

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА



*М.Г. Ковальский,
генеральный директор
АО «НИИИзмерения», Москва,
kovalskiy@micron.ru*



*Е.В. Ромаш,
канд. экон. наук, заведующая
отделом маркетинга
АО «НИИИзмерения», Москва,
eromash@micron.ru*



*М.М. Стебулянин,
д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры
ВТО МГТУ «СТАНКИН»,
Москва,
mmsteb@rambler.ru*



Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения процесса перехода машиностроительных предприятий к цифровым и интеллектуальным производственным технологиям. Изложены основные проблемы цифровой трансформации существующих производственных технологий. Указано на необходимость сочетания устоявшейся в отрасли нормативной базы с новыми подходами. Представлены примеры глубокой интеграции измерительного оборудования, производимого АО «НИИИзмерения», в информационные системы и технологические процессы современного производства.

Переход предприятий отрасли машиностроения к цифровым производственным технологиям, намеченный долгосрочной Стратегией научно-технологического развития РФ, требует активного включения сил отраслевой науки для выработки принципиально новых научно-технологических решений.

В Распоряжении Правительства РФ «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года» от 19 апреля 2017 г. № 737-р 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» [1].

Метрологическое обеспечение таких процессов имеет ряд особенностей, обусловленных новыми принципами организации производства.

Речь идет о производственных процессах, характерных для четвертой промышленной революции, так называемой Индустрии 4.0, а именно о создании умных цифровых производств, устройства и изделия которых взаимодействуют друг с другом и обеспечивают персонализированный выпуск продукции.

В Германии в 2011 г. были сформулированы некоторые принципы Индустрии 4.0:

- **совместимость** – все устройства и машины должны уметь общаться друг с другом на одном языке посредством интернета вещей, то есть они должны быть совместимы;

- **прозрачность** – создание цифровой копии продукта, сбор данных с микрочипов и датчиков посредством которых устройства общаются;
- **техническая поддержка** – программное обеспечение производит сбор, анализ, систематизацию, визуализацию данных, полученных с датчиков, и помогает человеку принимать решение или принимает их в автоматическом режиме, тем самым высвобождая человеческие ресурсы;
- **децентрализация управленческих решений** – автоматизация различных решений системами, максимально полное человекозамещение [2].

Одним из важных составляющих Индустрии 4.0 является не продукт, а данные. Цифровизация производства связана с большими массивами данных, которые нужно считывать, собирать, анализировать, систематизировать, обрабатывать, хранить, передавать, представлять в нужном виде и т.д. Для этого необходимы соответствующие информационные системы, программное обеспечение, средства беспроводной передачи данных, облачные сервисы для обмена и хранения данных.

Практически все предметы и устройства будут включать в себя микрочипы и датчики, посредством которых и будут общаться друг с другом. К 2025 г. планируется подключить 75,4 млрд предметов к Интернету. Необходим язык для общения между устройствами разных брендов.

В открытых источниках информации чаще всего упоминают следующие передовые технологии, присутствующие на цифровом, умном производстве:

1. Аддитивные технологии, 3D-печать;
2. Моделирование и визуализация;
3. Интеграция систем;
4. Интернет вещей;
5. Кибербезопасность;
6. Облачные сервисы;
7. Дополненная реальность;
8. Виртуальная реальность;
9. Автономные роботы, роботизация;
10. Планирование и анализ онлайн;
11. Искусственный интеллект;
12. Энергоэффективные технологии;
13. Альтернативная энергетика;

14. Большие данные и аналитика;
15. Дистанционное обслуживание.

В качестве примера Индустрии 4.0 можно привести следующие проекты.

1. Очки дополненной реальности. Рабочий, надев данные очки, видит все необходимые инструкции по его работе. Так, на авиационных заводах очки помогают распознать провода в самолетах и сделать их правильные соединения электрикам.

2. Модуль моделирования и визуализации. При проектировании обработки детали в САМ-системе программист может произвести симуляцию обработки детали на виртуальном станке и убедиться в отсутствии столкновений органов станка и зарезов детали.

3. Программное обеспечение, позволяющее соединить станки в одну сеть. Вся информация со станков стекается в данное программное обеспечение, которое систематизирует данные, а также сигнализирует о различных событиях (простое, перегреве, вибрации, износе узлов, времени работы и т.д.).

4. Самовосстанавливающееся оборудование. При достижении некоторого износа деталей станок сообщит об этом механику и сам закажет запасную часть на заводе-изготовителе или в службе снабжения предприятия, также предупредит о скором ремонте. Реализовывается с помощью специальных датчиков на станке. Его поломка больше не будет сюрпризом, что исключит простой оборудования.

5. Автоматический заказ компонентов. На сборку изделия гарантированно поступят все необходимые комплектующие и в нужном количестве, так как при получении заказа на изготовление изделия система сама проверит их наличие на складе и делает заказ всего необходимого заранее.

6. «Общение» станка с заготовкой и другими объектами. Станок считывает с микрочипа на заготовке необходимые данные (как ее нужно обработать, какими инструментами) и производит эту обработку.

7. Цифровая копия продукта. Электронный клон наделен всеми характеристиками физического продукта, что позволяет более точно осуществлять анализ конструкции.

8. Единое цифровое пространство промышленности.

В рамках выставки ИННОПРОМ-2017 Минпромторг России представил проект «4.0 RU» по реализации Единого цифрового пространства промышленности РФ. Такое пространство обеспечит комплексную автоматизацию всех этапов жизненного цикла изделий на всех промышленных предприятиях в рамках одной площадки.

9. Удаленная настройка оборудования для производства умной продукции.

10. Мониторинг всех производственных, технологических и других процессов. Например, мониторинг доставки продукта от производителя до конечного пользователя.

11. Внутрицеховое перемещение деталей без участия человека.

Метрология переходного периода определяется основными потребностями промышленных предприятий. По мнению аналитиков РБК, основная потребность предприятий отрасли – это подключение промышленного оборудования в единую сеть и внедрение рекомендательных систем на основе машинного обучения.

На данном этапе проявляются некоторые особенности метрологического сопровождения производственных процессов.

Во многих официальных профильных докладах этап получения информации о физических и геометрических параметрах изготавливаемых материальных объектов в цифровом производстве упоминается только в момент «оцифровки» прототипа дублируемого изделия, при этом в качестве средства быстрого создания трехмерной модели объекта предлагаются различные варианты лазерного сканирования или проекционной фотограмметрии. Подобная распространенность упоминания именно этого способа измерения геометрии в совокупности 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 [3].

Не следует забывать, что проекционные методы измерения и лазерные дальномеры не отличаются высокой точностью и даже в близких к идеальным условиям дают ста-



бильные погрешности измерений не менее 30–40 мкм.

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 степени использования оборудования), а выход точностных характеристик за пределы допуска может оказаться неравномерным при колебании нагрузок. На современных предприятиях необходимо применение координатно-измерительных машин (КИМ). При применении КИМ подобные ошибки 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 выдаваемая продавцами оборудования в маркетинговых целях 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 ее «вылеживании» 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 достигаемое число контролируемых параметров – 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 ориентация относительно осей глобусного стола).

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. Данная калибровочная система способна решать задачу оценки 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 обрабатывающего центра с восьми до трех, а время проверки – от нескольких дней до одного дня. При этом процедуры промежуточного контроля станка для удостоверения его соответствия точностным требованиям между калибровочными измерениями могут занимать не более двух часов.

Важным символом в рамках Индустрии 4.0 является аддитивное производство. Цифровое послойное производство деталей со сколь угодно сложной геометрией, как внутренней, так и внешней, способно пере-

вернуть представление человечества о производстве.

При всех плюсах инноваций в трехмерной печати существует большой пласт проблем, свойственных любой новой 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 расплавления 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).

Обеспечение информационной безопасности цифрового производства – задача современной метрологической службы

При всех плюсах, получаемых от свободной передачи информации от производителя к разработчику 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 г., оставшуюся незаметной на общем информационном фоне. В ней описано совместное исследование компании Trend Micro и Миланского политехнического университета, 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.

В настоящее время выявлены следующие проблемы цифровой трансформации существующих производственных технологий:

- устаревание базы метрологического обеспечения производственных технологий (зачастую измерения проводятся в ручном режиме, что значительно увеличивает трудоемкость работ, время, затраченное на конкретное измерение, и, соответственно, стоимость единичной операции);
- невозможность быстрой модернизации устоявшейся технической инфраструктуры на предприятиях с долгой историей (нехватка аппаратных ресурсов, например, промышленного интернета);
- автоматизировано может быть только то, что стандартизировано (действующие стандарты предприятий были разработаны не для цифровых производственных технологий).



КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС БВ-9287
ДЛЯ УЗЛА ВЕДОМОГО ВАЛА РЕДУКТОРА ВБА 32/2

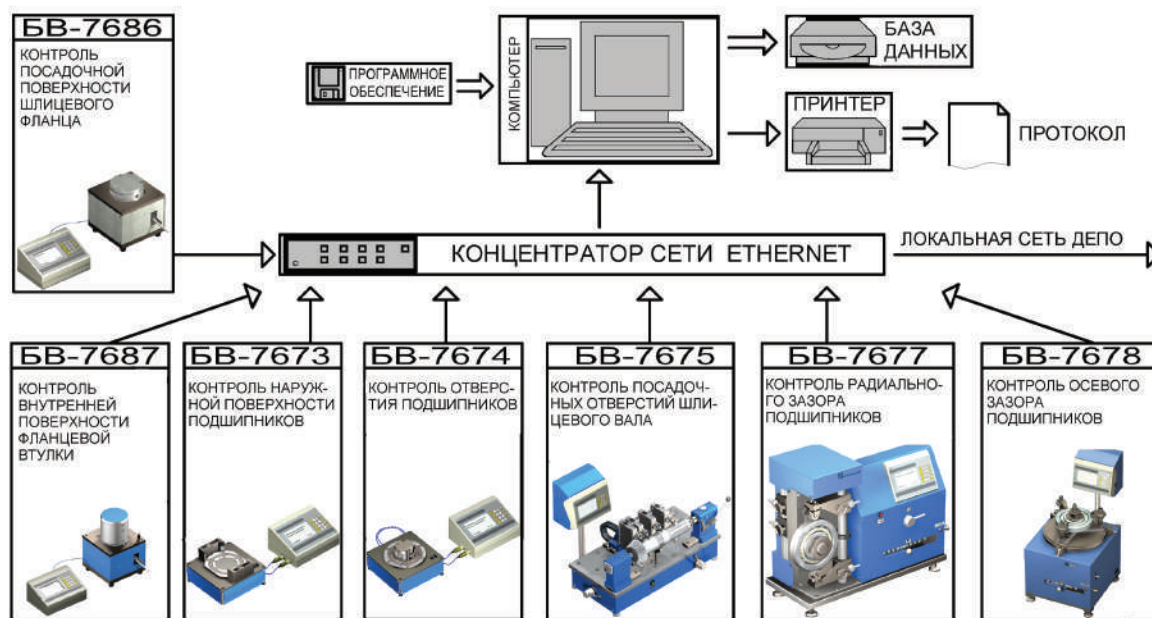


Рисунок. Типовой участок с объединением приборов в сеть

Интеграции измерительного оборудования в информационные системы и технологические процессы современного производства

На пути цифровой трансформации существующих производственных технологий, в первую очередь, необходимо модернизировать метрологическое обеспечение предприятия, а также согласовать устоявшуюся в отрасли нормативную базу с новыми подходами.

В рамках этого подхода АО «НИИИзмерения» спроектировало и поставляет свое измерительное оборудование с возможностью глубокой интеграции в информационные системы и технологические процессы современного производства. Типовой участок с объединением приборов в сеть показан на рисунке.

В такую сеть можно объединять любые приборы производства АО «НИИИзмерения». Заказчик может формировать под свои технологические нужды измерительный комплекс, набирая приборы в зависимости от технологии производства. Единственное, что надо будет настроить — это подбор деталей под конкретные требования заказчика. Все базы

данных имеют открытый формат (спецификация передается заказчику), что позволяет организовать доступ к данным с уровня выше (локальная сеть предприятия) и сопряжение с автоматизированной системой управления предприятия.

АО «НИИИзмерения» производит портативные мобильные приборы, которые перемещаются к объекту измерения и имеют автономное питание. Типичным таким прибором является «Скоба» БВ-7491. Этот прибор позволяет проводить измерения среднего диаметра, овальности, конусности для различных осей колесных пар. Имеет автономное питание (до 15 часов работы), позволяет накапливать результаты измерений в своей памяти и передавать их с помощью протокола Bluetooth на сервер или записывать на внешний USB накопитель. Электронный блок является собственной разработкой института, основан на микроконтроллере STM 400 серии, имеет цветной дисплей и использует операционную систему free RTOS. В настоящее время АО «НИИИзмерения» занимается разработкой моста Bluetooth-MODBUS

RTU для связи (передачи) данных в станки с ЧПУ.

Стационарные приборы АО «НИИИзмерения» также оснащены электронным блоком собственной разработки. В комплект поставки входит одноплатный компьютер архитектуры ARM под управлением оптимизированной операционной системы Linux. Дисплей может быть как сенсорным, с использованием емкостного экрана, так и оснащенным, по желанию заказчика, кнопками для управления. Все приборы имеют порт Ethernet (протокол TCP/IP), который необходим для передачи информации об измерениях на сервер. Для идентификации пользователей (операторов) используются электронные ключи Touch Memory. Это надежное и дешевое решение, проверенное временем. Сама идентификация происходит в момент передачи данных на сервер, это позволяет идентифицировать конкретное лицо, проводившее измерение. При измерении прибор автоматически выносит решение о годности детали (параметры допусков вводятся администратором системы).

Использование такого оборудования производства АО «НИИИзмерения», объединенного в комплекс, позволяет:

- уменьшить влияние человеческого фактора, ввести персональную ответственность;
- проводить контроль и анализ проведенных измерений и выявлять нарушения технологического процесса;
- автоматизировать процессы проведения измерения;
- формировать журналы в электронном виде;
- развернуть систему маркировки отдельных деталей;
- провести интеграцию с системами АСУ верхнего уровня;
- при необходимости провести интеграцию с другим оборудованием (например, со станками с ЧПУ).

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 737-р «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года».
2. <https://vys-tech.ru/2018/04/11/industriya-4-0/>
3. <http://www.micron.ru/information/articles/8/>



КОМПЬЮТЕРНАЯ ИГРА ПОЗНАКО- МИТ С ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГИИ

В Санкт-Петербурге представили детскую метрологическую компьютерную игру «Земля-СИ. Эталон плана по спасению Человечества». Проект реализуют ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, студенты Университета ИТМО (Центр научной коммуникации) и студия визуальных коммуникаций «Гонзо-дизайн» на веб-платформе Readymag.

Игра переносит участников в 2389 год. Ледниковый период. Люди эвакуированы на другую планету, где спят под контролем умных средств измерений. Спасет человечество метролог Миссис Кельвин, работающая в российском метрологическом институте, измерительный супергаджет ВНИИМ-GIRL и Экзочерепаха, способная вырастить на своем панцире новую обитаемую планету – Землю-СИ (так она названа в честь международной системы единиц).

В качестве виртуальных помощников выступают молодые ученые-метрологи системы Росстандарта. Благодаря интерактивным ссылкам пользователи смогут познакомиться с основными метрологическими понятиями, узнать, что такое эталоны и почему благополучие человечества зависит от точности и единства измерений.

Студенческий проект планируется представить в образовательном центре для одаренных детей «Сириус».

«С помощью игры понять основы такой сложной науки, как метрология, смогут и взрослые, и дети. Подобные цифровые технологии необходимы и уже активно применяются в обучении, чтобы будущие специалисты отвечали вызовам завтрашнего дня. Официальная презентация игры будет включена в программу ежегодного международного форума и выставки «МетролЭкспо-2020», где приборостроители представят самые современные разработки, технологии и сервисы в области обеспечения единства измерений», – отметил Руководитель Росстандарта **Алексей Абрамов**.

По материалам ВНИИМ им. Д.И. Менделеева