



СЯСЬКО
Владимир Александрович
Д-р техн. наук, президент
РОНКТД, ООО «КОНСТАНТА»,
Санкт-Петербург

INDUSTRIE 4.0 или INDUSTRY 4.0

В ноябре 2011 г. правительством Германии принята инициированная в феврале того же года стратегическая инициатива INDUSTRIE 4.0 — проект комплексной цифровизации промышленного производства в целях его лучшего оснащения для будущего, который в своей сути является стратегической инициативой по развитию прежде всего машиностроительного производства как основы современной экономики. Предполагалось, что промышленное производство как губка впитает современные информационные и коммуникационные технологии, используя интеллектуальные системы, объединенные в единую цифровую сеть. С их помощью должно стать максимально возможным самоорганизованное производство: люди, машины, системы, логистика и продукты будут общаться и взаимодействовать напрямую друг с другом. Сетевое взаимодействие оптимизирует не только отдельные этапы производства, но и всю цепочку создания стоимости/ценности, охватив все этапы жизненного цикла продукта — от идеи продукта, разработки, производства, использования и обслуживания до переработки. Производственные процессы должны строиться на основе единого информационного пространства, позволяющего в перспективе взаимодействовать между собой элементам производственных систем и системам в целом без участия человека, опираясь на «вездесущий» и мобильный Интернет, миниатюрные производственные устройства (киберфизические системы), искусственный интеллект и обучающиеся машины [1].

Прошло десять лет, уже забылось, что это национальный проект одной конкретной страны. Англоязычное «INDUSTRY 4.0» и сам номер 4.0 стали глобальными трендами.

Традиционно понятие «INDUSTRY 4.0» (INDUSTRIE 4.0) тесно ассоциируется с четвертой промышленной революцией, о наступлении кото-

рой объявил основатель и президент Всемирного экономического форума в Давосе Клаус Шваб в начале 2016 г.

В Германии подошли к делу неторопливо и обстоятельно. В январе 2011 г. проект был инициирован, а на Ганноверской выставке того же года концепция четвертой промышленной революции была представлена широкой общественности. В ноябре проект «Индустрия 4.0» был принят правительством Германии в рамках плана «Хай-тек-стратегия — 2020». В апреле 2013 г. промышленные союзы Германии ВІТКОМ, VDMA и ZVEI, объединяющие около 5 тыс. компаний, основали платформу «Индустрия 4.0» [2]. При поддержке платформы начали действовать самоорганизующиеся рабочие группы по различным аспектам внедрения проекта. В апреле 2014 г. платформа «INDUSTRIE 4.0» опубликовала первую версию эталонной модели архитектуры для INDUSTRIE 4.0 — Referenzarchitekturmodell für Industrie — RAMI 4.0 [3], цель которой — описание сложных взаимосвязей и разложение их на «удобные» фрагменты. Под новую архитектуру создаются новые стандарты DIN. 14 апреля 2015 г. была опубликована стратегия разворачивания проекта с промежуточными датами по каждому разделу до 2020 г.

В последние годы подобные инновации получили распространение в других промышленно развитых странах. В США эта инициатива возникла под названием «Промышленный интернет-консорциум», или сокращенно ПС. Консорциум промышленного интернета был основан в марте 2014 г. компаниями AT&T, Cisco, General Electric, IBM и Intel. Это некоммерческая организация, которая к началу 2016 г. имела уже более 200 членов, среди участников также неамериканские компании. В Японии есть проекты под названием «Инициатива по цепочке создания стоимости в промышленности», или сокращенно ІVI, лидерами которой являются крупные японские компании. В пятилетнем плане 2015 г. Китай также выступил с инициативами, аналогичными немецкой платформенной индустрии 4.0. Они должны существенно поддержать желаемый переход от страны с низкой заработной платой к мировой промышленной державе. Южная Корея инвестирует в так называемые умные фабрики. В некоторых европейских странах существуют другие виды деятельности, сопоставимые с платформой INDUSTRY 4.0, например во Франции под названием Industrie du futur.

Четвертый этап революционных преобразований в промышленности и, возможно, в социальной сфере, которые мы переживаем в настоящее время,

основан на следующих четырех ключевых направлениях деятельности:

- широком (всепроницающем) распространении Интернета и подключении к нему самых разнообразных неодушевленных объектов (интернет-вещей), оснащенных проводным или беспроводным стандартизованным каналом связи с информационно-коммуникационной сетью и всемирной системой объединенных компьютерных сетей для хранения и передачи информации;
- интенсивном развитии концепции кибер-физических систем – информационно-технологической концепции, подразумевающей интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности любого вида, включая биологические и рукотворные объекты (рис. 1);
- разработке и реализации принципов построения умных фабрик – максимально интенсивного и всеобъемлющего использования сетевых информационных технологий и киберфизических систем на всех этапах производства продукции и ее поставки – создания ценности (рис. 2 и 3);
- активном применении цифровых двойников – цифровых копий физических объектов и/или процессов;
- адаптации идей искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения, основанного на теории искусственных нейронных сетей, применительно к производственным процессам и технологиям.

Авторы проекта убеждали и продолжают убеждать, что мы стоим у истоков фундаментальных изменений, по масштабу и последствиям четвертая промышленная революция радикально отличается от всех предыдущих и человечеству предстоит увидеть ошеломляющие технологические прорывы.



Рис. 1. Обобщенная структура киберфизической системы промышленных (машиностроительных) производств



Рис. 2. Умные производственные системы (smart factories)



Рис. 3. Сквозное полностью цифровое системное проектирование по всей цепочке создания ценности – digital end-to-end engineering across the entire value chain of both the product and the associated manufacturing system («цифровое производство» авиационных двигателей ПД-14 для авиалайнера МС21)

NDE 4.0

Идея усиленной интеграции киберфизических систем в производственные процессы, начиная с этапов проектирования высокотехнологичных изделий и проектирования/конфигурирования самих умных фабрик, на основе единого информационного и физического пространства, позволяющего в перспективе взаимодействовать между собой элементам распределенных производственных систем и системам в целом без участия человека, т.е. полностью автоматически, неизбежно захватила и специалистов в области методов, приборов и технологий неразрушающего контроля. Объективная необходимость встраивания методов, технологий и оборудования НК в умные распределенные процессы проектирования, производства и сопровождения продукции сформировала **новое междисциплинарное научно-техническое направление NDE 4.0 как область знаний о физических методах и устройствах для обнаружения неоднородностей материалов и изделий, а также определения их геометрических и физико-механических характеристик в целях количественной оценки структурной целостности и соответствия заданным проектным параметрам с использованием основных технических идей и принципов организации умных фабрик — INDUSTRY 4.0**

(включая единые принципы стандартизации и метрологического обеспечения). Целью развития указанного направления является построение сетей связанных интеллектуальных датчиков, образующих большие системы, встроенные в инфраструктуру распределенных «умных» предприятий/производств, развитие смежных инженерных дисциплин как основы обеспечения автономного долговременного функционирования этих систем на базе реалистичных моделей средств НК и МС, встроенных в робототехнические комплексы, использующих глубокое/машинное обучение, с последующей реализацией принципов искусственного интеллекта при НК и МС с учетом трендов ИНДУСТРИИ 4.0, а также решение задач, связанных с переходом от автоматизированного к автоматическому НК и МС в пределах полного жизненного цикла сложных технических систем и высокотехнологичных изделий.

Ключевой является идея встраивания средств и технологий НК в киберфизические системы и распределенные умные фабрики на основе реализации стратегии — реализация принципов организации единого физического и информативного пространства, позволяющего в том числе практически рассмотреть применение бесконтактных методов НК в поточном высокотех-

нологичном производстве. Это позволяет выделить группу терминов и направлений, объединяющих в единое целое процессы в рамках INDUSTRY 4.0 и NDE 4.0 (рис. 4) путем адаптации технологий и знаний связанных научных и технических направлений (например, метрологии, стандартизации, микроэлектроники, физики, материаловедения и многих других).

Обеспечение указанных целей и принципов при проектировании и построении структурных элементов умных производств и умных производств в целом требует изменения структуры измерительных преобразователей и средств НК в целом с учетом того, что они фактически должны быть многопараметрическими средствами измерения, обеспечивающими получение метрологически достоверной информации о контролируемых параметрах при подавлении мешающих факторов. Это предполагает применение интеллектуальных преобразователей — аддитивных датчиков с функциями метрологического самоконтроля [4], структура которых в киберфизической системе и умном производстве в целом, а также обеспечиваемые (выполняемые) функции представлены на рис. 5.

Также следует учитывать, что разработчики средств НК должны участвовать на всех этапах создания умных фабрик в рамках соблюдения единых принципов структурирования и проектирования, а также обеспечения достоверности получаемой информации и надежности при принятии управленческих решений. Разработка продукта (ценности), процесса и технологии его изготовления, сервиса, а также системы НК и МС, основанных на адекватных цифровых моделях, должна являться единым целым, основанным на общих принципах построения, стандартизации и метрологического обеспечения (рис. 6).



Рис. 4. Термины и направления деятельности, единые для процессов в рамках INDUSTRY 4.0 и NDE 4.0

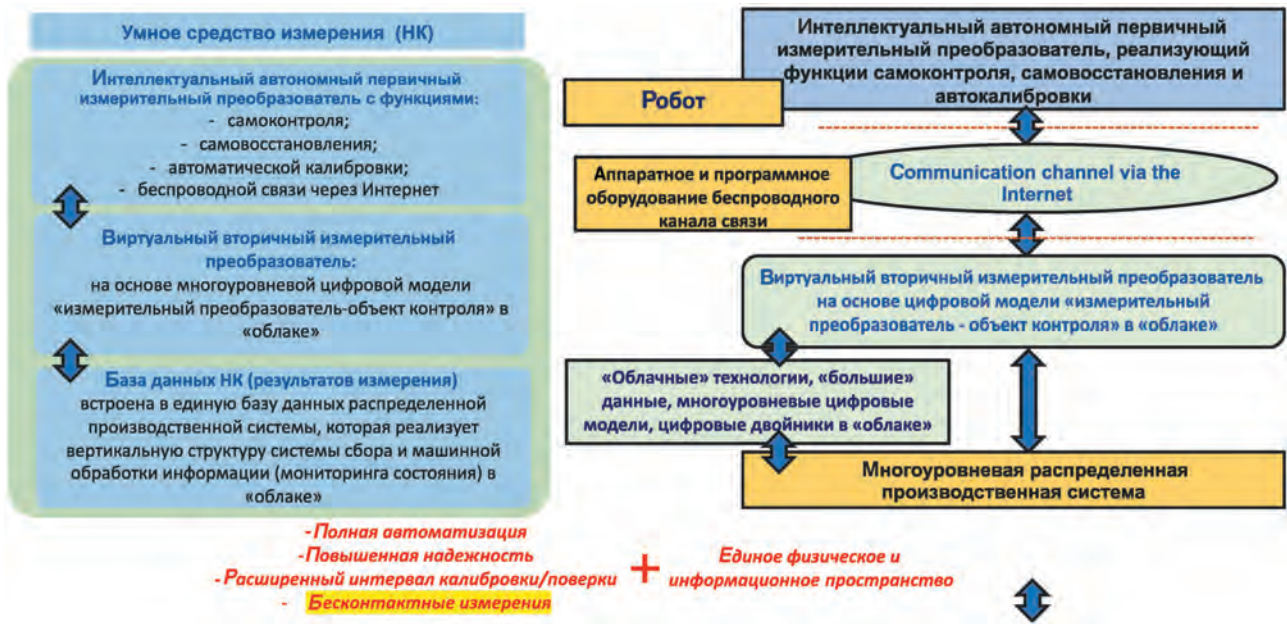


Рис. 5. Структура перспективных интеллектуальных измерительных преобразователей и их сопряжение с киберфизическими системами (CPS) умных производств

Кроме разработок отдельных специалистов, университетов и предприятий, в ряде стран по инициативе национальных и межгосударственных общественных организаций были созданы рабочие группы и исследовательские центры, в задачу которых входит выработка и последующая поддержка коллективного взгляда на будущие требования к НК в передовых отраслях про-

мышленности, а также формирование соответствующего перечня предложений для промышленных и государственных структур, обеспечивающих достижение синергетического эффекта на межотраслевом, национальном и международном уровнях, в конечном итоге направленном на обеспечение безопасности и улучшение благосостояния населения.

В Германии в структуре Германского общества по неразрушающему контролю выделено направление НК 4.0, в составе которого ведется работа четырех рабочих групп:

- аддитивное производство;
- интерфейсы для передачи данных и хранение данных;
- взаимодействие человека и машины;
- машинное обучение.

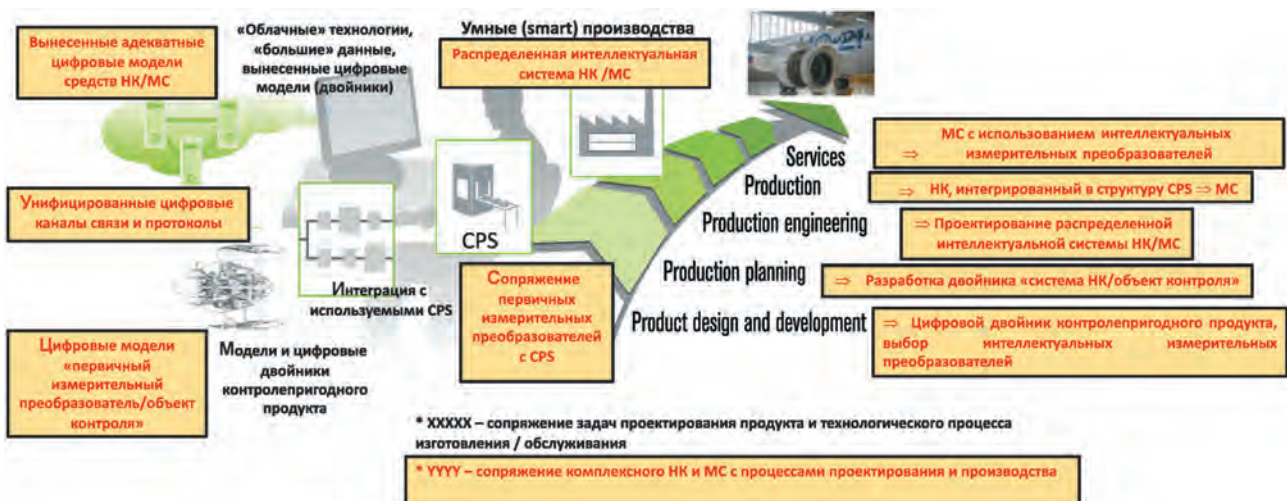


Рис. 6. Интеграция системы НК и МС в единую цифровую цепочку создания продукта (ценности), реализующую принцип digital end-to-end engineering across both entire value chain of the product and the associated manufacturing system (цифровая комплексная разработка всей цепочки создания ценности продукта и соответствующей производственной системы)

МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ

В Великобритании с участием BINDT был создан Исследовательский центр по НК (Research Centre in NDE – RCNDE) как ведущее научно-промышленное объединение, осуществляющее промышленно значимые исследования в области НК и структурного мониторинга состояния конструкций, объединяющее более 50 организаций, представляющих аэрокосмос, электро- и ядерную энергетику, нефтегазовую отрасль, оборонные и промышленные сектора.

EFNDT и ICNDT также организовали рабочие группы, в состав которых входят представители большинства национальных обществ.

NDE 4.0: КЛЮЧЕВЫЕ ЦЕЛИ (ЗАДАЧИ) И ПРОГНОЗЫ

Одной из задач рабочих групп и исследовательских центров была выработка неких взглядов на требования **собственно к технологиям и средствам НК и МС** на ближайшую (5 лет), среднюю (10 лет) и дальнюю (25 лет) перспективу, учитывающую вовлеченность в процессы, происходящие в промышленности ведущих мировых держав. Обобщение опубликованных исследований, проводимых примерно с 2010 г., позволяет выделить представленные ниже задачи, прогнозы и направления деятельности, учитывающие отдельные отраслевые тенденции, технологические возможности, инновации, будущие отраслевые потребности и потребности компаний, рыночные, нормативные, экологические и экономические факторы, а также фактор безопасности, сделанные на период примерно 2012–2045 гг. Задачи и прогнозы указали на новые (потребные) возможности НК, а также новые промышленные приоритеты, ориентирующиеся на эти возможности, и наоборот.

Обобщенные задачи и прогнозы включали:

- задачи и прогнозы развития новых технологий НК и МС: контроль композиционных материалов, функциональных покрытий, печатных материалов, определение характеристик дефектов и чувствительности контроля, бесконтактный контроль и др.;
- задачи и прогнозы в области структуры средств контроля материалов и изделий при производстве и эксплуатации: многопараметровый автоматический контроль, моделирование процесса контроля и сбора данных и др.;
- задачи и прогнозы технологического контроля при производстве изделий: самотестирование и самодиагностика средств НК, мониторинг состояния на всем жизненном цикле, машинное обучение, оценка и прогнозирование показателей надежности изделий и др.

Задачи и прогнозы в части методов, средств и технологий получения измерительной информации в таблице выделены зеленым шрифтом, крас-

ным – в части развития аппаратных средств автоматизации НК, синим – программных и аппаратных средств сбора и обработки измерительной информации, а также принятия решений.

Ключевое положение для обобщенного первого пятилетнего прогноза заключается в возможности благодаря достижениям в области методов, средств и технологий НК, ориентированных на использование в автоматизированном производстве, перейти к применению на предприятиях высокоточного высокоскоростного роботизированного НК, выполняемого бесконтактно в локальном физическом и информативном пространстве объекта контроля, соответствуя требованиям краткосрочного бизнес-планирования отдельных предприятий, а также определение тех потребностей бизнеса НК, которые должны быть решены на последующих этапах планирования.

Десятилетний обобщенный прогноз касается развития перспективных технологий как некоего плацдарма для перехода к безлюдным (автоматическим) технологиям НК в составе распределенных умных производств. При этом характерно, что потребности касаются не отдельных предприятий, а группы смежных производств, требующих организации свободного доступа к использованию данных НК и преодоления существующего в настоящее время ограничения с точки зрения обеспечения безопасности. В соответствии с прогнозом ключевым должно быть развитие высокопроизводительных сетей интеллектуальных измерительных преобразователей и средств обработки информации с применением многоуровневого моделирования как основы мониторинга состояния высокотехнологичных объектов, требующих использования распределенных интеллектуальных измерительных преобразователей, построенных, возможно, на одной из унифицированных баз и применяемых в технологическом процессе производства.

Для двадцатипятилетнего прогноза ключевыми фактически являются уход от разрушающего контроля (испытаний) при условии развития неразрушающего контроля как междисциплинарного направления и тотальный переход к мониторингу состояния как основы качества и работоспособности изделий, а также мониторингу самого технологического цикла производства при условии полностью автоматической обработки результатов и принятия решений на всех уровнях с использованием адекватных моделей, в том числе при общении встроенных в процесс киберфизических систем. При этом время, затрачиваемое на НК, не будет удлинять производственный цикл. Бесконтактные измерения в едином информационном и физическом пространстве при применении принципиально новых контролепригодных материалов должны стать реальностью.

Ключевые задачи и прогнозы в области НК и МС на 5, 10 и 25 лет

Через 5 лет	Через 10 лет	Через 25 лет
Новое в технологии контроля		
<ul style="list-style-type: none"> Использование теории материаловедения для повышения достоверности выявления и определения характеристик дефектов Контроль объектов сложной геометрии, в том числе многослойных со сложной внутренней структурой и неконтролепригодных ранее Уменьшение объема или полное исключение ручного контроля с последующей заменой роботизированным НК Использование манипуляторов с постоянно установленными или встроенными датчиками, применение локальных систем мониторинга Усложнение расчетных моделей с последующей экспериментальной проверкой Совместная обработка данных в режиме реального времени 	<ul style="list-style-type: none"> Системы моделирования методов и технологий НК Физические модели «измерительный преобразователь – объект контроля» и использование вероятностного подхода при выявлении дефектов (PoD) Единый формат данных, стандартизованные протоколы передачи данных, сжатие объема сохраняемых данных Распределенные сети измерительных преобразователей Автоматическая адаптация к характеристикам материала, многопараметровый контроль для подавления мешающих параметров Измерение механических характеристик материалов Универсальное автономное адаптируемое оборудование для удаленного НК Автоматическая обработка данных онлайн, помощь оператору в принятии решений Автоматический НК с использованием удаленного доступа 	<ul style="list-style-type: none"> НК изделий из любых материалов с полным 3D-отображением структуры Быстрый, бесконтактный НК больших площадей и на больших расстояниях датчиками без механического сканирования Построение моделей с учетом реальных свойств используемых материалов для оценки состояния конструкций Создание «цифрового двойника» объекта для оценки состояния конструкций в течение жизненного цикла Функциональная совместимость систем НК и мониторинга, полная автоматизация обработки данных Внедрение систем искусственного интеллекта Биологические датчики
Новое в структуре средств контроля материалов и изделий		
<ul style="list-style-type: none"> Минимизация объема ручного контроля Широкое использование роботов и манипуляторов для НК и МС эксплуатируемого оборудования, особенно при ограничении доступа или в неблагоприятных условиях Использование долговечных, надежных, постоянно установленных датчиков, объединенных в распределенные сети для мониторинга развития дефектов Локальные системы мониторинга состояния в ответственных недоступных областях эксплуатируемых изделий 	<ul style="list-style-type: none"> Расширение областей мониторинга и скрининга на объектах больших площадей Автоматические самокалибрующиеся датчики с расширенным сроком службы Переход от неразрушающего контроля к мониторингу состояния Широкий выбор универсальных платформ для удаленного и автоматизированного производственного НК (краны, БПЛА и т.д.) 	<ul style="list-style-type: none"> Полное оснащение заводов системами НК с дальностью 10 – 100 км Методы самоконтроля для производственных структур, умные системы неразрушающего контроля и мониторинга состояния Интеграция систем мониторинга и НК в структуру умного предприятия для получения полной информации о его состоянии и оптимизация его функционирования
Новое в технологическом контроле при производстве изделий		
<ul style="list-style-type: none"> Развитие технологического мониторинга производственных процессов (для металлических и неметаллических изделий) НК для изделий, изготовленных по аддитивным технологиям Высокоточный роботизированный НК для протяженных/крупногабаритных объектов сложной формы 	<ul style="list-style-type: none"> Онлайн-томография изделий, изготавливаемых по аддитивным технологиям Операционный технологический НК в процессе производства, заменяющий выходной контроль 	<ul style="list-style-type: none"> Разработка материалов, удобных для НК Конструирование оборудования/изделий с учетом контролепригодности Комплексная оценка продукции, при которой качество каждого из компонентов должно обеспечивать прогнозируемые эксплуатационные характеристики Полный мониторинг цикла производства продукции от заготовки до покупателя Проведение НК без увеличения длительности производственного цикла

Основополагающими моментами, обеспечивающими реализацию указанных в таблице задач в контексте решения аналогичных задач в рамках инициативы INDUSTRIE 4.0, кроме собственно развития НК как междисциплинарного направления, являются: обеспечение достоверности, а возможно, и избыточности, многопараметрической первичной измерительной информации, гарантированной адекватности двойников изделий, средств НК и моделей «многопараметрический измерительный преобразователь – объект контроля», а также подтвержденной квалификации пользователей, что может гарантироваться только соответствующей системой метрологического обеспечения и стандартизации, позволяющей реализовать единство подходов при построении измерительных преобразователей и распределенных сетей, каналов связи и форматов данных в рамках единства терминов и определений.

Следует также обозначить общетехнические задачи, решение которых будет базой для практической реализации указанных целей:

- 1) разработка базовых принципов построения и реализация автономных монокристаллических (монокорпусных) интеллектуальных первичных измерительных преобразователей для умных распределенных систем с возможностью самотестирования и удаленной калибровки (поверки), обеспечивающих:**
 - автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия мешающих параметров и/или старения компонентов;
 - самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике;
 - самообучение с использованием цифровых моделей в облачном пространстве;
 - передачу информации по беспроводным быстродействующим цифровым каналам связи;
- 2) обеспечение системного подхода к измерениям в области НК как многопараметрическим, учитывающим влияние контролируемых и мешающих параметров на результаты измерения;**
- 3) разработка, стандартизация и законодательное утверждение новых принципов метрологического обеспечения распределенных сетей интеллектуальных измерительных преобразователей:**
 - обеспечение прослеживаемости измерительной информации, получаемой при процедурах контроля, к первичным эталонам, обеспечивающим единство и достоверность исходных данных для систем мониторинга и управления;
 - обеспечение адекватности процедур самоконтроля и самокалибровки первичных измерительных преобразователей (интеллектуальных датчиков);
 - метрологическое обеспечение и верификация методик интерпретации получаемых данных,

включая цифровые модели распределенных систем НК;

- метрологическое обеспечение и валидация расчетных моделей (цифровых двойников) объектов контроля;
 - аттестация методик контроля на основе комплексных испытаний на реальных объектах или контрольных образцах;
- 4) оснащение автономных средств измерения (СИ) беспроводным коммуникационным оборудованием для подключения через Интернет к единому облачному пространству:**
 - разработка и утверждение (стандартизация) формата представления измерительной информации;
 - создание аппаратно-программной платформы (платформ) для обмена данными, а также сбора и обработки информации от средств измерения, подключенных к Интернету (единому облачному пространству);
 - разработка и утверждение единого универсального формата представления данных о средстве измерения (тип, заводской номер, метрологические характеристики и т.д.);
 - 5) разработка и утверждение единого подхода к построению программно-аппаратных платформ сбора и обработки данных в части:**
 - универсальных форматов сбора и хранения информации;
 - правил использования цифровых моделей для обработки исходных данных;
 - формата размещения данных в облачных хранилищах;
 - требований по защите информации;
 - 6) разработка системы метрологического обеспечения многоуровневых цифровых моделей (в том числе облачных) распределенных автономных средств измерений (интеллектуальных датчиков) и объектов контроля для расчета контролируемых параметров и параметров надежности объектов, гарантирующих:**
 - адекватность и полноту используемых физических моделей;
 - применимость используемых математических методов;
 - точность задания параметров моделируемых объектов и граничных условий их применения;
 - испытание цифровых моделей при утверждении типа измерительных преобразователей;
 - возможность ведения реестра цифровых моделей;
 - возможность аттестации персонала и аккредитации организаций на право использования цифровых моделей для прогнозирования и управления реальными объектами и процессами;

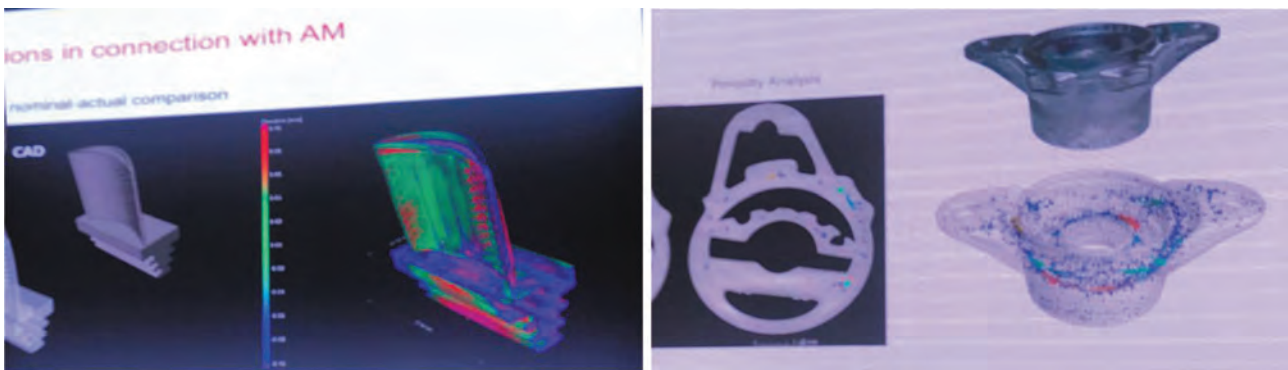


Рис. 7. Результаты автоматического контроля деталей сложной формы с градацией шероховатостей и выделением дефектных областей или участков изделий

7) создание организационно-правовой системы и инженерно-технической инфраструктуры для установления полноты и адекватности цифровых моделей (верификации), установления ограничений их применимости (валидации), а также контроля за корректностью применения цифровых моделей в реальных условиях.

NDE 4.0: примеры достижений

Ряд концернов, пытающихся локально реализовать основные идеи стратегической инициативы, основываясь на выделенных направлениях развития в рамках принятых терминов и определений, общих для INDUSTRY 4.0 и NDE 4.0, спроектировали и создали предприятия или производственные участки, которые в целом могут быть отнесены к умным фабрикам с единым физическим и информационным пространством, основанным на киберфизических системах, использующих цифровые двойники изделий, с встроенными системами контактного или бесконтактного неразрушающего контроля и мониторинга состояния изделий и самих технологических процессов производства, реализующих в совокупности принципы «digital end-to-end engineering across the entire value chain of both the product and the associated manufacturing system» (см. рис. 6).

Концерн BMW (FRG) разработал автоматическую поточную производственную линию со встроенной системой 3D-рентгеновской томографии металлических деталей сложной формы для автомобиле- и авиастроения, отвечающей большинству признаков умных производств и тенденций INDUSTRY 4.0 и NDE 4.0. Отличительные черты производственной линии, интегрированной с системой контроля в рамках единого физического и информационного пространства:

- виртуальная модель «система НК – объект контроля» для всех контролируемых деталей;
- автоматические процессы обработки результатов (больших массивов данных) и принятия решений по результатам контроля;

- физическая и модельная привязка системы НК к технологическому процессу производства;
- интеллектуальный измерительный преобразователь с функциями самотестирования;
- программное обеспечение с функциями глубокого обучения (модель нейронной сети);
- переход от НК к МС изделий и технологического процесса производства;
- расширенный интервал автоматической калибровки.

Однако система не использует облачные технологии, отсутствует доступ к результатам контроля у сторонних организаций, не используются прочие интернет-технологии, которые должны стать ключевыми для распределенных умных фабрик. Все процедуры, связанные с хранением и обработкой данных, реализованы в рамках закрытых внутренних сетей концерна, обеспечивающих безопасность при их применении. Примеры результатов контроля деталей сложной формы представлены на рис. 7.

Концерн «Тойота» при участии фирмы Tessonics разработал автоматическую поточную линию сварки кузовов автомобилей со встроенной системой мониторинга технологического процесса сварки и управления сварочным оборудованием непосредственно в процессе сварки. Уникальностью оборудования является то, что в один из сварочных электродов встроен охлаждаемый ультразвуковой совмещенный пьезопреобразователь, работающий в эхо-режиме (рис. 8).

В процессе сварки контролируется формирование ядра сварки. Графическое (восстановленное) изображение позволяет оценить параметры формирующегося ядра в процессе сварки и корректировать параметры технологического процесса. При этом в режиме реального времени проводится контроль глубины проникновения ядра сварки в пластины, момента начала плавления, скорости затвердевания расплава, факта выплеска и момента выплеска с возможностью оперативно-

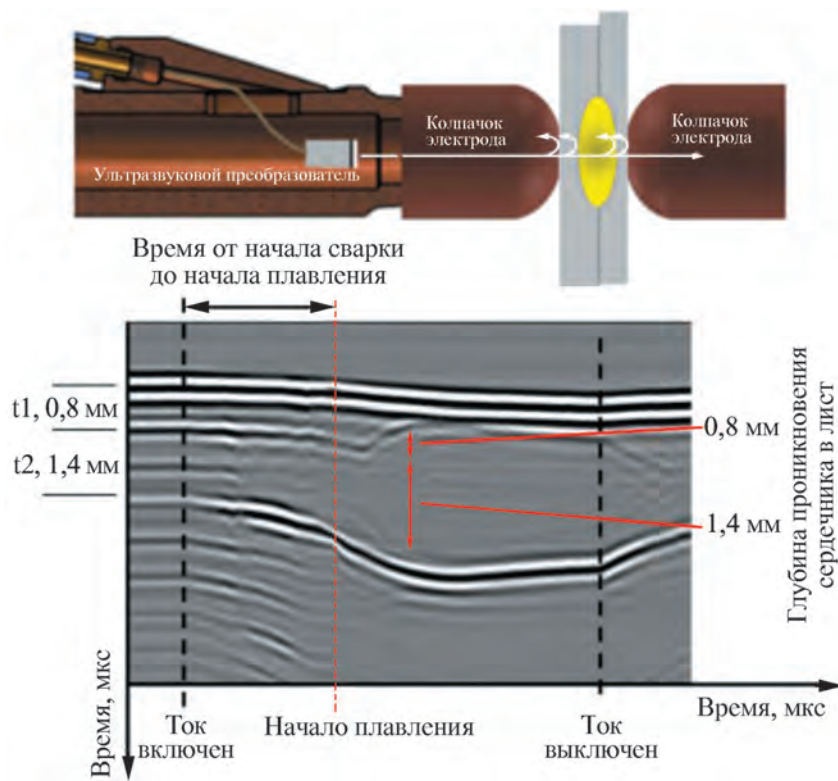


Рис. 8. Электроды сварочного автомата со встроенным ультразвуковым совмещенным преобразователем и временная диаграмма, иллюстрирующая процесс формирования ядра

го управления параметрами сварочного процесса в реальном времени. Моделирование процесса контроля сопряжено с необходимостью учета состояния металла в процессе сварки, что накладывает дополнительные требования к валидации систе-

мы и всего комплекса аппаратного и программного обеспечения. Дополнительно реализована система глубокого обучения (разработка соответствующих методик, образцов и алгоритмов). Все процессы, с учетом их быстротечности, выполняются

автоматически, также автоматически выполняется самотестирование оборудования, обеспечивающее высокую достоверность результатов на длительных временных интервалах эксплуатации. Оборудование позволяет реализовать еще одно из требований – неизменность времени основных технологических процессов при введении операций неразрушающего контроля. Однако этой системе также присущи ограничения, связанные с нерешенностью вопросов обеспечения безопасности и скорости передачи информации с использованием облачных технологий. Все процессы обработки и хранения информации выполняются с применением исключительно заводского оборудования.

В ряде случаев возникает задача автоматического неразрушающего контроля в процессе монтажа/изготовления высокотехнологичного оборудования на различных заранее подготовленных площадках, в частности оборудования на атомных электростанциях. При этом ставится задача замены рентгеновского контроля на ультразвуковой. По заказу концерна «РОСАТОМ» фирмой «ЭХО+» была разработана автономная система размерного ультразвукового автоматического

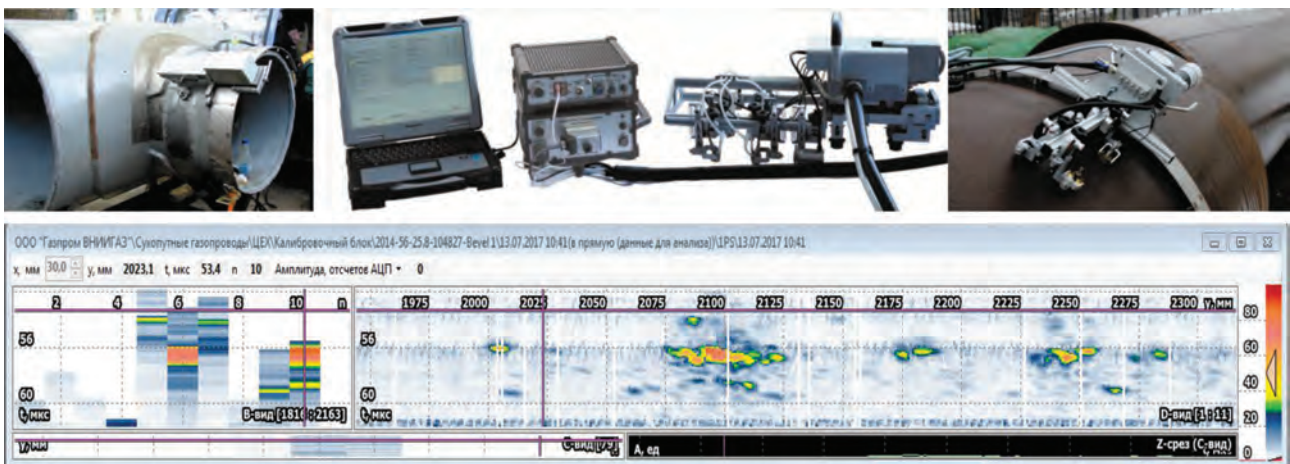


Рис. 9. Автономная система размерной ультразвуковой автоматической дефектоскопии при контроле сварных швов с использованием методов TOFD и фазированных решеток и автоматическое формирование результатов контроля

контроля сварных швов с использованием методов TOFD и фазированных решеток (рис. 9). Были решены задачи:

- совместной когерентной обработки тысяч эхо-сигналов для получения изображения отражателей с высокой фронтальной разрешающей способностью и низким уровнем шума;
- восстановления изображения отражателей с учетом эффектов преломления и отражения от границ объектов контроля и смены типа ультразвуковых волн, анизотропных и неоднородных свойств материала в районе сварного шва и неоднородных границ объекта контроля.

Это потребовало создания виртуальной библиотеки образов дефектов, располагаемой в облачном пространстве, а также методик использования при обратных преобразованиях и автоматическом формировании результатов контроля.

Применение указанных в таблице методов, технологий и методик обратных преобразований в сочетании с облачными технологиями позволило добиться результатов ультразвукового контроля, сопоставимых с рентгеновскими (рис. 10).

Однако основным вопросом, ограничивающим применение системы контроля, является необходимость использования облачных технологий, безопасного хранения и доступа к виртуальным моделям и образам типовых внутренних дефектов, а также неопределенность процедур верификации и валидации моделей и методик проведения неразрушающего контроля.

Также следует отметить достижения в применении бесконтактных методов и технологий при неразрушающем контроле и мониторинге. При рассмотрении задач, являющихся ключевыми в направлениях INDUST-

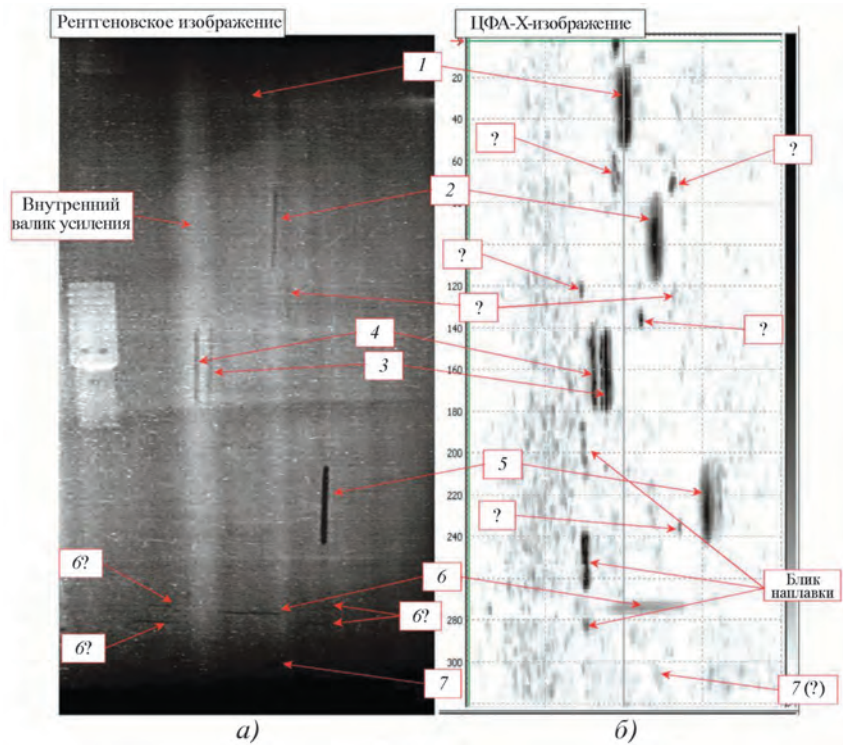


Рис. 10. Рентгенограмма всего образца (а) и свернутое по максимуму изображение С-типа, полученное как объединение по среднему на поперечной волне в режиме тройного сканирования (б)

RY 4.0 и NDE 4.0, также акцентировано внимание на необходимости мониторинга состояния изделий на протяжении всего жизненного цикла и развития бесконтактных методов и технологий неразрушающего контроля. В качестве примера решения таких задач можно привести совместную работу фирм Boeing, Airbus и Automation Technology (FRG) – технологию и методику мониторинга состояния нового поколения самолетов «Боинг 787» и «Аэрбас 350» с большим числом стеклопластиковых элементов и узлов в процессе эксплуатации. Одна из главных задач – стопроцентный высокопроизводительный НК обшивки фюзеляжа при плановых обследованиях в ангарах и оперативный НК в полевых условиях в случае механических воздействий на элементы конструкции самолетов (удары птиц, молний, столкновения с наземным оборудованием и др.). Комитет по

ремонту композитов коммерческой авиации (CACRC) сталкивается с этими проблемами при необходимости принятия оперативных решений по дефектации и ремонту на разных континентах. Именно активная термография удовлетворяет указанным требованиям для этих моделей самолетов. Форма отчетных документов позволяет пересылать их высококвалифицированным экспертам в любую точку мира (например, в проектные бюро) для принятия решения об уровне опасности дефектов и необходимости проведения ремонта. Методы активной термографии и выпускаемое на их базе оборудование все активнее развиваются как базовые для вновь проектируемых крупногабаритных изделий авиа- и ракетостроения. В частности, ведутся работы по использованию вихревых токов в качестве источника теплового нагружения, решаются вопросы автоматизи-



Рис. 11. Система активной термографии C-CheckIR. Варианты исполнения и применение

рованного контроля с применением многокоординатных роботов и пр. Описываемая система включает в свой состав один из вариантов исполнения переносного мобильного комплекса активной термографии C-CheckIR (рис. 11), методики применения, программное обеспечение для безбазовой привязки результатов контроля к цифровым двойникам воздушных судов, автоматические интерфейсы для передачи защищенной информации, системы автоматической обработки результатов и принятия решения о критичности выявленных повреждений конструкции и выдачи заключений о необходимости проведения ремонтных работ и остановки эксплуатации (рис. 12).

Система обеспечивает практически полную автоматизацию процессов передачи и обработки информации, а также частичную

автоматизацию при формировании перечня рекомендаций для эксплуатирующих организаций. В ходе разработки решен вопрос защиты информации при ее передаче от места проведения контроля до головных офисов фирм — разработчиков самолетов. Можно утверждать, что эта система обеспечивает риск-ориентированный подход при эксплуатации высокотехнологичного оборудования в распределенной системе эксплуатации и обслуживания.

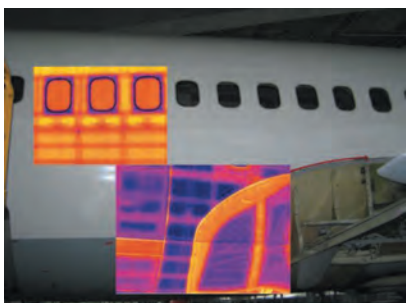
Можно привести еще достаточно яркие примеры решений в области неразрушающего контроля и мониторинга состояния, которые можно в целом отнести к направлению NDE 4.0, в том числе в области аддитивных технологий. Однако следует констатировать, что они носят локальный характер и многими специалистами рассматривают-

ся как достижения в области роботизации и автоматизации процессов обработки измерительной информации, а не ростки действительно революционных изменений.

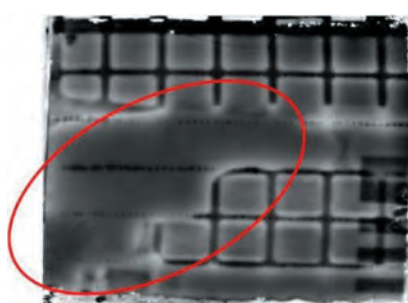
Интеграция INDUSTRY 4.0 и NDE 4.0. Некоторые промежуточные итоги

Прошедшие десять лет позволяют подвести некоторые итоги и связать результаты проекта INDUSTRIE 4.0 (направления INDUSTRY 4.0) и фактически инициированного специалистами в области НК междисциплинарного направления NDE 4.0.

Прежде всего следует отметить, что параллельно с разработками в технической сфере в рамках стратегической инициативы INDUSTRIE 4.0 были обозначены различные проблемы и риски, связанные с реализацией проекта: информационная безопасность, изменения на рынке труда (обучение новым компетенциям, исчезновение старых профессий), вовлечение в процесс не только промышленных гигантов и государственных корпораций, но и неизбежное вовлечение малых и средних предприятий, составляющих основу немецкой и мировой экономики. Казалось, что вот-вот произойдет что-то грандиозное. Индустрия 4.0 выйдет, наконец, из стадии планирования и исследований в цеха и начнет приносить свои плоды. Прошло десять лет, новые тех-



а)



б)

Рис. 12. Привязка дефектограмм участков в районе иллюминаторов и крыла с изображением самолета в отчетном документе для последующей обработки результатов применительно к цифровому двойнику самолета и принятия решения (а) и дефектограмма с местами расслоения стеклопластиковых элементов фюзеляжа (б)

нологии действительно впечатляют. Но в большинстве случаев они созданы фактически вне рамок немецкого проекта и не относятся к реформированию производства как такового. При этом утверждается, что настоящая революция еще впереди. Индустрия 4.0 еще не достигла цели, первое десятилетие было учебным. Но даст ли рынок компаниям еще десять лет на раскачку?

Опросы немецких предприятий выявили проблемы пробуксовки Индустрии 4.0, среди которых: недостаточность финансовых ресурсов (77 % опрошенных); требования к конфиденциальности (61 %) и ИТ-безопасности (57 %); нехватка специалистов (55 %). Несмотря на то что 95 % немецких промышленных компаний по-прежнему рассматривают INDUSTRY 4.0 как шанс для своего бизнеса, две трети (66 %) честно признали себя отстающими [5]. В последние годы прирост производительности труда в Германии самый низкий со времен Второй мировой войны. Всплеска, связанного с INDUSTRY 4.0, за исключением небольшого количества локальных решений в рамках ведущих мировых концернов, например «Сименс», не наблюдается. Многие производственные компании переключились на внедрение разнообразных цифровых систем, но явной отдачи от этих инвестиций пока нет. При этом оставшиеся «без присмотра» фундаментальные проблемы в цехах остаются нерешенными. Очевидно, что необходимо трезво посмотреть на неизбежность внедрения цифровых технологий как основы всей четвертой промышленной революции (а ведь прошло всего десять лет) и еще раз (через сорок лет!) подтвердить верность и неизбежность проявления парадокса Солоу (парадокса производительности) [6], определенного в восьмидесятых годах прошлого века как воспринимаемое несоответствие между показателями инвестиций в информационные технологии (ключевые в инициативе INDUSTRIE 4.0) и показателями выпуска продукции на национальном, а в настоящее время и международном уровне. Это еще раз подтверждает вывод о том, что в очередной раз мы наблюдаем отложенный во времени экономический эффект, что неоднократно наблюдалось при внедрении действительно прорывных технологий. В частности, в электроэнергетике эффект стал явно ощутимым лишь через 40 лет после начала электрификации. Аналогичная картина наблюдается в годы разворачивания проекта INDUSTRIE 4.0. Немецкие предприятия в последние годы все больше инвестируют в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) и информационные технологии. Но проблема в том, что одновременно сокращаются вложения в совершенствование продуктов, процессов и оборудования.

Происходит снижение темпа роста производительности. Также в качестве причин парадокса следует выделить управленческие ошибки, связанные с объективным отсутствием компетенций и опыта в вопросах глобальной цифровизации, вытекающее отсюда недостаточное использование потенциала новых технологий, негативные последствия увеличения объемов информации, высокие издержки на совершенствование технологических процессов при внедрении информационных технологий, завышенные ожидания. Необходимо признать, что ожидать сверхбыстрых экономических результатов от цифровой трансформации и внедрения новых технологий не приходится.

При этом базовым должен быть следующий тезис: цифровизация неэффективных процессов приводит лишь к неэффективным цифровым процессам, т.е. только комплексный подход позволит добиться значимых результатов.

Ключевые задачи и прогнозы, разбитые на три временных интервала, приведенные в таблице, а также указанные базовые общетехнические задачи при их комплексном решении могли бы в прошедшие десять лет и могут в будущем обеспечить технический и экономический эффект в рамках направления NDE 4.0. Некоторые методические и технические вопросы/задачи в области методов, средств и технологий НК (обобщенный первый пятилетний прогноз), не требующие объединения усилий в масштабах страны или на международном уровне, достаточно успешно решаются фирмами за счет собственных материальных и интеллектуальных ресурсов или при незначительной государственной поддержке. Однако задачи в рамках десятилетнего обобщенного прогноза, а также выделенные ключевые общетехнические задачи, не говоря уже о задачах двадцатипятилетнего прогноза, не могут быть решены в рамках фирм и даже концернов, так как имеют междисциплинарный характер и в общем случае требуют того или иного согласования и утверждения подходов на законодательном уровне (стандарты, нормативные документы, утвержденные методики и т.д.).

Действительно, анализ показывает, что в целом основные задачи обобщенного первого пятилетнего прогноза за прошедшие десять лет выполнены. Поэтому при подведении некоторых итогов развития направления NDE 4.0 с учетом объема и сложности задач следующих двух этапов и упомянутых уже общетехнических задач следует констатировать следующее:

- направление является междисциплинарным, охватывающим самые широкие области знаний и технологий, начиная от фундаментальных ос-

нов физических методов получения измерительной информации, микроэлектроники и программирования, метрологического обеспечения до безопасной передачи, хранения и обработки измерительной информации при обеспечении свободного доступа к ней специалистов в области технической диагностики и других смежных областей деятельности;

- необходимо прежде всего решить вопросы в области терминов и определений, разумно увязав их, но отнюдь не копируя, с уже утвержденными в ряде национальных стандартов терминами и определениями в части стратегической инициативы INDUSTRIE 4.0/INDUSTRY 4.0;
- необходимо организовать платформу NDE 4.0 под эгидой одного из национальных обществ либо EFNDT или ICNDT (по аналогии с принятыми организационными решениями в рамках стратегической инициативы INDUSTRIE 4.0). В крайнем случае попытаться открыть раздел NDE 4.0 на общепромышленных платформах (см., например, [2]);
- направление по-настоящему может развиваться только в рамках стратегической инициативы INDUSTRIE 4.0/INDUSTRY 4.0 при тесной кооперации со специалистами смежных областей деятельности, прежде всего материаловедов, технологов, специалистов в области математического моделирования, обработки и передачи информации, а также стандартизации;
- направление требует объединения усилий специалистов не только на национальном уровне, но и на межнациональном;
- специалисты в области НК и МС должны участвовать в работе профессиональных групп, решающих вопросы цифровизации в производственной и управленческой сферах;
- особое внимание следует уделить взаимодействию с метрологическим сообществом, так как наметился стремительный переход от неразрушающего контроля как испытаний к измерительному неразрушающему контролю с использованием цифровых моделей в рамках автоматических производств и измерительных систем, работающих в непрерывном цикле, предполагающих самотестирование и автокалибровку. Взаимодействие возможно на европейской или национальных метрологических платформах [7, 8].

Учет указанных требований, фактически сводящийся к объединению усилий сообществ специалистов и ученых разных профилей на межнациональном уровне, позволяет надеяться, что в ближайшие десять – пятнадцать лет будут решены задачи десятилетнего обобщенного прогноза и будут заложены основы автоматическо-

го многопараметрового неразрушающего контроля и мониторинга состояния высокотехнологичных изделий, сложных технических систем и технологических процессов их изготовления, а также риск-ориентированного подхода при эксплуатации до момента утилизации, обеспечивающие безопасность и комфорт жизни всего человечества.

Из положительного хочется отметить то, что в ICNDT сформирована активно работающая группа NDE 4.0, в состав которой вошли ведущие специалисты национальных обществ Азии, Европы и Америки. Были сформулированы основные направления работы и выделены приоритеты, намечены пути взаимодействия с ISO, решаются вопросы координации работ объединений специалистов и национальных обществ, актуальные вопросы регулярно обсуждаются на всемирных, европейских и региональных конференциях по неразрушающему контролю.

Библиографический список

1. **Industrie 4.0 und Echtzeit** / herausgegeben von: Wolfgang A. Halang, Herwig Unger. Springer Vieweg, 2014. (Informatik Aktuell). ISBN 978-3-662-45108-3
2. **What is the Plattform Industrie 4.0.** URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html>
3. **Industrie 4.0: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0).** URL: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zvei-faktenblatt-rami.pdf?__blob=publicationFile&v=4
4. **ГОСТ Р 8.673–2009.** Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019.
5. **Horn A.** Zehn Jahre Industrie 4.0: Null Produktivitätsfortschritt/Alexander Horn // Telepolis. 13 September 2021. URL: <https://www.heise.de/tp/features/Zehn-Jahre-Industrie-4-0-Null-Produktivitaetsfortschritt-6189847.html>
6. **Robert Solow.** "We'd better watch out" // New York Times Book Review, July 12, 1987, 36 p.
7. **Сясько В.А.** Неразрушающий контроль и вызовы четвертой промышленной революции // В мире НК. 2018. № 2. С. 8 – 12.
8. **Gogolinskiy K., Syasko V.** Prospects and challenges of the Forth Industrial Revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring // Insight. 2019. No. 8. P. 434 – 447.