



# Неразрушающий контроль и вызовы четвёртой промышленной революции

Submitted 16.05.18  
Accepted 15.06.18

В статье рассмотрены основные аспекты, характеризующие происходящую в настоящее время четвёртую промышленную революцию, характеризующуюся всё большей интенсификацией применения информационных технологий в «умных» производствах. Показано влияние концепций цифровизации промышленности и необходимости создания инфраструктуры качества на формирование новых принципов построения распределённых сенсорных систем измерения в области неразрушающего контроля, использующих облачные структуры Интернета, виртуальное моделирование и агрегирование данных с использованием высокоскоростных коммуникационных систем на основе иерархически организованной системы стандартизации, утверждённых методов и виртуальных моделей, методик и технологий измерений, оценки соответствия, настроек, калибровок, испытаний и проверок при обеспечении единства измерений.

V. A. Syasko<sup>1</sup>

## Non-Destructive Testing and Challenges of the Fourth Industrial Revolution

The article deals with the main aspects characterizing the current fourth industrial revolution, characterizing the increasing intensification of the use of information technologies in "smart" industries. The influence of digital education concepts in the field of nondestructive testing using Internet cloud structures, virtual modeling and data aggregation using high-speed communication systems on the basis of a hierarchically organized standardization system, approved methods and virtual systems of models, techniques and technologies for measurement, calibration, testing and verification while ensuring the uniformity of measurements.

*Keywords: Industry 4.0, digitalization, smart enterprise, distributed measurements, quality structure, integrated NDT*

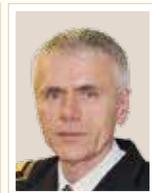
**Ч**етвёртая промышленная революция, более известная как «Индустрия 4.0», получила свое название от инициативы 2011 года о необходимости более широкого применения информационных технологий в производстве, путём превращения предприятий в «умные». Ведущие бизнесмены, политики и учёные определили её как средство повышения конкурентоспособности обрабатывающей промышленности Германии через усиленную интеграцию «киберфизических систем», или CPS, в заводские процессы. CPS — это по сути всеобъемлющий термин, который используется в разговорах об интеграции подключённых к Интернету машин и человеческого труда. При этом материальный мир соединяется с виртуальным, в результате чего рождаются новые киберфизические системы, объединённые в одну своеобразную цифровую экосистему. Роботизированное производство и «умные» заводы — один из компонентов трансформированной промышленности. Четвёртая промышленная революция означает всё большую автоматизацию абсолютно всех процес-

сов и этапов производства: цифровое проектирование изделия, создание его виртуальной копии, совместная работа инженеров и дизайнеров в едином цифровом конструкторском бюро, удалённая настройка оборудования на заводе под технические требования для выпуска конкретного «умного» продукта, контроль параметров и стабильности технологических процессов на всех этапах производства, автоматический заказ необходимых компонентов в нужном количестве, контроль их поставки, мониторинг пути готового продукта от склада на фабрике до магазина и до конечного клиента.

Ключевыми принципами Индустрии 4.0 являются:

- совместимость, что означает способность машин, устройств, измерительных преобразователей и людей взаимодействовать и общаться друг с другом через Интернет;
- прозрачность, которая достигается в результате такого взаимодействия. В виртуальном мире создаются цифровые модели реальных объектов, систем и их функций. В результате накапливается информация обо всех

**СЯСЬКО Владимир Александрович**  
Профессор кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный», генеральный директор ООО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н.  
Научные интересы: контроль физико-механических характеристик микро- и наноструктурированных материалов



процессах, которые происходят с оборудованием, «умными» продуктами, производством в целом и т. д. Для этого, в том числе, требуется обеспечить возможность сбора всех этих данных с измерительных преобразователей (сенсоров и датчиков) при учёте контекста, в условиях которого они генерируются;

- техническая поддержка, в результате которой компьютерные системы помогают людям принимать решения благодаря сбору, анализу и визуализации информации, о которой говорилось ранее;
- децентрализация управленческих решений, делегирование некоторых из них киберфизическим системам с постепенным полным замещением людей.

Это предполагает «совершенно новый подход к производству», как отметила в отчёте Industrie 4.0 Working Group [1], группа крупных промышленников, экспертов в области искусственного интеллекта, экономистов и учёных. Немецкое правительство поддерживает эту идею и принимает «высокотехнологичную стратегию» для подготовки

нации. В целом Индустрия 4.0 должна и уже постепенно захватывает весь мир. США последовали примеру Германии и создали некоммерческий консорциум Industrial Internet в 2014 году, которым руководят лидеры промышленности, такие как General Electric, AT&T, IBM и Intel.

Сегодняшнее развитие во многом превзошло цели производства, которые прогнозировались в 80-е гг. прошлого столетия, в основном вследствие стремительного развития уникальных, ранее не существовавших технологий, особенно в области аналого-цифровой и цифровой обработки информации, в том числе виртуальной, а также сверхскоростных каналов передачи данных.

В настоящее время имеется специализированное аппаратное обеспечение для задач машинного обучения и обработки больших потоков данных, доступны недорогие цифро-аналоговые и аналого-цифровые малогабаритные интеллектуальные интегральные измерительные преобразователи самого различного назначения, компьютерные сети со встроенной цифровой связью и интеллектуальной предварительной обработкой данных, на порядки более мощные, чем в 1980-х годах. Наличие недорогих мощных вычислительных технологий и технологий хранения информации привело к переходу от анализа данных, основанного на моделях и знаниях экспертов, к сложнейшим высокопроизводительным искусственным нейронным сетям и методам безмодельного анализа, базирующихся на огромных наборах данных и специализированной компьютеризированной аппаратуре.

Для ведущих индустриальных стран можно отметить одну из главных особенностей — тесное взаимодействие человеческих ресурсов и робототехники.

С учётом всего сказанного можно сделать вывод о том, что средствам измерения в области неразрушающего контроля и технической диагностики следует предоставлять свои услуги и технологии потребителю таким образом, чтобы в преобразуемой цифровой промышленности они могли использоваться, не создавая конфликтов по назначению в киберфизических системах. Вместе с тем, многие цифровые технологии ставят новые задачи в области обеспечения требуемой достоверности и точности и требуют проведения новых исследований и разработок. В частности, разработка математических моделей процесса взаимодействия измерительного преобразователя с объектом контроля как неотъемлемой части сред-

ства измерения или применение высокоскоростных технологий передачи информации (5G) приводят к новым типам представления измеряемых величин и требуют разработки принципиально новых технологий для отслеживаемых настроек, калибровок и проверок оборудования (средств измерения). Кроме того, широкое использование интеллектуальных измерительных преобразователей и методов машинного обучения требует от разработчиков оборудования и метрологов соответствующих исследований и разработок, с тем чтобы включить их в научную сферу измерений. Многоканальные измерительные системы, средства визуализации, методики проведения измерений, а также их нормативное и метрологическое обеспечение, в совокупности с математической обработкой, требуют анализа многомерных массивов цифровой информации. Виртуальное моделирование должно стать основным инструментом анализа влияния информативных и мешающих параметров и, на их основе, оптимизации в области оценки метрологических характеристик, требующих разработки соответствующего инструментария для анализа результатов и расчёта неопределённостей измерений.

Цифровое преобразование в области неразрушающего контроля и измерений, в широком смысле, должно охватывать следующие аспекты:

- развитая система интегральных монокристаллических измерительных преобразователей с быстродействующими цифровыми каналами связи для одно- и многоканальных систем, в том числе рассредоточенных, реализующих стандартизованные методы измерения известных видов неразрушающего контроля;
- верифицированные программные продукты для моделирования измерительных преобразователей, основанных на известных физических принципах получения и преобразования измерительной информации;
- цифровая (аналого-цифровая) инфраструктура градуировки, настройки и калибровки средств измерения как основа цифрового преобразования технологических процессов, организующих интерфейсы, совместимые с цифровыми и автоматизированными процессами управления локальными технологическими процессами и предпочтительно в целом;
- эталоны, реализующие принципы дистанционной градуировки, настройки и калибровки средств измерения

с полным набором цифровых технических средств (toolset), включенные в государственные реестры средств измерения;

- схемы прослеживаемости для действующих и разрабатываемых многопараметровых аппаратно-программных распределенных средств и технологий измерения, а также утвержденные методики измерений на их основе;
- гармонизированные правила и руководства для анализа и статистической обработки массивов данных, реализующих перспективные риск-технологии как основу прогнозирования состояния объектов контроля.

**Концепция цифровизации промышленности**, являющаяся основой четвертой промышленной революции, заключается в объединении результатов измерений, полученных с использованием сети измерительных преобразователей и других источников информации, в единое целое и обрабатываемых на основе интеллектуальных машинных алгоритмов для автоматизированного управления процессами и принятия решений для реализации глобальной идеи B2B (бизнес для бизнеса). Основываясь на этих технологиях, выполняемый в настоящее время неразрушающий контроль готовой продукции на конечном этапе в будущем может быть заменён оперативным взаимосвязанным анализом данных между производителем и его клиентами для оптимизации и гибкого оперативного изменения требуемых параметров изделий на каждом этапе их изготовления, в том числе, с учетом требований заказчиков. Достоверные результаты измерений, подкреплённые стандартизованными процедурами градуировки, настройки и калибровки, «облачные» вычислительные технологии, mesh-сети, упреждающие стандартизованные методики и технологии корректирующих действий и другие разработки последних лет будут являться законченными программными и программно-аппаратными продуктами, включенными в соответствующие реестры [2].

Ключевым для реализации данной концепции является понятие «цифровой двойник» — основа абсолютного большинства всех современных практических цифровых приложений для физических объектов (от технологических процессов и поточных линий до целых предприятий) — фабрик будущего, производственной среды с автоматизированным принятием решений и управляющих воздействий на базе больших

потоков цифровой информации при обеспечении возможности интеллектуального машинного обучения. Главной особенностью цифрового двойника является широкое использование описанных выше измерительных преобразователей — базы цифровизации и основы разработки интеллектуальных алгоритмов принятия решений и последующих действий в режиме реального времени. При этом структура и принципы построения средств измерений в области неразрушающего контроля качества, их стандартизация и система метрологического обеспечения предполагают достоверность результатов измерений и надежность методов преобразования измерительной информации, обработки и анализа данных, что потребует проведения соответствующих комплексных исследований и разработок.

В области стандартизации как основы единства решений одна из главных задач заключается в том, что практические элементы цифровизации становятся все более междисциплинарными. Должно быть принято решение, каким организациям по стандартизации следует заниматься разработкой стандартов в этой области, однако, при этом следует учитывать, что в настоящее время практически нет квалифицированных экспертов по разработке таких стандартов. Более того, процессы стандартизации часто не успевают за развитием технологий, что приводит к тому, что многие ведущие компании оперативно создают стандарты объединений, реализуют соглашения экспертов или доминируют на рынке, используя иногда способы блокировки (lock-in effects) своих продуктов и платформ (по аналогии с фирмой Apple).

**Цифровая инфраструктура качества** как основа обеспечения и поддержания высоких стандартов качества технологических процессов изготовления и готового продукта в целом для реализации изложенных ранее принципов должна представлять собой иерархически организованную систему стандартизации, утвержденных методов, методик и технологий измерений, оценки соответствия, настроек, калибровок, испытаний и поверок при обеспечении единства измерений.

Рассмотрим возможное построение инфраструктуры качества, предлагаемой для реализации в Германии в национальных масштабах, увязывающей в единое целое основные принципы цифровизации и стандарты качества, в том числе, в области неразрушающего

контроля, и его метрологического обеспечения [3] (рис. 1).

Представленная на рис. 1 комплексная инфраструктура позволяет проводить испытания на соответствие стандартам качества и обеспечивать достоверные результаты измерений в процессе неразрушающего контроля качества продукции. Достигается это прослеживаемостью результатов калибровок (поверок) к национальным эталонам посредством национальной иерархии калибровок, а также работой сети метрологических служб, предоставляющих эталоны (рис. 2). Ключевую роль в этом выполняет единый

национальный метрологический институт Германии PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt). PTB предоставляет национальные эталоны и выполняет наивысший уровень калибровки. Помимо этого, он участвует в деятельности по стандартизации и аккредитации, предоставляет консультации службам и законодательным органам в вопросах оценки соответствия норм и правил, обеспечивающих единство измерений в масштабах страны. В деятельности метрологических институтов происходят изменения, связанные с цифровизацией и реализацией инфраструктуры качества.

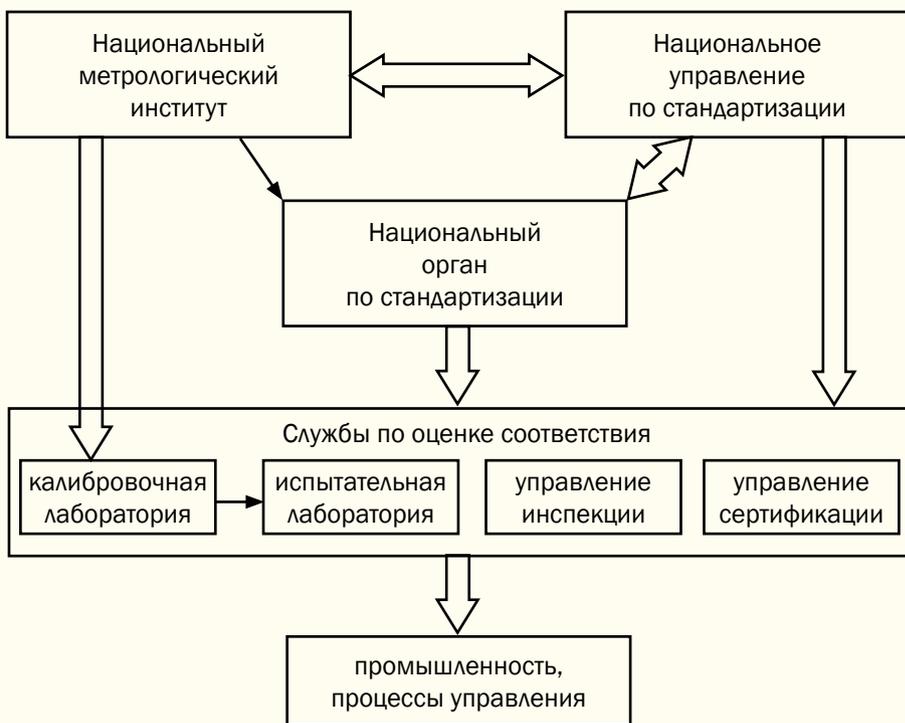


Рис. 1. Рабочие процессы, организации и структуры, составляющие систему качества в Германии



Рис.2. Обеспечение прослеживаемости результатов калибровок (поверок) к первичным эталонам

Взаимодействие средств измерения и интеллектуальных измерительных преобразователей, систем управления и прочих элементов, используемых в промышленных сетях, требует стандартизированных интерфейсов связи и протоколов данных. При этом стандарты должны обеспечить надёжную интерпретацию данных на основе единиц СИ и надёжное распространение качества данных, связанных с неопределённостью измерений. Таким образом, требования к метрологическим характеристикам должны начинаться с сертификата калибровки (поверки) и его использования по всей иерархии калибровки средств измерения. При этом информация о калибровке должна представляться в стандартизированном цифровом формате, читаемом машиной, быть защищённой и достаточно универсальной, чтобы охватить все необходимые технологические процессы в масштабах производственных и отраслевых объединений.

Использование сенсорных сетей вместо единичных средств измерения в сочетании с большими массивами данных, облачными вычислениями и удалёнными службами ставит перед метрологией средств неразрушающего контроля целый ряд новых требований. Например, при калибровке сенсорной сети должны приниматься во внимание возможности измерений отдельных сенсоров (измерительных преобразователей), вопросы коммуникаций и подходы к агрегированному данным. В некоторых сферах производства, таких как единая энергосистема, первые разработки были успешно реализованы, однако требуется значительно больше дополнительных исследований для установления гармонизованного обращения с сенсорными сетями. Совершенно иные методы калибровки и измерений требуются для удалённых служб. Например, онлайн- и дистанционные измерения параметров окружающей среды, таких как качество воздуха или воды, имеют разные требования калибровки к повторяемости, воспроизводимости и общей оценке результатов измерений.

Развитие высокочастотных технологий передачи данных и использование их для распределённых сетей измерительных преобразователей повышает требования к надёжности передачи данных. При этом технологии виртуальных измерений или симуляций измерительных устройств должны рассматриваться как средства измерения, и с ними должны проводиться соответствующие

метрологические мероприятия. Таким образом, в будущем прослеживаемая калибровка (поверка) для виртуальных измерений и расчёт неопределённостей измерений при моделировании должны обеспечиваться в структуре схемы прослеживаемости, представленной на рис. 2.

Постоянное изменение инфраструктуры качества также обуславливается стремительным изменением основ технологических процессов производства высокотехнологических изделий, обеспечивающих максимальную гибкость. Например, на основе новых физических процессов и цифровых технологий разрабатываются новые аддитивные производственные технологии, которые на сегодняшний день являются наиболее прогрессивными. С помощью аддитивного производства можно изготавливать более сложные структуры из органических элементов, пластика, металла и стекла. Для данного производства, характеризующегося чрезвычайно высоким уровнем сложности создаваемых структур и новых контролируемых параметров качества, необходимо разработать методы и технологии неразрушающего контроля качества, основанные на рассмотренных ранее принципах обеспечения метрологических характеристик.

**Стандартизация и законодательная метрология НК**, обязанные обеспечивать доверие к результатам измерений, также должны претерпеть изменения в условиях четвертой промышленной революции. Главной тенденцией будет увеличение использования распределённых измерений и дистанционной обработки данных. То есть, структурные элементы измерительных систем, в общем случае, будут распределяться на больших расстояниях в разных регионах или даже странах [3]. Например, первичный измерительный пьезоэлектрический преобразователь с сетевым интерфейсом беспроводной передачи первичной измерительной информации в облачную инфраструктуру, где виртуальный прибор в виде программного модуля осуществляет вторичное преобразование измерительной информации и вычисляет результат измерения, который может передаваться для отображения оператору или использоваться для дальнейшей обработки и хранения, либо передаваться службам, ответственным за техническое состояние объекта контроля (при эксплуатации) или технологического процесса его изготовления. При этом

проектанты могут использовать рассматриваемую облачную инфраструктуру для дистанционного обновления программного обеспечения и дистанционной настройки параметров градуировки (калибровки). Для законодательной метрологии выполнение этих задач в настоящее время трудноосуществимо, т.к. при оценке соответствия метрологических характеристик средства измерения, представляющего собой распределённую программно-аппаратную среду, должны учитываться параметры систем коммуникации, программного обеспечения облачных вычислений и т.д. С другой стороны, станет актуальной проблема пересмотра принципов настройки, калибровки и поверки распределённых средств измерения, т.к. облачный сервер практически недоступен экспертам, программное обеспечение может носить закрытый характер, а возможности испытания каналов связи на месте могут отсутствовать.

Одним из ключевых положений, лежащих в основе разработки новых средств измерений (построение которых будет осуществляться на изложенных принципах), является необходимость учёта того, что перспективные программы, которые позволят создавать цифровые модели распределённых средств измерения и объектов контроля и производить по ним расчет контролируемых параметров и параметров надёжности объектов, а также сами цифровые модели, имеют ряд ограничений, связанных, в том числе, со следующими факторами:

- адекватность и полнота используемых физических моделей;
- применимость используемых математических методов;
- точность задания параметров моделируемых объектов и граничных условий их применения.

Неправильное применение физических моделей и математических методов расчёта параметров цифровых моделей, а также погрешности или ошибки при задании физических параметров, могут приводить к ошибочным результатам прогнозирования свойств и поведения реальных объектов.

Учёные и разработчики всего мира всё шире будут использовать самые разнообразные средства и методы моделирования, в большинстве случаев имеющие закрытую структуру. Однако реальные изделия, построенные на основе этих моделей, так или иначе должны проходить натурные испытания. При широком внедрении цифровых моделей для прогнозирования поведения и принятия

решений в отношении потенциально опасных объектов необходимо принять меры для предотвращения их бесконтрольного и неквалифицированного применения. Это потребует создания организационно-правовой системы и инженерно-технической инфраструктуры для установления полноты и адекватности цифровых моделей (верификации), установления ограничений их применимости (валидации), контроля за правильностью применения цифровых моделей в реальных условиях. В частности, цифровая модель, разрешённая к применению в ответственных или потенциально опасных областях, обязана будет в той или иной форме проходить процедуру натурных испытаний. Использование такой модели для создания и контроля реального объекта должно будет производиться квалифицированными (сертифицированными) специалистами, отвечающими за правильность применения модели и задания параметров объекта контроля.

В настоящее время не существует единых устоявшихся подходов к оценке качества цифровых моделей «средство измерения — объект контроля». Для практических применений должно быть разработано своего рода «метрологическое обеспечение» цифровых моделей для определения следующих параметров:

- достоверность и неопределённости расчётов;
- влияние неопределённости входных данных на результаты расчётов контролируемых параметров;
- устойчивость модели при разных комбинациях входных данных и вариации мешающих параметров.

В конечном итоге, для широкого внедрения цифровых моделей в областях, связанных с технической и энергетической безопасностью, и в других сферах государственного регулирования возможно потребуются создать государственную систему, обеспечивающую:

- испытание цифровых моделей;
- ведение реестра цифровых моделей;
- аттестацию персонала и аккредитацию организаций на право использования цифровых моделей для прогнозирования и управления реальными объектами и процессами.

### В качестве заключения

Стремительная цифровизация промышленности и всей инфраструктуры государства требует от специалистов в области неразрушающего контроля быстрого принятия решений для сохранения своей важной роли в содействии инновациям и развитию новых уникальных технологий, материалов и форм организации труда.

В качестве ориентира дадим краткую характеристику процесса цифровизации измерительных технологий и перспективного оборудования, а также вопросов обеспечения достоверности результатов измерений на примере ведущего Германского национального метрологического института PTB.

На протяжении нескольких лет в PTB проводились консультации с экспертными группами учёных и промышленников по вопросам стратегии цифровых преобразований промышленности. Целью консультаций было продвижение роли Германии как мирового лидера

в области метрологии различных видов контроля и измерений в сфере инноваций и технологий.

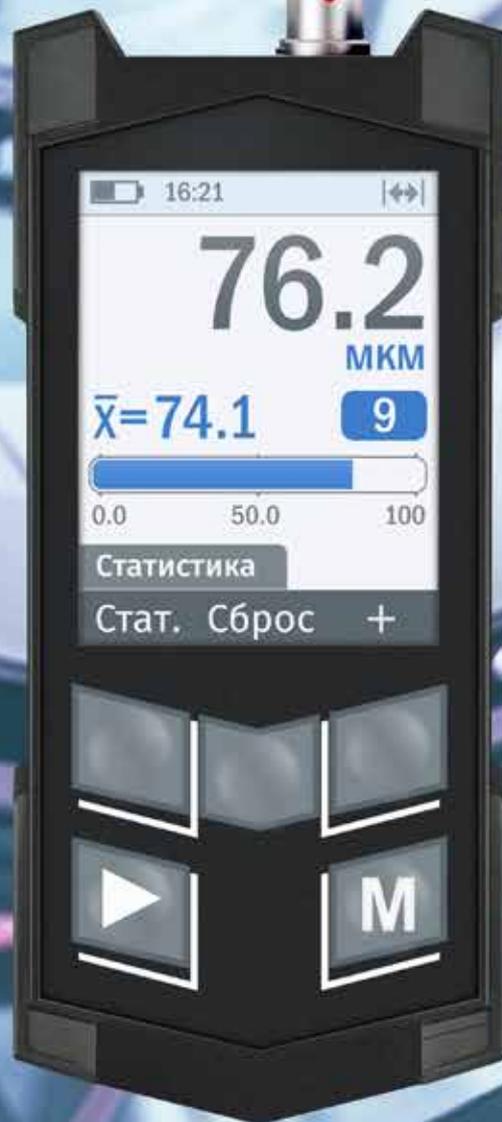
Ключевыми для цифровизации измерительных технологий обозначены следующие вопросы: развитие цифровых технологий и линий коммуникаций, разработка референтных архитектур для инновационных цифровых технологий в области законодательной метрологии средств измерений, создание универсального машиночитаемого цифрового сертификата поверки (калибровки) и «метрологического облака» как цифровой инфраструктуры качества. Для решения вопроса возможности дистанционного анализа данных большой размерности потребность разработки гармонизированных методов анализа данных с множеством характеристик, подлежащих оценке для сенсорных сетей, экспериментов комплексного моделирования и визуализации данных, а также их валидации как основы, в том числе, комплексного неразрушающего контроля.

### Литература.

1. Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group / [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Material\\_fuer\\_Sonderseiten/Industrie\\_4.0/Final\\_report\\_Industrie\\_4.0\\_accessible.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf)
2. NIST. Big Data Interoperability Framework -NISTSP1500: / NIST Special Publication, 2015.
3. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. "Metrologische IT", Bd. 4, Braunschweig: / PTB Mitteilungen, 2016.

Статья получена 16 мая 2018 г.,  
в окончательной редакции — 15 июня

# 180 x 80



из правах рекламы

