

## БОЛАШАҚ МЕТРОЛОГИЯСЫ: ДӘЛ ӨЛШЕМДЕРГЕ АРНАЛҒАН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ЖӘНЕ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕР

АНДАТПА

Бұл мақалада жасанды интеллекттің (ЖИ) метрологияны қалай түрлендіріп, деректерді талдау мен өлшеу дәлдігін арттырудың инновациялық әдістерін ұсынатыны туралы ақпарат берілген. Қателерді түзету, үлкен деректерді өңдеу және құралдарды калибрлеуді оңтайландыруға көмектесетін заманауи машиналық оқыту әдістері сипатталған. Сенсорлардың деградациясын болжау, өлшеу белгісіздігін бағалау, өзгермелі жағдайларға бейімделу және метеорология мен климатологиядағы болжамдық модельдердің дәлдігін арттырудағы ЖИ мүмкіндіктері қарастырылады. ЖИ технологиялары неғұрлым дәл және сенімді өлшеу жүйелерін құруға ықпал етеді, бұл климаттық зерттеулер мен басқа да ғылыми салаларда жаңа мүмкіндіктер ашады.

Сондай-ақ, жасанды интеллект (ЖИ) пен цифрлық егіздердің өзара байланысы және олардың бір-бірін толықтыратын мүмкіндіктері қарастырылады. Цифрлық егіздер нақты объектілердің, жүйелердің немесе процестердің жағдайын және мінез-құлқын нақты уақыт режимінде дәл көрсететін виртуалды модельдер болып табылады. Жасанды интеллект өз кезегінде цифрлық егіздердің аналитикалық және болжамдық мүмкіндіктерін кеңейтуге көмектеседі.

**Түйінді сөздер:** метрология, жасанды интеллект, өлшеу жүйелері, цифрлық егіздер.

## МЕТРОЛОГИЯ БУДУЩЕГО: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

АННОТАЦИЯ

В данной статье приведена информация о том, как искусственный интеллект (ИИ) трансформирует метрологию, предлагая инновационные подходы к автоматизации анализа данных и повышению точности измерений. Описаны современные методы машинного обучения, которые помогают исправлять погрешности, обрабатывать большие объемы данных и оптимизировать калибровку приборов. Рассматриваются возможности ИИ в прогнозировании деградации сенсоров, оценке неопределенности измерений, адаптации к изменяющимся условиям и повышении точности предсказательных моделей в метеорологии и климатологии. Технологии ИИ способствуют созданию более точных и надежных измерительных систем, что открывает новые перспективы в климатических исследованиях и других научных областях.

Также рассматривается связь между цифровыми двойниками и искусственным интеллектом (ИИ) и в их взаимодополняющих возможностях. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели реальных объектов, систем или процессов, которые могут точно отражать их состояние и поведение в реальном времени. Искусственный интеллект, в свою очередь, помогает расширить функциональность цифровых двойников, улучшая их аналитические и предсказательные возможности.

**Ключевые слова:** метрология, искусственный интеллект, измерительные системы, цифровые двойники.

## METROLOGY OF THE FUTURE: ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TWINS AS TOOLS FOR PRECISE MEASUREMENTS

ANNOTATION

This article provides insights into how artificial intelligence (AI) is transforming metrology by offering innovative approaches to automating data analysis and improving measurement accuracy. It describes modern machine learning methods that help correct errors, process large volumes of data, and optimize instrument calibration. The paper examines AI capabilities in predicting sensor degradation, assessing measurement uncertainty, adapting to changing conditions, and enhancing the accuracy of predictive models in meteorology and climatology. AI technologies contribute to the development of more accurate and reliable measurement systems, opening new prospects in climate research and other scientific fields.

The relationship between digital twins and artificial intelligence (AI) is also explored, highlighting their complementary capabilities. Digital twins are virtual models of real-world objects, systems, or processes that accurately reflect their current state and behavior in real time. AI, in turn, enhances the functionality of digital twins by improving their analytical and predictive capabilities.

**Keywords:** metrology, artificial intelligence, measurement systems, digital twins.



## Введение

Количество исследований, посвящённых искусственному интеллекту, резко возросло в текущем столетии. В этой области существуют международные стандарты и десятки проектов стандартов, как национальных, так и международных, касающихся искусственного интеллекта. Однако известные определения ИИ противоречивы. Между тем ИИ в основном рассматривается с трёх позиций: как набор свойств, как набор технологий и как инженерная дисциплина.

В рамках данной статьи ИИ рассматривается как набор свойств, позволяющих анализировать данные, поступающие по входным каналам, получать знания, строить представления, формировать концепции и переосмысливать их в зависимости от результатов самообучения.

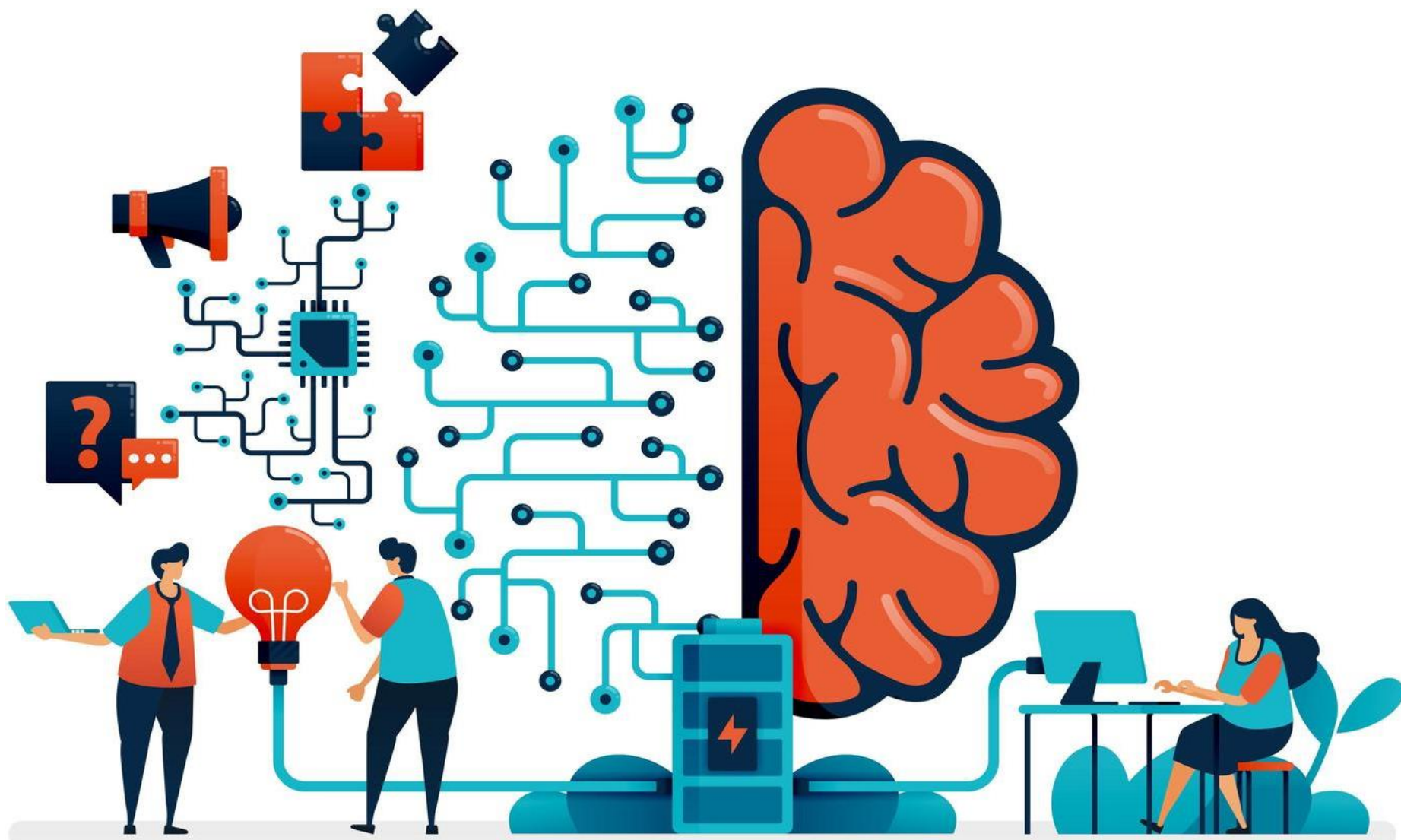
Устройствами входных каналов могут быть различные датчики и другие измерительные преобразователи. На основе анализа данных искусственный интеллект может выявлять корреляции между данными, распознавать изображения, измерять многомерные величины, классифицировать их, прогнозировать изменения в соотношениях различных параметров со временем,

а также принимать решения или предлагать их человеку-оператору.

В настоящее время задачи, как правило, формулируются человеком-оператором. Во многих случаях ИИ находит алгоритм для их решения, иногда не информируя об этом оператора. Однако через несколько лет люди будут ставить только стратегические задачи, в то время как тактические задачи, такие как подавление мешающих воздействий или устранение неполадок, будут выполняться ИИ самостоятельно.

Таким образом, если в прошлом технические системы создавались для увеличения возможностей отдельных органов человека (рук, ног, глаз и т.д.) и для ускорения решения простых математических задач, то развитие искусственного интеллекта открывает перспективу повышения способности человека к решению задач когнитивного характера.

Поскольку уровень сложности и разнообразие задач, которые должны выполняться системами, основанными на искусственном интеллекте, различны, разумно создать ряд типов систем, отличающихся по уровню искусственного интеллекта.



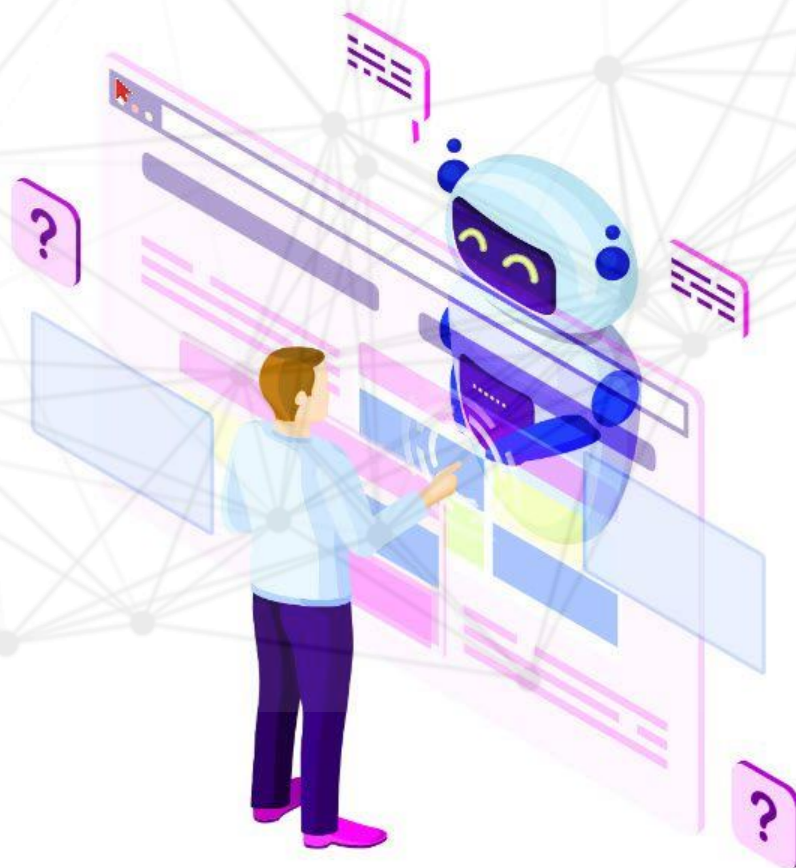
Связь искусственного интеллекта и цифровых двойников в метрологии становится все более значимой, поскольку они взаимно усиливают друг друга, улучшая точность, надежность и эффективность измерений. Искусственный интеллект, особенно методы машинного обучения, обеспечивает анализ и интерпретацию больших объемов данных, которые поступают от цифровых двойников, что способствует более глубокому пониманию процессов измерений и повышает качество метрологических данных.

Цифровое двойникование — это быстро развивающаяся область исследований. Цифровые двойники объединяют модели и данные для получения актуальной информации о состоянии системы, помогая принимать обоснованные решения в таких областях, как мониторинг конструкций и современное производство. Использование метрологических данных для обновления моделей таким образом приносит преимущества во многих сферах, включая саму метрологию. Недавние мероприятия по цифровизации метрологии предоставляют уникальную возможность преобразовать метрологические данные в «цифровые двойники» и интегрировать их в метрологические процессы.

В данной статье рассматриваются ключевые особенности цифровых двойников, которые способствуют их применению в метрологии и измерениях, подчеркиваются связи между цифровыми двойниками и виртуальной метрологией. Описано, как метрология может использовать цифровых двойников и как метрологические данные могут способствовать их применению, а также предлагаются потенциальные направления будущего развития, направленные на максимизацию достигнутых выгод.

### **Видение искусственного интеллекта, его возможностей и перспектив**

В настоящее время ИИ принято делить на слабый (узкий) и сильный (общий). Системы, основанные на слабом искусственном интеллекте, извлекают информацию из ограниченного набора данных и способны справляться только с конкретными задачами, для которых они были обучены. Как правило, такие системы ориентированы на задачи, которые, будучи выполненными человеком, не требуют высокой квалификации, но требуют регулярного использования обновляемых справочных данных. Часто коммуникация подобных систем с человеком, включая разговорные навыки с ограниченным словарным запасом, также обязательна.



К таким задачам можно отнести, например, работу официанта, охранника, гида, переводчика, кладовщика и т.д. Следует отметить, что системы, основанные на слабом искусственном интеллекте, в настоящее время получили широкое распространение, и количество их видов и объемы продукции, производимой с их использованием, неуклонно растут.

Системы с сильным искусственным интеллектом значительно дороже. Они способны рассуждать, принимать решения в условиях неопределённости, планировать, обучаться, интегрировать предшествующие знания при принятии решений, предлагать новые идеи и т.д. Можно предположить, что системы с сильным ИИ также будут выпускаться в нескольких вариантах, в зависимости от конкретных задач, которые они призваны решать.

Возможно, в будущем возникнет потребность в координации действий между несколькими роботами, оснащёнными ИИ, для решения новых задач. В частности, это будет необходимо для выполнения действий одновременно или для совместной обработки информации, поступающей из множества источников, количество которых может превышать возможности одного ИИ-устройства.



Очевидно, что прошивка робота позволит осуществлять такого рода сотрудничество. Например, робот сможет «понимать», что не может справиться с задачей самостоятельно, и инициирует сотрудничество. По сути, такой упреждающий запрос о помощи будет означать эмоциональный отклик, который, если его воспримет другой робот, ознаменует начало эры социализации роботов. Техническая революция такого рода неизбежна, так как она открывает новые перспективы для развития цивилизации.

Естественно, потребуется кодекс этики для ИИ-систем, который позволит исключить нежелательные последствия их социализации. Примечательно, что в 2021 году в России был опубликован Кодекс этики для искусственного интеллекта. Он устанавливает «общие этические принципы и стандарты поведения, которыми руководствуются участники отношений с искусственным интеллектом, а также соответствующие механизмы реализации положений настоящего Кодекса». Кодекс применяется к отношениям, связанным с этическими аспектами разработки (проектирования, инжиниринга, пилотирования), внедрения и использования технологий искусственного интеллекта на всех этапах жизненного цикла. В документе подчёркивается, что «люди, их права и свободы должны рассматриваться как высшая ценность».

Тем не менее маловероятно, что подобный документ способен в корне изменить направление развития робототехники. По мере того как число роботов, способных к эмоциональным реакциям, превысит определённый предел, возможна более развитая социализация, возможно, с участием заинтересованных людей.

Тогда можно ожидать спонтанного отбора лидеров, которые смогут ставить задачи для группы роботов, и скрытого влияния людей на изменения прошивки роботов. Это порождает предположения о возможных конфликтах между роботами и людьми. История цивилизации предоставляет множество примеров подобных ситуаций во взаимоотношениях между человеческими сообществами. Как правило, такие конфликты возникают при нарушении этических норм, установленных как религиозными, так и государственными законами.

### Измерительные системы на основе искусственного интеллекта

Проблема предотвращения конфликтов между роботами и людьми пока не является актуальной темой, хотя забывать о ней не следует. В настоящее

время перед специалистами по метрологии стоит другая задача: эффективное применение искусственного интеллекта для целей измерений.

Первое направление работы включает идентификацию многомерных величин, характеризующих отклонения от номинальных значений, измерение параметров этих величин и определение динамики отклонений во времени. Следующий этап — разработка методов и средств, позволяющих получить желаемый результат, который зависит от решаемой задачи.

Существует несколько групп задач, связанных с применением искусственного интеллекта и машинного зрения в метрологии, включая задачи, направленные на обнаружение скрытых дефектов и трещин в материалах, используемых в критически важных изделиях. Одной из таких задач является поиск неровностей в материалах, что особенно важно для обеспечения безопасности конструктивных опор и других элементов инфраструктуры.

Обычные методы ультразвукового анализа эффективно обнаруживают наличие неровностей при панорамном сканировании, однако такие методы часто имеют ограничения по точности и времени анализа. Использование многоканальных измерений с применением устройств на основе искусственного интеллекта позволяет значительно повысить эффективность этих процессов. Когда результаты измерений, проведенных с помощью таких устройств, показывают корреляцию между различными точками пространства при определенных воздействиях на опору или при изменении этих данных во времени, это становится индикатором наличия скрытых трещин. Такой подход позволяет оперативно выявлять потенциальные угрозы и предпринимать меры по их устранению, что значительно повышает безопасность эксплуатации критических объектов.

Пример из метрологии можно привести в контексте наблюдения за деформациями или изменениями структуры материалов в различных условиях. В метрологических измерениях, например, для мониторинга точности геодезических сетей или мониторинга устойчивости конструкций (мостов, зданий и т. д.), системы, использующие ИИ, могут анализировать данные с многочисленных датчиков и, на основе корреляции и анализа данных, выявлять потенциальные аномалии или структурные изменения, которые могут быть связаны с деформациями или ухудшением состояния объекта.





Так же задачи связаны с мониторингом климатических изменений и прогнозированием метеорологических условий. Системы на основе искусственного интеллекта могут анализировать огромные объемы данных, поступающих с метеостанций, спутников и других источников, чтобы выявлять долгосрочные климатические тренды, а также предсказывать аномальные погодные явления, такие как ураганы, наводнения и засухи. Благодаря возможностям самообучения такие системы могут адаптироваться к новым климатическим условиям и помогать ученым точнее моделировать изменения климата.

Кроме того, искусственный интеллект может играть ключевую роль в автоматизации процессов контроля качества на производстве. Системы ИИ способны проводить анализ собранных измерений и выявлять дефекты продукции на ранних стадиях, что минимизирует риск выпуска бракованной продукции и снижает издержки на последующее устранение дефектов. Эти системы особенно востребованы в производстве высокоточных компонентов, где малейшие отклонения могут привести к серьезным последствиям.

Таким образом, искусственный интеллект в измерительных системах представляет собой мощный инструмент, способный повысить точность измерений и расширить возможности диагностики в самых различных отраслях — от медицины и климатологии до промышленности и инфраструктуры.

Повышение достоверности "измерений", выпол-

няемых с участием экспертов, до приемлемого уровня, исключающего грубые ошибки, является вторым направлением метрологических исследований и разработок, которое опирается на возможности измерительных систем на основе искусственного интеллекта.

Чтобы свести к минимуму влияние субъективных факторов, экспертные суждения должны быть приведены к общей шкале. При выборе экспертов следует учитывать уровень их компетентности, который зависит от задач, которые предстоит решить. Это требование может быть выполнено с помощью искусственного интеллекта. Полезным методом является, например, корреляционный анализ ответов экспертов на абстрактные вопросы в сочетании с рядом показателей, характеризующих особенности нейрофизиологической активности экспертов (таких как биоритмы мозга, звучание голоса и т.д.) при проведении их оценок.

Искусственный интеллект стал ключевым фактором в преобразовании метрологии, при этом машинное зрение играет одну из ведущих ролей в обеспечении высокой точности и автоматизации измерений. Системы машинного зрения, интегрируя камеры, датчики и передовые алгоритмы ИИ, способны захватывать и интерпретировать визуальные данные с непревзойденной точностью, что делает возможным проведение высокоточных измерений и производство компонентов с исключительным качеством.



ИИ в метрологии не ограничивается только статическими измерениями. Он эффективно обрабатывает динамические данные, что позволяет мониторить в реальном времени движущиеся компоненты, сложные поверхности и геометрические формы. Это значительно улучшает понимание и контроль за производственными процессами. Контроль качества является основным аспектом любого производственного процесса, и ИИ с машинным зрением значительно улучшает этот процесс. В отличие от традиционных методов, ИИ-системы не только проверяют компоненты на наличие дефектов и отклонений, но и делают это с постоянной последовательностью, исключая человеческие ошибки и усталость. Благодаря обработке данных в реальном времени, системы ИИ могут мгновенно выявлять любые отклонения от стандартов качества, что позволяет оперативно устранять проблемы и предотвращать выпуск дефектных продуктов.

Реальная сила ИИ заключается в способности мгновенно анализировать данные, что создает замкнутый цикл обратной связи в производственной линии. Это позволяет быстро реагировать на изменения и оперативно вносить корректировки, что значительно повышает эффективность и сокращает время, затрачиваемое на контроль качества.

Данные в реальном времени: катализатор усовершенствования метрологии. Внедрение искусственного интеллекта и машинного зрения в метрологию выводит точность измерений на новый уровень. Обработка данных в реальном времени позволяет мгновенно анализировать и использовать информацию по мере ее поступления, что резко сокращает время ожидания результатов и ускоряет процесс принятия решений.

Традиционные процессы измерений, включающие несколько этапов — проведение измерений, запись данных и последующий анализ — часто занимают много времени. Включение ИИ и машинного зрения значительно сокращает этот цикл. Измерения фиксируются и немедленно обрабатываются, предоставляя точную информацию о соответствии компонентов стандартам качества.

Это сокращение времени цикла измерений не только ускоряет производство, но и позволяет быстрее выявлять отклонения и устранять их, что существенно повышает эффективность метрологических процессов. ИИ позволяет оперативно корректировать параметры измерений, минимизируя время и ресурсы, затрачиваемые на проверку.

Слияние искусственного интеллекта и машинного зрения в метрологии приводит к революционным изменениям в производственных процессах. Эта синергия не только обеспечивает непревзойденную точность измерений, но и изменяет подходы к контролю качества, сокращая время обработки данных и повышая гибкость производства. Внедрение ИИ в метрологию откроет новые возможности для производства высококачественной продукции с минимальными затратами времени и ресурсов, обеспечивая значительные конкурентные преимущества в глобальной экономике.

### Цифровые двойники

Определение цифрового двойника до сих пор находится в стадии обсуждения, однако основные компоненты — объект, модель и поток данных между ними — признаны необходимыми элементами. "Близнецовая" часть названия предполагает начальную идентичность реального и виртуального объектов с сохранением их высокого сходства с течением времени, что требует обновления модели.

Первоначальное определение НАСА трактовало цифровой двойник как метод управления автопарком, используя физические модели для мониторинга состояния техники и прогнозирования её ресурса. Некоторые исследователи утверждают, что поток данных должен быть двусторонним, чтобы модель могла влиять на физический объект. Другие рассматривают модель более широко, включая концептуальные модели и базы данных, что расширяет определение, но может снижать его прогнозные функции. Виртуальные тестовые среды, особенно в автономных транспортных системах, часто представляют модель как "фотореалистичное представление" без обновления реального состояния среды.

Цифровой двойник обновляется данными от реального объекта; обратный поток необязателен, но может быть полезен. Цифровой двойник, например, может применяться для мониторинга износа испытательного оборудования, что позволяет планировать замены и оптимизировать производственные процессы. В то же время некоторые исследователи, особенно метеорологи, не называют свои модели "цифровыми двойниками", хотя методики, такие как ассимиляция данных для корректировки прогнозных моделей, потенциально могут быть полезны для развития цифрового двойничества.



## Виртуальная метрология: отличия от цифровых двойников

Многие цифровые двойники основываются на физических моделях. Использование физических моделей для проектирования изделий десятилетиями остается стандартной практикой в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и гражданское строительство. Подобные методы давно применяются и в метрологии для проектирования оборудования, проведения экспериментов и анализа их результатов. Воспроизведение этапов измерительной процедуры в "виртуальном метрологическом эксперименте" может быть крайне полезным, даже если это не является полноценным аналогом цифрового двойника. Недавно в рамках программы стратегических исследований, разработанной европейскими метрологическими институтами (Европейская метрологическая сеть Mathmet), виртуальная метрология была выделена как ключевая область для дальнейших исследований. Программа описывает текущее положение дел и определяет направления для будущих исследований. Также следует отметить, что виртуальная метрология уже широко используется в полупроводниковой промышленности. Разнообразие определений термина "цифровой двойник" иногда приводит к тому, что в некоторых статьях более уместным было бы использовать термин "виртуальная метрология". Примером является работа, где кинематическая модель твердого тела координатно-измерительной машины (КИМ) применяется для оценки неопределенностей, связанных с некоторыми геометрическими и оптическими характеристиками работы устройства. Эти характеристики признаны ключевыми факторами неопределенности для многих приборов. В статье модель проверяется путем сравнения изменений значений, полученных в 100 измерениях одного и того же артефакта, с изменениями значений, полученных в 100 виртуальных измерениях эквивалентного виртуального артефакта. Два набора значений имели одинаковый диапазон; стандартное отклонение измерений составило 0,645 мкм, а для смоделированных данных – 0,684 мкм.

Другой пример приводится в работе, где детально описаны основные элементы, необходимые для создания виртуального метрологического эксперимента, прослеживаемого и соответствующего лучшим практикам оценки

неопределенности. В обоих случаях отсутствует поток данных из реального мира и обновление модели, что отличает их от концепции цифрового двойника.

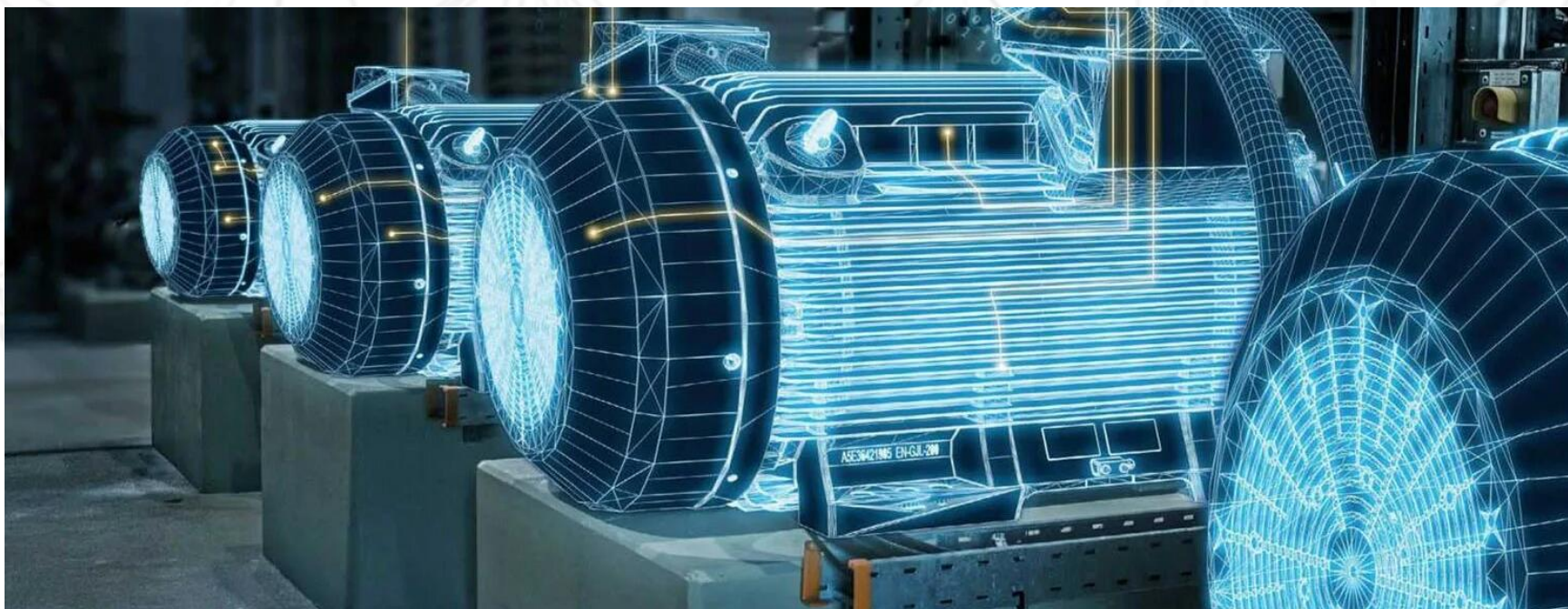
В работе используется модель CAD изделия и виртуальная КИМ для определения стратегии измерения геометрических характеристик изделия с последующим экспортом стратегии в формате, читаемом реальной КИМ. Это позволяет виртуальной и реальной КИМ выполнять одни и те же шаги и измерения, что делает данные сопоставимыми без дополнительной обработки. Результаты затем отображаются на модели CAD для удобства интерпретации.

Анализ статей о цифровых двойниках и метрологии показывает, что большинство из них сосредоточено на промышленной метрологии, а не на применении цифровых двойников для поддержки фундаментальных исследований в метрологии. Наиболее активное применение цифровых подходов наблюдается в размерной метрологии, особенно в координатной, поверхностной и метрологии произвольной формы.

### Примеры включают:

- разработку подходов для метрологии и контроля деталей самолетов с поддержкой цифровых двойников;
- использование цифрового двойника оптической микрокоординатной измерительной машины для безопасного планирования траектории измерений;
- сокращение времени измерений в структурированной световой метрологии за счет объединения измеренных и смоделированных данных;
- создание точного цифрового двойника для калибровочных артефактов произвольной формы.





Некоторые из этих примеров скорее представляют собой виртуальную метрологию, чем полноценные цифровые двойники. Тем не менее, использование цифровых двойников в КИМ (координатно-измерительных машинах) могло бы изменить подход к эксплуатации КИМ, включая требования к температурному контролю. Если бы цифровой двойник, моделирующий реакцию КИМ на изменения температуры, был проверен и доступен, это позволило бы снизить уровень контроля температуры, используя двойник для корректировок. Хотя многие КИМ уже имеют алгоритмы температурной компенсации, они обычно возвращают значения к одной заданной температуре, не учитывая её колебания во время измерений.

Интересно, что именно промышленная метрология продвинулась в использовании цифровых двойников дальше других областей. Это связано с несколькими факторами: размерные величины обычно задают критерии приемлемости деталей; в сложных проектах уже много лет применяются цифровые данные и автоматизированные измерения; стандарты CAD, такие как ISO 10303-21-2016 «Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange. Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure», упрощают создание цифровых двойников, делая их интуитивно понятными. Дополнительно, использование оптических методов в измерениях генерирует большие объемы данных, требующих базовой модели или визуализации для их интерпретации. Использование цифровых двойников пока встречается редко, но в будущем может существенно поддержать метрологию и измерительную науку.

### **Цифровые двойники для измерительных систем: оценка неопределенности**

Правильная оценка соответствия характеристик продукции геометрическим спецификациям требует, чтобы результат был предоставлен в соответствии с измерениями, используемыми в метрологии, и оценкой неопределенности. Это представляет собой важную проблему. Методы оценки неопределенности в координатных методах измерений (СММ) требуют значительных затрат времени и часто требуют использования специальных стандартов, многочисленных представлений и обширных знаний персонала. В условиях промышленности 4.0, где необходимы короткие сроки и высокий контроль качества, решение этой проблемы возможно через использование виртуальных измерений, то есть создание цифрового двойника, который имитирует поведение физического аналога, учитывая погрешности, такие как влияние окружающей среды, характеристик измерительного устройства, стратегий измерения и заготовки.

Метод Монте-Карло (МК) на основе виртуальных измерений позволяет оценить неопределенность измерений, что делает возможным определение этой неопределенности. Использование виртуальных экспериментов и цифровых двойников в метрологии требует не только методов оценки неопределенности, но и надежных процедур валидации, чтобы они могли быть использованы как замена или расширение сертифицированных измерительных приборов.



Общая структура цифровых метрологических двойников как программного обеспечения для оценки неопределенности была предложена Пороскуном и соавторами. Эта работа стала основой для разработки программного обеспечения для оценки неопределенности на основе метода МК, которое может быть использовано для разработки и внедрения новых измерительных систем. Структура была взята из СММ. Цифровые двойники для СММ для оценки неопределенности измерений на основе метода МК активно исследуются в последние годы. В разных решениях, использующих метод МК для оценки неопределенности, применяются те же предположения, что и в случае с цифровым двойником.

Для применения структуры программного обеспечения в различных областях метрологии была разработана вспомогательная библиотека, которая реализует процедуры оценки неопределенности.

Ян Сладек и Рафал Гаска, польские исследователи, известные своим вкладом в области координатной метрологии и точных измерений, разработали концепцию системы, позволяющей определять погрешности измерений до их выполнения. Это позволяет экспериментально определить ошибки компонентов, а затем выбрать стратегию измерения, обеспечивающую наибольшую точность. Исследование касается координатных измерительных машин (СММ) с контактной измерительной головкой. Система состоит из двух основных компонентов: симулятора СММ и его виртуальной модели точности. Симулятор позволяет определять задачи измерений, а виртуальная модель точности анализирует ошибки, возникающие в кинематической системе станка, с использованием экспериментальных данных о остаточных ошибках, которые не компенсируются системой коррекции ошибок.

Другим компонентом является модуль, моделирующий погрешности измерительной головки. Этот модуль учитывает связь погрешностей давления с направлением перемещения измеряемой точки. Для подготовки модели использовались данные, полученные путем измерения сферических модулей в различных точках.

В исследовании Vlaeyen и соавторы предложили метод оценки погрешностей измерений в цифровом двойнике оптической измерительной системы, состоящей из лазерного линейного сканера (LLS), установленного на СММ. Оценка неопределенности

для такой сложной системы является значительным вызовом из-за большого числа ошибок. В этом исследовании оценка неопределенности в LLS была выполнена с учетом различных факторов, таких как положение лазерного источника и направление движения, что позволило точно смоделировать погрешности. Метод Монте-Карло использовался для оценки неопределенности, и результаты были подтверждены экспериментами.

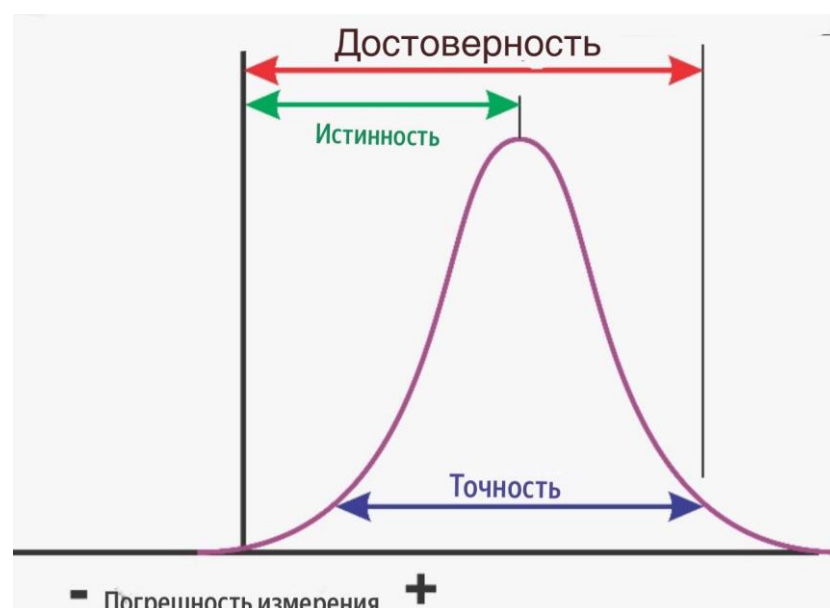
Таким образом, цифровой двойник оптической системы показал высокую надежность в оценке неопределенности для различных диаметров, и может быть использован для автономной оценки неопределенности, что позволяет сократить время на проверку. В дальнейшем исследователи планируют изучить влияние других факторов, таких как температура и характеристика поверхности, на точность измерений.

### Рекомендации для выполнения точных измерений с использованием систем машинного зрения

Методы, позволяющие проводить высокоточные измерения, хорошо изучены и основаны на твердых принципах. Калибровка имеет решающее значение для точных измерений.

Одной из возможностей машинного зрения, которая выходит за рамки человеческого зрения, является его способность производить измерения с высокой точностью и правильностью. В этой первой из трех частей обсуждаются методы, позволяющие системам зрения достигать высокоточных измерений. Рассмотрим проблемы достижения высокой точности и правильности и способы их решения.

■ Рисунок 1- Определение точности по ISO 5725



Стандарт ISO 5725 определяет истинность как фиксированное отклонение между средним значением серии измерений и принятым истинным значением размера. Истинность представляет собой систематическую ошибку, которую, по крайней мере теоретически, можно улучшить за счёт более точной калибровки. Точность, в свою очередь, – это случайное отклонение от истинности, которое наблюдается в каждом отдельном измерении и вызвано непредсказуемыми шумами. Обычно предполагается, что точность имеет нормальное (гауссово) распределение и выражается через стандартное отклонение.

Термин "достоверность" (accuracy) обозначает сочетание истинности и нескольких стандартных отклонений (обычно трёх) точности.

### Высокоточные методы измерения

Методы, используемые в машинном зрении для достижения высокоточных измерений, основаны на принципе статистики, который гласит, что если имеется ряд из нескольких значений, представляющих повторные измерения, и где каждое значение в ряду имеет неопределенность или вариацию со стандартным отклонением, то среднее значение нескольких значений будет иметь неопределенность неопределенность:

$$\sigma = \sigma / \sqrt{N} \quad (1)$$

где:

$\sigma$  - стандартное отклонение среднего значения, или неопределенность среднего значения (то есть точности усреднённого результата);

$\sigma$  - стандартное отклонение каждого отдельного измерения, отражающее вариацию между отдельными измерениями в ряду;

$N$  - количество измерений в ряду на основе которых вычисляется среднее значение.

Таким образом, обработка изображений в машинном зрении улучшает точность, а не истинность. Поскольку калибровка выполняется с использованием субпиксельных методов, истинность также часто составляет малую долю пикселя. Обработка изображений в машинном зрении обеспечивает только субпиксельную точность. Она не обеспечивает автоматически истинность или точность на субпиксельном уровне.

### Профиль края в оттенках серого

Рассмотрим метод повышения точности измерений, который заключается в подгонке точки края к значениям шкалы серого, пересекающим край – профилю края (см. Рисунок 2). Истинное положение края принимается как перегиб значений шкалы серого вдоль края. Перегиб соответствует пику в первой производной или нулевому пересечению во второй производной значений шкалы серого. Хотя вычислительно легче найти нулевое пересечение, чем пик, вторая производная, вероятно, более шумная, чем первая производная, что приводит к снижению точности.

Существует общее представление, что изображение не должно достигать насыщения или обрезаться в нижней части настройкой уровня черного камеры. Это может быть верно, если перегиб профиля края находится вблизи верхней или нижней части диапазона серой шкалы. Однако в целом, если обрезание не искажает форму волны вблизи перегиба, насыщение или обрезание уровня черного не повлияют на точность измерения.

Рисунок 2 - Интерполяция границ в оттенках серого



В случае, когда перегиб находится далеко от краев диапазона шкалы серого (например, когда он находится в средней части шкалы), можно позволить определенному уровню обрезания, не влияя на точность измерений. Важно, чтобы обрезание не происходило вблизи перегиба, иначе это может привести к искажению формы волны, что снижает точность измерения.

Таким образом, корректная настройка уровня черного и возможность насыщения или обрезания изображения зависят от конкретных характеристик изображения и точности измерений. Однако если обрезание происходит на безопасном расстоянии от перегиба и не нарушает его форму, оно не должно существенно повлиять на точность измерений.

Мы должны понимать, что сама калибровка подвержена ошибкам в правильности и точности.

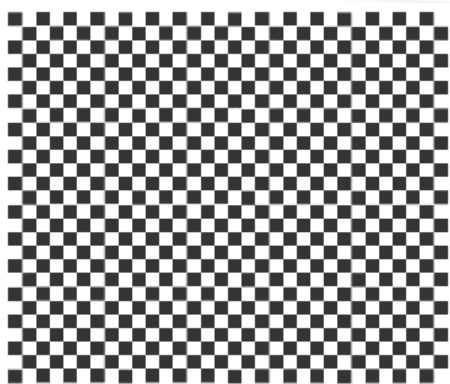


Рисунок 3 — Калибровочная цель; Шахматный узор

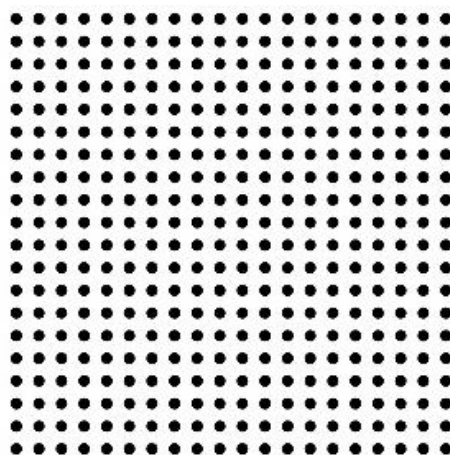


Рисунок 4 — Калибровочная цель; Массив точек

Типичная калибровка выполняется с помощью сетки точек или квадратов, как показано на рисунках 3 и 4. Центры точек или углы квадратов, определяемые с помощью субпиксельных методов, подгоняются под уравнения для коррекции искажений и масштабирования. Поскольку калибровка подразумевает использование такого большого количества точек данных, ее точность должна быть очень хорошей. Большинство калибровочных целей изготавливаются в соответствии с очень строгими стандартами качества и размеров. Однако точность и долгосрочная стабильность цели должны быть основными факторами при ее выборе.

Методы, позволяющие проводить высокоточные измерения, хорошо изучены и основаны на твердых принципах. Калибровка имеет решающее значение для точных измерений.

## Выводы

Использование ИИ, машинного зрения и цифровых двойников в метрологии значительно трансформирует подходы к измерениям, повышая их точность, скорость и эффективность. ИИ позволяет анализировать и обрабатывать большие объемы данных в реальном времени, улучшая способность систем предсказывать, диагностировать и оптимизировать процессы. Машинное зрение, интегрированное с современными алгоритмами ИИ, дает возможность не только обнаруживать дефекты и отклонения на производственных линиях, но и контролировать качество с непревзойденной последовательностью и точностью, что значительно повышает надежность измерений.

Цифровые двойники, являясь виртуальными репрезентациями физических объектов и процессов, позволяют проводить симуляции и мониторинг в реальном времени, интегрируя данные с различных датчиков и источников информации. Это дает возможность не только оптимизировать производственные процессы, но и предсказывать изменения и потенциальные неисправности, минимизируя риски и повышая безопасность.

Совмещение этих технологий в метрологии способствует значительному улучшению качества измерений, а также сокращению времени цикла и стоимости испытаний. Использование ИИ, машинного зрения и цифровых двойников открывает новые возможности для мониторинга, прогнозирования и контроля на всех уровнях: от отдельных измерений до глобальных систем. В результате, эти инновации не только укрепляют роль метрологии в различных отраслях, но и закладывают основу для дальнейших научных и технических прорывов, определяя будущее точных измерений и автоматизации в промышленности и науке. Цифровые двойники используют высокую информативность и актуальность данных, а также предсказательную силу моделей, чтобы обеспечить надежные выводы о текущем состоянии системы. Цифровые двойники могут быть полезны для метрологии, поскольку позволяют лучше понимать системы, которые изменяются со временем. В некоторых случаях анализ изменений характеристик во времени важен сам по себе; в других случаях цифровой двойник можно использовать для выявления аномального поведения.



Метрология, в свою очередь, может способствовать внедрению цифровых двойников, содействуя текущим усилиям по разработке цифровой структуры для передачи метрологических данных. Обеспечение согласованного подхода к цифровым системам и единой точки отсчета в виде системы СИ упростит обеспечение того, чтобы в системе цифровых двойников использовались правильные и согласованные единицы измерения. Гармонизация структуры постоянных систем позволит интегрировать калибровочные данные непосредственно в цифровые двойники, а более широкое применение цифровых паспортов, данных обеспечит разнообразие данных для разработки цифровых двойников.

Текущие исследования в различных областях, от встроенной метрологии до сенсорных сетей, будут способствовать практическому развитию и внедрению цифровых двойников, повышая надежность данных, которые они используют, точность прогнозов, которые они генерируют, и обоснованность принимаемых на их основе решений.

Сочетание ИИ и цифровых двойников открывает возможности для более точного моделирования, оперативного реагирования и оптимизации в самых разных областях: от промышленности до медицины и управления городским хозяйством.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

- Abramovici, M., Göbel, J. C., Savarino, P. "Reconfiguration of Smart Products During Their Use Phase Based on Virtual Product Twins." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, no 1 (2017): 165–168.
- Artificial Intelligence News Web Portal (<https://artificialintelligence-news.com>).
- Code of Ethics for Artificial Intelligence (in Russian) Web Portal (<https://www.profiz.ru/upl/2021>).
- Grieves, M. "Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication." White Paper, 2014.
- Kuts, V., Modoni, G. E., Terkaj, W., Tähemaa, T., Sacco, M., Otto, T. "Exploiting Factory Telemetry to Support Virtual Reality Simulation in Robotics Cell." *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 10324 (2017): 212–221.
- Lindqvist, R., Strand, D., Nilsson, M., Collins, V., Torstensson, J., Kressin, J., Spensieri, D., Archenti, A. "3D Model-Based Large-Volume Metrology Supporting Smart Manufacturing and Digital Twin Concepts." *Metrology* 3 (2023): 29–64.
- Luo, W., Hu, T., Zhang, C., Wei, Y. "Digital Twin for CNC Machine Tool: Modeling and Using Strategy." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10, no 3 (2019): 1129–1140.
- Mustapaa, T., et al. "Digital Metrology for the Internet of Things." 2020 Global Internet of Things Summit (GloTS) (2020). <https://doi.org/10.1109/GIOTS49054.2020.9119603>.
- Stark, J. "Product Lifecycle Management." In *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Springer, 2015: 1–29.
- Taymanov, R., Sapozhnikova, K. "The Role of Artificial Intelligence in Measuring Systems." In *Proceedings of the XXXI International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2021: 1–5.
- Wright, L., Davidson, S. "How to Tell the Difference Between a Model and a Digital Twin." *Advances in Modelling and Simulation in Engineering Sciences* 7 (2020): 13.