доля поврежденных пакетов (пакетов, содержание которых искажено так, что принимающее устройство не может понять сообщение) 0...100%;
- Скорость передачи данных по анализируемому фрагменту сети. Максимальная скорость для Raspberry 3B+ составляет 300 Мбит/с. На представленном стенде используется скорость в пределах 100 Мбит/с. Этот параметр используется для ограничения пропускной способности сети для моделирования сценариев с низкоскоростной связью, часто встречающихся в промышленных условиях.

#### **Международная платформа 5G**

Для валидации сетевых решений 5G до их развертывания Европейской комиссией в рамках государствен-

<sup>1</sup> Джиттер или фазовое дрожание цифрового сигнала данных — нежелательные фазовые или частотные отклонения передаваемого сигнала. Возникают вследствие нестабильности задающего генератора, изменений параметров линии передачи во времени и различной скорости распространения частотных составляющих одного и того же сигнала.

*Во всем, к чему люди относятся серьезно, нужно видеть количественную сторону вещей.*

Оскар Уайльд

но-частного партнерства профинансировано создание платформы 5G EVE (5G European Validation platform for Extensive trials—Европейская валидационная платформа 5G для обширных испытаний) [9]. Она является исследовательским проектом, нацеленным на содействие повсеместному внедрению сетей 5G в Европе. Концепция 5G EVE основана на дальнейшем развитии и соединении существующих европейских площадок с целью обеспечения уникальных возможностей комплексного тестирования решений 5G. Платформа развернута в четырех местах: несколько точек во Франции, Афины в Греции, Турин в Италии и Мадрид в Испании. Каждой площадкой управляет свой сетевой оператор — Orange во Франции, OTE в Афинах, TIM в Турине и Telefonica в Мадриде. Представленная платформа ориентирована в первую очередь на поддержку приложений в следующих областях:

- интеллектуальный транспорт: интеллектуальная железная дорога на площадке 5G EVE Турин;
- интеллектуальный туризм: выставка с дополненной реальностью на площадке 5G EVE Мадрид;
- Industry 4.0: беспилотный транспорт в промышленной обстановке — на площадках 5G EVE Мадрид и Афины;
- интеллектуальные сети: обеспечение отказоустойчивости при распределенной генерации электроэнергии в интеллектуальных сетях — на площадках 5G EVE Франция и Афины;
- умный город: безопасная среда — на площадках 5G EVE Турин и Афины;
- мультимедиа и развлечения: иммерсивные технологии — на площадках 5G EVE Франция и Мадрид.

Создание комплекса 5G для вертикально интегрированных компаний требует тщательного анализа их потребностей. На основе анализа бизнес-требований компаний и связанных с ними технических требований к сети 5G спроектирована инфраструктура площадок. Выполнено проектирование сетевой архитектуры, сервисных функций, механизмов оркестровки и платформ мониторинга для сбора показателей производительности. Архитектура площадки 5G EVE включает:

- инфраструктуру радиодоступа 3GPP, в том числе программно определяемую архитектуру, управляющий и пользовательский уровни, средства интеграции стеков протоколов;
- средства межсетевое взаимодействия (LTE, LTE advanced, NB-IoT, LTE-M и 5G-NR) и не охваченные спецификациями 3GPP технологии, такие как Wi-Fi и LoRa;
- внешние подключения на физическом уровне и промежуточные протоколы;

- сервисы управления и оркестровки, самоорганизующиеся сети и сервисы.

На каждой площадке платформы 5G EVE имеется набор инструментов для тестирования и валидации пользовательских решений. 5G EVE предлагает механизмы проектирования, реализации и эксплуатации сетевых срезов и сервисов 5G в различных сегментах сети. Эти базовые сервисы дополнены набором измерительных инструментов 5G и средствами мониторинга, которые могут быть развернуты в различных частях сети 5G, и позволяют вертикально интегрированным компаниям оценивать и проверять свои новые приложения 5G, измеряя ключевые показатели эффективности повторяемым и воспроизводимым способом.

Платформа 5G EVE в состоянии обеспечить единую функциональную и операционную инфраструктуру для экспериментов вертикально интегрированных компаний. 5G EVE предоставит набор инструментов для выполнения экспериментов и регистрации их результатов с использованием единой методологии для управления испытаниями и тестами. Уровень абстрагирования в этой методологии будет скрывать сложность управления сетью и ее эксплуатации. Кроме того, платформа 5G EVE предоставляет основанный на процессах анализа данных механизм оценки производительности, гарантирующий полное использование результатов тестирования и обеспечивающий возможность получения углубленной информации по каждому испытанному варианту. Предусмотрено предоставление предложений по улучшению производительности. Портал 5G EVE предоставит экспериментаторам необходимые инструменты для оценки и простой отчетности, основанные на определенных ими требованиях и ключевых показателях эффективности.

### Заключение

Валидация различных аспектов построения сети для приложений Industry 4.0 возможна до ее развертывания на объекте. При этом могут применяться различные методы. Работа каналов связи беспроводных сетей в целях валидации может быть смоделирована на ПЛИС в лабораторных условиях. Для тестирования протоколов обмена и, в частности, алгоритмов синхронизации, реальные узлы PCU могут быть заменены дешевыми микроконтроллерами Raspberry. Для валидации сетевых решений 5G в масштабах крупной вертикально интегрированной компании в рамках государственно-частного партнерства профинансировано создание международной испытательной платформы 5G EVE. Рассмотренные решения позволяют существенно сократить сроки ввода в эксплуатацию объектов Industry 4.0 и сэкономить значительные денежные средства.

### Список литературы

1. V. Díez, A. Arriola, I. Val and M. Vélez. "Validation of RF communication systems for Industry 4.0 through channel modeling and emulation," 2017 IEEE International

- Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), Donostia-San Sebastian, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/ECMSM.2017.7945906.
2. I. Val, F. Casado, P.M. Rodriguez, and A. Arriola. "FPGA-based wideband channel emulator for evaluation of Wireless Sensor Networks in industrial environments", Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014. doi: 10.1109/ETFA.2014.7005361.
  3. D. Caprigione, G. Cerro, L. Ferrigno, V. Paciello. Time synchronization based on cmts: A performance analysis in industry scenarios, 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, 2018, pp. 83-88. doi: 10.1109/METROI4.2018.8428322.
  4. L. Ascorti, S. Savazzi, G. Soatti, M. Nicoli, E. Sisinni, S. Galimberti. A wireless cloud network platform for industrial process automation, Critical data publishing and distributed sensing, IEEE Trans. on Instr. and Meas. 66 (4) (2017) 592-603. doi: 10.1109/TIM.2016.2640579.
  5. F. Lamonaca, D. Grimaldi. Trigger realignment by networking synchronized embedded hardware, IEEE Tran. on Instr. and Meas. 62 (1) (2013) 38-49. doi: 10.1109/TIM.2012.2218058.
  6. F. Lamonaca, D. Grimaldi, R. Morello, A. Nastro. Sub- $\mu$ s synchronization accuracy in distributed measurement system by pda and pc triggers realignment, 2013 IEEE I2MTC, 2013, pp. 801-806. doi: 10.1109/I2MTC.2013.6555525.
  7. S. Rinaldi, D. D. Giustina, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni. Time synchronization over heterogeneous network for smart grid application, Design and characterization of a real case, Ad Hoc Networks 50 (2016) 41 - 57. doi: 10.1016/j.adhoc.2016.04.001.
  8. G. Cerro, L. Ferrigno, G. Miele, D. Caprigione, F. Lamonaca and D. L. Carni. "A fine-grained controlled set-up to execute time synchronization protocol tests in a distributed environment," 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), Naples, Italy, 2019, pp. 148-153. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792851.
  9. M. Gupta et al. "The 5G EVE End-to-End 5G Facility for Extensive Trials," 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Shanghai, China, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICCW.2019.8757139.

*Захаров Николай Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель,  
Научно-производственное подразделение «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ».  
Контактный телефон (495) 640-09-47.  
E-mail nazakharov@npp-dozor.ru*

#### ABB обеспечивает бесперебойное электроснабжение на предприятиях «ФосАгро»

Компания АBB оснастила предприятия компании «ФосАгро» в Череповце и Кировске современным энергоэффективным оборудованием. Комплекс работ включал внедрение быстродействующих систем автоматического ввода резерва (БАВР) на класс напряжения 6...10 кВ и цифровой подстанции АBB.

Компания АBB успешно реализовала поставки на два предприятия АО «Апатит», которое входит в группу компаний «ФосАгро». Работы велись в городах: Череповце и Кировске. Обеспечение бесперебойного и безотказного электроснабжения – основополагающая задача современных химических производств, которые стремятся к полному самообеспечению в сфере электроэнергетики.

Центральным объектом поставки на завод в Вологодской области стала цифровая подстанция АBB. Комплексный механизм цифровой подстанции базируется на распределительных устройствах UniGear ZS1, которые укомплектованы быстродействующими АВР на класс напряжения 6 (10) кВ и номинальный ток 2500 А. Также шкафы оснащены датчиками теплового контроля сборных шин и отпаяк подключения силового кабеля, моторными приводами тележек выключателя и заземлителя с функцией дистанционного видеонаблюдения за данными элементами. Благодаря цифровому решению предприятие получило возможность контролировать собственные объемы энергопотребления. Собираемые массивы данных поддаются автоматической обработке, что позволяет достичь мо-

ментальной реакции на перебои в системе. Автоматизированная система мониторинга и диагностики состояния распределительных устройств минимизирует контроль систем со стороны обслуживающего персонала. В случае возникновения аварийной ситуации оперативные действия производятся мгновенно.

Завод в Кировске также оснащен комплектом оборудования быстродействующего АВР. Комплекс предназначен для четырех вводов и двух секционных шкафов. Оборудование дооснащалось комплектом ретрофита и устанавливалось в шкафы отечественного производства. Совокупный объем поставки составили шесть выключателей VM-1T, четыре блока релейной защиты REF 542Plus с быстродействующими платами и два головных устройства (контроллера) SUE3000. Быстродействующие АВР осуществляют быстрое переключение между вводным и секционным выключателями распределительного устройства 6 (10) кВ, тем самым обеспечивая минимальный провал (отсутствие) электропитания. Это важно не только с точки зрения лишнего простоя производственного оборудования, но и также является предупредительной мерой безопасности.

Партнером АBB по проектам на заводах АО «Апатит» выступила компания «Универсал-Электрик», являющаяся генеральным подрядчиком. «Универсал-Электрик» осуществила весь комплекс мероприятий, включая проектирование, монтаж, наладку и сдачу объектов в эксплуатацию.

[Http:// www.abb.ru](http://www.abb.ru)