

**Ключевые слова:**

«Индустрия 4.0», цифровое производство, аддитивное производство, лазерное сканирование, проекционная фотограмметрия, координатно-измерительная машина, интерферометр, прецизионность, точность

МЕТРОЛОГИЯ В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Михаил КОВАЛЬСКИЙ

Рассмотрены различные аспекты важности развития метрологического обеспечения в процессе реализации концепции четвертой промышленной революции – идеологии «Индустрия 4.0». Особое значение метрология приобретает в совокупности с цифровым производством. Показано, что метрология является основой конкурентоспособности и промышленной безопасности национальной экономики.

Одним из самых перспективных и многообещающих достижений современного общества и закономерным итогом его развития можно считать так называемую концепцию четвертой промышленной революции, реализующуюся в производственной сфере как «Индустрия 4.0». При этом, поддержку данному направлению оказывают не только крупные корпорации – на развитие данной концепции ежегодно выделяются миллиарды долларов из бюджета целого ряда развитых и развивающихся стран, в том числе стран Евросоюза (где локомотивом и основным идейным вдохновителем является Германия), США, а также Китая, Японии, Южной Кореи.

Концепции «Индустрия 4.0» присуще множество аспектов, общепризнанных и спорных, затрагивающих, в конечном счете, все области человеческого существования: от политического строя и экологии до чисто производственных нюансов. Тем не менее, если говорить именно о влиянии новой системы организации человеческой деятельности на промышленность, следует отметить ряд особенностей функционирования так называемого цифрового производства.

1. Основной ценностью в новом обществе является информация, а основной целью – глобальная оптимизация процессов получения, обработки и обмена информацией как внутри предприятия, так и в масштабах всей планеты.
2. Автоматизация процесса производства становится всеобъемлющей за счет применения обрабатывающих центров с ЧПУ, промышленных роботов-манипуляторов, беспилотных транспортных средств доставки готовой продукции.
3. Сетевые технологии и облачные сервисы обеспечивают легкий доступ заинтересованных лиц непосредственно к производителю, оптимальному по соотношению цены, скорости производства и доставки, с минимумом посредников. В идеале, пользователь способен сам дистанционно загружать приведенную к стандартному формату данных математическую модель своего объекта в систему ЧПУ обрабатывающего центра.
4. Персонификация промышленных товаров делает нецелесообразным массовое производство, и для выживания крупные производители будут вынуждены конкурировать с малым бизнесом за индивидуальные заказы, что приведет к резкому снижению стоимости единичного или мелкосерийного производства и к рывку технологической стандартизации предоставления данных и сетевого взаимодействия различных протоколов передачи и обработки информации.

Метрологическое обеспечение являлось основой получения информации о качестве изготавливаемой продукции на всех предыдущих этапах промышленной революции, обеспечивая единство и стандартизацию получаемых данных. Тем не менее в большинстве примеров, описываемых в литературе, а также во многих официальных документах, этап получения информации о физических и геометрических параметрах изготавливаемых в цифровом производстве материальных объектов упоминается только в момент «оцифровки» прототипа дублируемого изделия. При этом, в качестве средства быстрого создания полигональной трехмерной

модели объекта предлагаются различные варианты лазерного сканирования или проекционной фотограмметрии. Подобная распространенность упоминания именно этого способа измерения геометрии в купе со спецификой маркетинговой политики поставщиков производственного оборудования, заявляющих о микронной точности и «сверхпрецизионности» продаваемых моделей станков, создает у потребителя ощущение, что контроль качества изготовления обеспечивается самим обрабатывающим центром. Однако интересно проследить реальное место метрологического обеспечения в цифровом производстве.

Для иллюстрации типового представления о концепции цифрового производства можно привести ряд планов и прикладных реализаций так называемых «контейнерных» заводов – мобильных производственных площадок, компактно реализованных в стандартных контейнерах, способных быстро устанавливаться на новом месте, подключаться к местным сетям электроснабжения и начинать производство в течение нескольких часов. Например, бельгийская компания Materialise выходит на финальную стадию разработки проекта мобильного производства контейнерного типа на базе аддитивных технологий Cassamobile, включающего установки по аддитивному производству металлических и полимерных элементов, обрабатывающий центр для постпроцессной обработки, элементы финишной обработки и упаковки, а также автоматизированные системы логистики.

Проект предусматривает возможность создания мини-заводов, способных выполнять индивидуальные заказы на производство титановых имплантов суставов, а также ряда других изделий и инструментов медицинско-назначения с использованием САД-моделей, создаваемых на базе цифрового моделирования и лазерного сканирования. Также в данном проекте продвигается и отработывается концепция «Предприятие за один день», подразумевающая разворачивание малых промышленных предприятий, включая маркетинг, менеджмент и реальное производство, в кратчайшие сроки. И хотя нельзя назвать эту концепцию исчерпывающей и самой перспективной, она наиболее ярко отражает основные идеи «Индустрии 4.0».

В описанной модели производства находится место и одному из наиболее популярных с точки зрения СМИ и среднестатистического обывателя видов измерительного оборудования – так называемым лазерным сканерам. Это класс устройств, которые, пользуясь чаще всего измерением времени распространения отраженного света от объекта до приемника сигнала или фазовым искажением проецируемого на поверхность изображения, создают облако точек измеряемой поверхности.

При этом, точки распределяются по поверхности достаточно равномерно, что позволяет создавать сетку или будущий каркас математической модели объекта. В узлах подобной сетки располагаются измеренные точки, а соединение узлов чаще всего происходит с ближайшими точками в элементарные треугольники. В этой схеме достоверностью обладают лишь данные об измеренных точках, в то время как любая аппроксимация данных на области между узловыми точками не может считаться источником каких-либо данных и должна восприниматься лишь как удобная для глаза визуализация результатов измерений. Кроме того, не следует забывать, что проекционные методы измерения и лазерные дальнометры не отличаются высокой точностью и даже в близких к идеальным условиям дают стабильные погрешности измерений не менее 30–40 мкм. Следует отметить основную сильную сторону оптических сканеров – невероятно большой объем информации получаемой за максимально короткий интервал времени. Так, современные системы могут получать до миллиона точек в секунду или снимать сотни тысяч точек на поверхности размером 1×1 м за 10–20 с. Следует также сделать определенное отступление и напомнить о заблуждении, свойственном даже некоторым специалистам в области измерений, – большой объем никак не связан с точностью получаемых данных, при этом эффективность фильтрации и усреднения подобных массивов координатных точек является отдельной темой исследования для каждого конкретного типа обработки (рис. 1).

Однако расцвет сканирующих систем стал возможен благодаря подготовленной для них почве: большинство стандартов передачи данных, методик использования облака точек для создания простых поверхностей и подходов к минимизации погрешностей было получено на более продвинутых измерительных системах – промышленных координатно-измерительных машинах (КИМ). Реализуемые на их основе контактные и бесконтактные сканирующие системы позволяют решать любые задачи обеспечения измерительной информацией о форме, размере и взаимном положении элементов детали практически любой сложности, как для прямого, так и для обратного инжиниринга. И хотя зачастую скорость снятия данных у подобных систем сильно уступает вариантам лазерного оптического сканирования (10–1000 точек в секунду), а стоимость, наоборот, для промышленных КИМ оказывается выше (5–15 млн руб.), тем не менее именно они способны обеспечить наилучшую точность применительно к произвольной по геометрии детали по заданной программе, в автоматическом режиме и с возможностью автоматической генерации оптимальной траектории сканирования поверхности объекта.

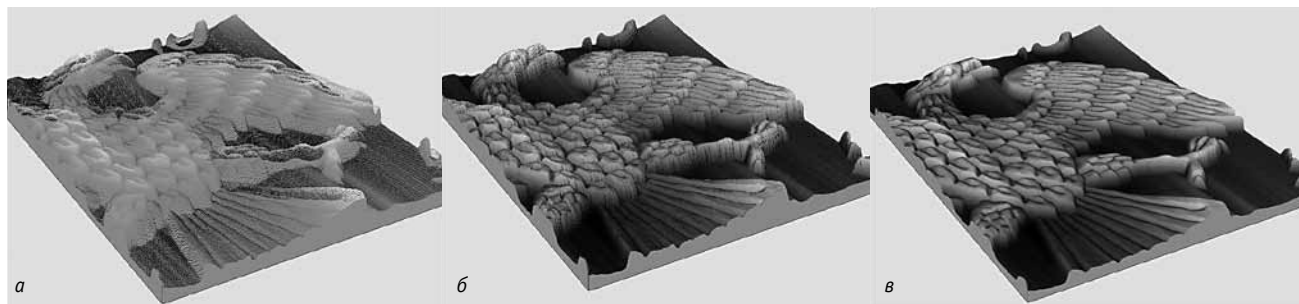


Рис. 1. Результаты сканирования поверхности: *а* – в форме облака точек, *б* – после аппроксимации точек поверхностью, *в* – после фильтрации и аппроксимации; на виде *б* можно заметить множество артефактов сканирования, отсутствующих на оригинальной поверхности

Разработка универсальных стандартов передачи данных также имеет почти полувековую историю: практически сразу после появления первых ЭВМ возникла идея использования данных, связанных с координатными измерениями, для их передачи и обработки от одной вычислительной машины к другой. В связи с подобной потребностью и благодаря развитию систем автоматизированного проектирования такие форматы, как *iges* и *stl*, уже второе десятилетие являются общепринятыми для передачи координатных данных. При этом результаты измерений в них могут быть записаны как в форме декартовых координат точек, так и в виде облака единичных векторов. Первый способ удобнее для оптических сканеров, как более компактный, второй – предпочтительнее для контактных промышленных КИМ, так как содержит данные о направлении подвода к каждой измеренной точке.

Описанная выше модель «контейнерного» производства не всеобъемлюща, и существует множество проектов по использованию уже существующих высокоавтоматизированных производств, оснащенных высокоточными обрабатывающими центрами с ЧПУ. Подобные заводы при получении доступа к их производственным мощностям широко кругу заказчиков будут в состоянии решать задачи практически любой технологической сложности.

Однако в процессе формирования цены при работе с малыми партиями у производителя существует соблазн отказа от метрологического контроля готовой продукции, объясняемого ссылкой на точность используемого обрабатывающего оборудования. И действительно, поверхностный взгляд на строение стационарной КИМ и обрабатывающего центра создает впечатление аналогичности конструкций и принципов работы данных установок и, как следствие, избыточности дополнительных средств контроля. При этом существует возможность установки одинаковых контактных щупов как на КИМ, так и на обрабатывающие центры, а точность позиционирования современного ста-

ночного оборудования может достигать единиц микрометров. С учетом высокой жесткости конструкции станины и возможности внесения компенсации в систему ЧПУ многие производители стремятся использовать свое механообрабатывающее оборудование и в качестве измерительного, с применением стандартных методик калибровки.

При существующих плюсах подобного подхода, связанных с повышением качества базирования детали перед обработкой и с возможностью снижения затрат на промежуточный контроль между черновой и чистовой обработкой или сменой инструмента без снятия детали со станка, данный путь имеет и немало минусов. В частности, из-за высоких нагрузок, прикладываемых при обработке изделий, существующие файлы программной компенсации остаются актуальными лишь ограниченный срок (обычно не более нескольких месяцев – в зависимости от интенсивности использования оборудования), а выход точностных характеристик за пределы допуска может оказаться неравномерным при колебании нагрузок. При этом, в случае работы с КИМ подобные события деактуализации компенсации маловероятны ввиду незначительности нагрузок в штатном режиме измерений. Также следует помнить о разности самих философий механообработки и измерений. Так, для механообработки первоочередным параметром является так называемая прецизионность, часто в маркетинговых целях выдаваемая продавцами оборудования за точность. Однако следует вспомнить, что прецизионность по определению – это близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при измерении или изготовлении одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях. При этом точность является характеристикой именно метрологического оборудования и определяется как близость измеренных или полученных значений к точному значению измеряемой величины.

Таким образом, задача обрабатывающего оборудования – приходиться в заданную точку, в то время

как цель измерительного оборудования – точно знать координаты точки нахождения чувствительного элемента машины с учетом возможной неопределенности измерений. При этом высокий уровень тепловых и шумовых помех на производстве вне специализированных лабораторий также не способствует получению достоверных результатов. Кроме того, для методически верного получения информации о геометрии готовой детали необходимо, чтобы контролируемое изделие приняло нормальную температуру ($20 \pm 1^\circ\text{C}$), что во всем объеме детали возможно лишь при «вылеживании» детали в нормальных условиях в течение нескольких часов без резких перепадов температур. Подобное действие в условиях цеха и без снятия детали со станка экономически нецелесообразно в подавляющем большинстве случаев, за исключением, возможно, крупногабаритных единичных уникальных деталей.

Отдельно стоит выделить и процедуру внесения поправок в траекторию перемещения станка. Здесь задача может быть разделена на контроль точности позиционирования линейных и поворотных осей многоосевых обрабатывающих центров с ЧПУ, контроль формы траектории перемещения линейных и поворотных осей, контроль взаимного положения осей в пространстве. Так, даже для оборудования всего с тремя осями линейного перемещения, число контролируемых параметров достигает 21 (точность позиционирования, прямолинейности, тангаж, рысканье и крен по каждой оси, а также их взаимная ориентация), а при наличии дополнительных двух поворотных осей глобусного стола число параметров возрастает до 30 (прибавляются точность угла поворота и ориентации относительно осей глобусного стола).

При существующем разнообразии методик и средств контроля точности станочного оборудования, одновременной достаточной универсальностью, широким диапазоном измерений и обширными возможностями автоматизации процесса контроля обладают линейные интерферометры. В сочетании с комплектом дополнительной оптики, данные измерительные системы способны решить полный спектр задач по оценке и автоматической компенсации погрешностей перемещения станочного оборудования с максимально возможной точностью. При этом, программное обеспечение подобного оборудования зачастую позволяет как синхронизировать необходимые команды для проведения полного цикла измерений на системах ЧПУ наиболее распространенных производителей (Fanuc, Heidenhain, Siemens, Mitsubishi, Mazak), так и автоматически внести поправки в программу корректировки перемещения подвижных элементов станка по окончании измерений (рис. 2). Однако необходимость юстировки конкретной оптической

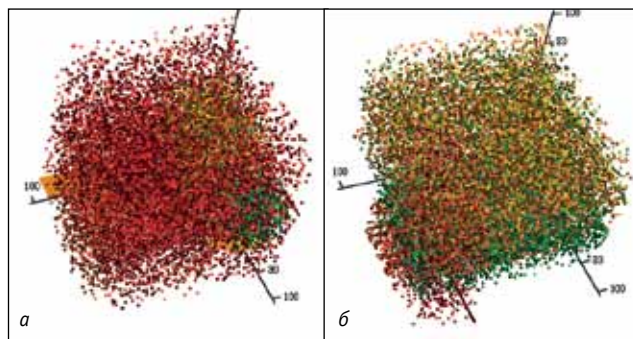


Рис. 2. Результаты оценки пространственной геометрической точности рабочей зоны оборудования: а – до внесения карты компенсаций в систему ЧПУ, б – после внесения поправок

схемы на станине станка под каждый конкретный измеряемый параметр способна растянуть процедуру внесения компенсаций на срок от двух до пяти дней при работе со всеми параметрами во всей зоне обработки. В связи с этим, часто производители ограничиваются параметрами точности позиционирования и прямолинейности перемещения, проводя калибровку станка не чаще раза в год.

Задача ускорения процесса контроля нескольких параметров геометрии подвижных элементов оборудования с высокой точностью решается современными производителями измерительных интерференционных систем, и одним из самых интересных и показательных можно считать систему Renishaw XM-60 (рис. 3). Данная калибровочная система способна решать задачу точности перемещений вдоль линейных координат сразу по шести степеням свободы, что вкупе с применяемыми дополнительными системами XR20-W и XL-80 сокращает общее количество используемых оптических схем при проверке обрабатываемого центра с восьмью до трех, а время проверки – нескольких дней до одного дня. При этом, процедуры промежуточного контроля станка для удостоверения его соответствия точностным требованиям между калибровочными измерениями могут занимать не более пары часов.

Важным символом в рамках «Индустрии 4.0» является также упоминавшееся ранее аддитивное производство. Цифровое послойное производство деталей со сколь угодно сложной геометрией, как внутренней, так и внешней, способно перевернуть представление человечества о производстве, особенно в контексте долгосрочных космических миссий, производства запчастей машин и биологических имплантов, обеспечения автономии, в том числе для войсковых операций. При всех плюсах инноваций, в трехмерной печати существует большой пласт проблем, свойственных любой свежей

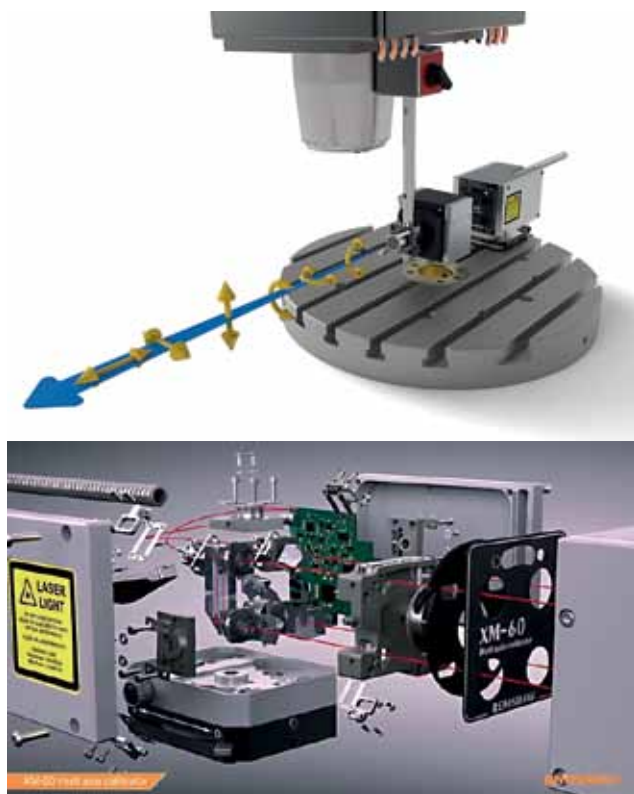


Рис. 3. Калибровочная система Renishaw XM-60 для оценки пространственной точности перемещения подвижных элементов станочного оборудования

технологии: недостаток стандартизации процесса, непредсказуемость свойств конечного продукта, отсутствие оптимизации режимов обработки, низкая взаимозаменяемость оборудования разных производителей.

Именно поэтому метрологическое обеспечение аддитивных технологий в рамках как исследовательских проектов, так и готовых промышленных установок играет гораздо более существенную роль, чем в классической механообработке. Так, для технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков практически неотъемлемым атрибутом работы системы становится пирометрический датчик температуры, оценивающий точно количество тепла в зоне плавления внутри лазерного пятна.

Существенное влияние на эксплуатационные свойства готового изделия в аддитивном производстве оказывает как внутренняя подповерхностная геометрия, так и внутренние дефекты, носящие специфический характер для данного типа изготовления продукции. В связи с чем, помимо классических методов контроля поверхностной геометрии и подповерхностных дефектов, появляется потребность и в новом методе измерения,

лежащем на стыке материаловедения и метрологии, – компьютерной рентгеновской томографии, которая применяется при изучении внутренних трехмерных макро- и микроструктур с пространственным разрешением, достигающим 1 мкм (хотя и с существенно большей погрешностью, начинающейся от 5 мкм). Рентгеновская компьютерная томография представляет собой неразрушающий метод исследования внутренней структуры объекта путем его просвечивания рентгеновским излучением под разными углами с последующей компьютерной переработкой полученной проекционной информации в трехмерную матрицу пространственных пикселей – вокселей, каждый из которых характеризуется усредненной степенью ослабления падающего излучения в нем. Ослабление рентгеновских лучей при их прохождении через материал определяется, в основном, энергией излучения (длиной волны), глубиной залегания, плотностью материала и атомным номером материала. Это означает, что одно измерение может дать представление не только о форме внутренних полостей и пор, но и о химическом и фазовом составе материала, что также критически важно для аддитивного производства. Также результаты рентгеновских измерений позволяют визуализировать полученные данные для более простой их интерпретации, в том числе имеется возможность создания полной CAD-модели изделия, включая как внешнюю геометрию и шероховатость поверхности, так и внутреннюю структуру, для сравнения ее с номинальной моделью (рис. 4).

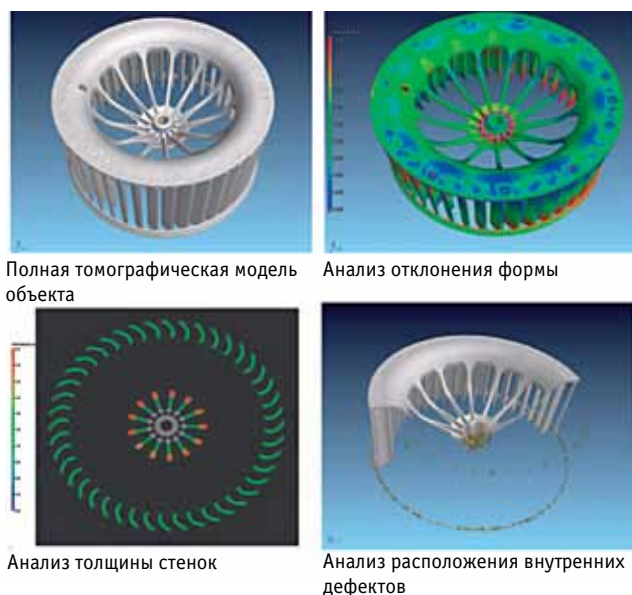


Рис. 4. Использование компьютерной рентгеновской томографии для обнаружения дефектов формы и внутренних дефектов готовой детали, а также для анализа толщины стенок

Однако следует отметить, что с точки зрения метрологии томография не обладает стандартными методиками поверки и калибровки с использованием комплекса эталонов, еще не созданных к настоящему моменту на государственном уровне. Впрочем, значительных сложностей в случае необходимости подобного внедрения на уровне государства не предвидится. Существенными недостатками также является стоимость подобных установок, вопросы безопасности их эксплуатации, а также общая продолжительность сбора большого массива данных, порою излишних в условиях малого производства. Данный тип контроля, соответственно, практически недоступен для частных предпринимателей или малых предприятий, так как требует специфических условий и крупных финансовых вложений для своей реализации.

Важно отметить, что инициатива внедрения новых измерительных технологий в цифровое производство и информационного обеспечения постиндустриального общества исходит не только от крупных корпораций или научного сообщества. Данная работа невозможна без широкой государственной поддержки. Работы по данному направлению, в частности, ведутся и в нашей стране, а их направление в общих чертах описано в Распоряжении Правительства Российской Федерации «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года» от 19 апреля 2017 года N 737-р. В документе, в частности, говорится, что «на современной постиндустриальной инновационной стадии развития общества результаты измерений, выполняемых с наилучшей возможной точностью, используются на всех стадиях жизненного цикла любой высокотехнологичной продукции, начиная от проектирования и заканчивая утилизацией. Точность и разнообразие измерений определяют и характеризуют уровень развития науки, промышленности, здравоохранения, энергетики, транспорта, обороноспособности, что обуславливает необходимость опережающего развития системы обеспечения единства измерений. Опыт передовых стран показывает, что опережающее развитие системы обеспечения единства измерений как одной из наиболее высокотехнологичных сфер экономики оказывает стимулирующее воздействие на развитие других ее элементов. Высокий уровень развития экономики может быть достигнут только путем внедрения в важнейшие сферы деятельности государства передовых технологий, основанных на современных достижениях науки, техники, информатизации, неотъемлемой частью которых являются точные измерения. В настоящее время нет ни одной высокотехнологичной и наукоемкой сферы деятельности, в которой не использовались бы результаты высокоточных измерений. Поэ-

тому современная развитая система обеспечения единства измерений необходима для реализации стратегической цели социально-экономического развития Российской Федерации – достижения уровня экономического и социального развития, соответствующего статусу России как ведущей мировой державы 21 века, занимающей передовые позиции в глобальной экономической конкуренции и надежно обеспечивающей обороноспособность и национальную безопасность государства, а также реализацию конституционных прав граждан».

«Сфера влияния системы обеспечения единства измерений распространяется на достижение таких целевых ориентиров долгосрочного социально-экономического развития, как экономика лидерства и инноваций, экономика, конкурентоспособная на мировом уровне, безопасность граждан и общества, взаимодействие государства, частного бизнеса и общества как субъектов инновационного развития. Одной из составных частей инновационного информационного общества, безусловно, следует считать и цифровое производство, и конкурентоспособность промышленности в подобном глобализующемся обществе определяется способностью прогнозировать его потребности. Мониторинг и анализ развития приоритетных областей экономики, здравоохранения, обороны и безопасности государства должны давать информацию об объектах и видах измерений, о требуемых точностных характеристиках. Разработка таких прогнозов и программ – сложная задача, требующая соответствующего ресурсного обеспечения». В рамках Стратегии обеспечения единства измерений планируется передать прогностические и интеграционно-информационные функции по вопросам метрологического обеспечения инновационных производств и национальной экономики в целом Федеральному информационному фонду по обеспечению единства измерений.

«В настоящее время отсутствуют механизм и методология исследования и прогнозирования потребностей государства и общества в измерениях. Важная системная проблема связана с отсутствием методов оценки влияния метрологии на качество жизни и на экономику страны в целом. Промышленно развитые страны вкладывают существенные средства в развитие метрологической инфраструктуры. По экспертным оценкам, приведенным в документах Международного бюро мер и весов, экономическая отдача от развития системы измерений составляет от 0,8 до 6% валового внутреннего продукта, наблюдается устойчивая корреляция между рейтингом «качества жизни» и инвестициями в национальную систему измерений».

«Неосведомленность граждан о предназначении и состоянии системы обеспечения единства изме-

рений приводит к недооценке важности и роли системы обеспечения единства измерений в жизни современного общества. Как следствие, имеет место непонимание потребности не только опережающего развития системы обеспечения единства измерений, но и обоснованности затрат, требуемых для поддержания уровня обеспечения единства измерений, необходимого для обеспечения устойчивости экономики».

В условиях реализации любого из сценариев прогноза социально-экономического развития Российской Федерации количество измерений в стране будет только возрастать, а общество будет предъявлять все более высокие требования к достоверности и сопоставимости результатов измерений, прежде всего в областях, связанных с повышением качества жизни, развитием новых технологий, обеспечением обороноспособности и безопасности государства.

В заключение хотелось бы отметить некоторую утопичность и идеализацию представления о тотальном проникновении «Индустрии 4.0» во все отрасли промышленного производства. При всех плюсах, получаемых человечеством за счет свободной передачи информации от производителя к работнику и потребителю, существуют и значительные проблемы, связанные с этим, и их решение не может быть найдено конкретным производителем или даже страной, но должно решаться на уровне межгосударственных соглашений совместными усилиями всех стран. В контексте «Индустрии 4.0» информационная безопасность обретает не только стратегическое, политическое или экономическое значение – информация становится реальным рычагом возможного нанесения материального ущерба и причинения вреда жизни и здоровью человека. Для иллюстрации сказанного можно привести статью Forbes от 3 мая 2017 года, прошедшую незаметно на общем информационном фоне. В ней описано совместное исследование компании Trend Micro и Политехнического института Милана, продемонстрировавшее возможность дистанционного взлома промышленного робота-манипулятора для реализации условной диверсии на производстве. В качестве объекта атаки был выбран серийный промышленный робот модели ABB IRB140. По сценарию атаки, исследователи удаленно перепрограммировали робота в процессе аддитивного производства критически важных компонентов ротора двигательной установки беспилотных автономных дронов. Из-за внесенных поправок в программное обеспечение робота (файлы конфигурации) траектория движения, воспринимаемая роботом как прямая линия, отклонялась от прямолинейности на величину до 2 мм, что в случае отсутствия выходного контроля и проверки качества поставщиком могло

бы привести к повреждению и аварии беспилотного летательного аппарата. Таким образом, наличие метрологической службы на предприятии становится дополнительным уровнем информационной безопасности.

Важно отметить, что дистанционно были не только внесены корректировки для создания брака на производстве, но и отключены важные режимы безопасности и введена ложная индикация на пульте оператора о переходе робота в режим ожидания, что могло в реальных условиях нанести физический ущерб как оборудованию, так и персоналу, а в случае массивной сетевой атаки привести к выводу крупного предприятия из строя на долгие недели и привести к многомиллиардным затратам. При этом подобные действия могут проводиться не только конкурентами, но и враждебными государствами или террористическими организациями.

ABB был не единственным производителем, чьи роботы уязвимы к атакам через глобальные сети. В апреле 2017 года исследовательская группа обнаружила более 50 уязвимостей для широкого круга домашних и промышленных роботов, хотя полный список не разглашается по соображениям безопасности. Кроме того, используя специализированные программные продукты для поиска таких подключенных машин, исследователи Trend Micro обнаружили более 80 000 промышленных маршрутизаторов, используемых для управления роботами по всему миру. Но стоит отметить, что провести глобальную атаку по согласованному изменению характеристик сразу для производящего и измерительного оборудования невероятно сложно, и даже в случае диверсионных действий в отношении КИМ и обрабатывающих центров несогласованность результатов корректировок злоумышленников будет выявлена на этапе контроля.

Из всего вышенаписанного следует очевидный вывод, что на всех участках цифрового производства, от наладки оборудования и конструирования до приемочных испытаний и обеспечения безопасности, метрологическое обеспечение является незаменимым элементом, без которого невозможно существование ни одного современного производства. Развитие метрологии является основой конкурентоспособности производства, ключевым элементом развития и безопасности национальной и общемировой экономики, однако данное развитие возможно лишь при тесном финансовом и информационном взаимодействии государства, науки и бизнеса, как крупного, так и мелкого.

КОВАЛЬСКИЙ Михаил Григорьевич –
кандидат технических наук, генеральный директор
АО «НИИИзмерения»