

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 338.364

DOI: 10.52190/2073-2597_2023_1_3

EDN: SKENUQ

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

М. А. Пирогова, канд. техн. наук; И. Е. Лешихина, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

В. А. Краюшкин, канд. техн. наук
ООО «Продуктивные технологические системы», Москва, Россия

Рассмотрены возможности использования технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта для повышения производительности и эффективности выполнения операций по контролю качества сборочных операций. Проанализированы особенности обеих технологий и специфика их практического применения.

Ключевые слова: дополненная реальность, искусственный интеллект, машинное зрение, цифровая трансформация производства.

Дорожные карты цифровой трансформации производства для отраслей дискретной промышленности предусматривают внедрение единых унифицированных технологических подходов на всех этапах жизненного цикла изделия и переходах между ними. В связи с этим все большую актуальность приобретает применение передовых информационных технологий "Индустрии 4.0" на "стыковых" операциях поточного производства, в том числе и для инспекции качества выполненных операций. Если в ходе проектно-конструкторских работ для такой инспекции возможно использование виртуального анализа, то непосредственно в процессе производства, на постах изготовления комплектующих единиц, узловой сборки изделий, монтажа агрегатов, проверка качества выполненных операций во многом зависит от опыта и умений сотрудников-инспекторов. Для повышения эффективности работы инспекторов посты контроля качества необходимо оснастить автоматизированными средствами, максимально использующими технологии "Индустрии 4.0".

Любая инспекция качества начинается с визуального осмотра изделия и выявления явных

его несоответствий ожидаемому результату. Для этого предлагается использовать технические решения, основанные на автоматизации процесса визуализации изображений, например технологии компьютерного зрения (машинного зрения), которые давно и прочно обосновались в промышленности среди технологий Интернета вещей [1]. Компьютерное зрение предлагается применять для оцифровки и трансляции изображения инспектируемого изделия в программное приложение, которое сопоставляет получаемый цифровой контент с заранее определенной цифровой моделью "идеального" изделия. Приложение, в котором можно получить результат такого сопоставления, должно работать в связке с программным обеспечением (ПО) для систем компьютерного зрения и передавать результат на устройство связи с инспектором. Результат представляется в виде цифровых значений параметров изделия, в форме звуковых сигналов, в виде цветовых сигналов или их комбинаций. Далее инспектор анализирует полученную информацию и принимает решение о том, является ли инспектируемый им образец качественным изделием, то есть наиболее полно соответству-

ющим "идеальному" образцу, или браком. В такой постановке задачи цифровой трансформации процессов визуального контроля качества выпускаемых изделий для ее решения требуется применение технологий, которые умеют работать с цифровым контентом "машинного зрения". Как следует из исследований авторов, к таким технологиям можно в первую очередь отнести метод одновременной локализации и построения карты *SLAM* (*simultaneous localization and mapping*) [2, 3] и тензорную классификацию на базе нейронных сетей глубокого обучения *DNN* (*deep neural networks*). Поскольку обе эти технологии не являются точными измерительными средствами, с помощью их применения автоматизируется только самый первый опыт, проверка "на первый взгляд", что позволяет оценить, похож ли рассматриваемый объект на то, что должно получиться в результате предыдущей операции (и он, следовательно, может быть продвинут далее по этапам жизненного цикла), или объект похож на дефектное изделие (то есть это брак исполнения предыдущей операции, и его нельзя передавать на следующий этап производства). Автоматизация первичной визуальной оценки качества изделия по его внешнему виду позволяет снизить количество неверно принимаемых инспектором решений, которые происходят или могут происходить при ускорении темпа работы, снижении внимания, повышении утомляемости, появлении эффекта замыливания глаз при длинных рабочих сменах и/или большом разнообразии ассортимента контролируемых изделий.

Применение технологии дополненной реальности для задачи визуального контроля

В рамках освоения систем и платформ дополненной реальности (ДР) в течение последних пяти лет авторы данной работы неоднократно получали запросы от проектных и производственных компаний из отраслей машиностроения и приборостроения на выполнение работ по автоматизации распознавания и трекинга изделий на основе их 3D-моделей. При этом как для 3D-мозаичных поверхностных моделей (3D-сканов образцового изделия) [2, 3], так и для параметрических твердотельных 3D-моделей сборок изделий в САПР [4] для распознавания и трекинга применяли метод *SLAM*, а также *VISLAM* (визуально-инерционный *SLAM*). Целью выполненных работ являлась не инспекция качества изделий, а только освоение применимости методов таргетирования в *SLAM*-технологии. Тем не менее, в ходе работ стало совершенно ясно, что для промышленного использования в рамках цифровой трансформации производства реально достижимое практическое распознавание (*SLAM*-таргетинг) по его 3D-представлению возможно лишь для 3D-моделей сборок изделий в САПР (САПР-моделей).

Именно эти модели можно считать образцом, применение которого в рамках "визуализационных" процессов ДР могло бы служить квалификатором качества исполнения реального объекта.

Существующие платформы ДР, как локальные, так и входящие в состав комплексов промышленного Интернета вещей, позволяют использовать результаты рабочего проектирования и структуру электронного состава изделия для этапов его жизненного цикла как образец для выполнения первичного визуального контроля. 3D-мозаичные поверхностные модели, особенно выполненные сканированием реальных физических образцов, не обладают в отличие от САПР-моделей достаточными характеристиками точности представления формы объекта и, следовательно, не могут быть достоверным источником качественного определения правильности исполнения реального изделия. Именно по причине более низкой точности 3D-сканов образцового изделия по сравнению с САПР-моделью для применения технологии дополненной реальности в процессе визуального контроля правильности сборки выбирается всегда такая платформа ДР, в которой САПР-представление для таргетирования первично.

Из многочисленных регулярно появляющихся в открытом доступе материалов по платформам ДР (см., например, [5, 6]), использующим для разработки приложений дополненной реальности напрямую 3D-данные в форматах промышленных САПР, т. е. без трансляции в тесселированные форматы игровых движков, можно в настоящее время выделить платформы *Vuforia* (включая *RE'FLEKT*) и *TeamViewer* (*Ubimax*), в которых САПР-модели используют для голограмм элементов контента ДР. Для *SLAM*-таргетирования 3D-модели в САПР используют только в *Vuforia Studio* и только в режиме объектного распознавания *Model Targeting*. САПР-модели для разработки приложений дополненной реальности в *TeamViewer xInspect* используют, в лучшем случае, для информационного сопровождения пошаговых инструкций операций рабочего места, технику же *SLAM* в *TeamViewer xInspect* для таргетирования не используют, а применяют таргетирование на основе меток.

К началу третьего десятилетия XXI в. всего лишь две платформы *Vuforia* — *Vuforia Engine* и *Vuforia Studio* могли работать с технологией *SLAM* напрямую. При этом *Vuforia Engine* в случае применения *SLAM* не использует форматы САПР и работает только с поверхностными представлениями на основе облака точек, полученных в результате сканирования, или с тесселированными представлениями САПР-моделей. Платформа *Vuforia Studio* работает напрямую с САПР-моделями как в режиме моделирования сценариев дополненной реальности, так и при использовании *SLAM*-таргетирования в режиме *Model Targeting*. Применение платформы

Vuforia Studio для разработки приложений дополненной реальности с исполнением режима *Model Targeting* в процедурах визуального контроля показало, что срабатывание таргета, т. е. выполнение достоверного распознавания реального объекта по САПР-модели, имеет место только в том случае, когда отличительный признак "правильности" выполненной реальной сборки (реального изделия) присутствует во фронтальной проекции подготовленного таргета.

Примеры *SLAM*-таргетирования для определения того, "видим" ли мы реально перед устройством ДР то изделие, или нет, в случае разработки приложений с использованием *Vuforia Studio* показали, что данного функционала распознавания по САПР-моделям вполне достаточно для выполнения поставленной выше задачи. При этом функциональность самой платформы, которая не ограничивается только таргетингом типа *Model Targeting*, а гораздо шире, оказалась избыточной для поставленной задачи визуальной инспекции качества. На самом деле, распознавание (в нашем случае *Model Targeting*) — это только начало, стартовый шаг в разработке приложений дополненной реальности в *Vuforia Studio*. Остальные функции, изначально "встроенные" в прототип, такие как использование многочисленных 3D- и 2D-виджетов для организации сцены ДР, возможности настройки и ветвления сценариев, анимация 3D-моделей в сценах и пр., не были задействованы в готовом приложении.

В середине 2021 г. вышел предварительный релиз новой разработки в линейке продуктов платформы *Vuforia* — *Vuforia Instruct*, которая предназначена только для задач инспекции готового изделия. *Vuforia Instruct* использует САПР-модель в качестве таргета. *Vuforia Instruct* — это приложение дополненной реальности, созданное в проприетарном редакторе *Vuforia Editor*, которое работает на устройстве пользователя (смартфон, планшет, очки дополненной реальности) только тогда, когда физический объект, например инспектируемая сборка, агрегат, узел или деталь, "совпадает" с 3D-таргетом. В качестве таргета в *Vuforia Instruct* может быть применена САПР-модель, подготовленная только в форматах промышленных систем *CATIA*, *NX*, *Creo* или нейтральных *STEP* и *Iges*. При разработке приложения в пространственной зоне *Vuforia Editor* размещаемая в этой зоне 3D-модель позиционируется таким образом, чтобы квалификационный объект, наличие или отсутствие правильного вида которого указывало бы на событие "распознан" или "не распознан", был расположен в наилучшем представлении с учетом перспективы и угла обзора. В *Vuforia Instruct* такой *SLAM*-таргет называется *Product Status*. Для удобства и с учетом особенностей процедур визуальной инспекции, их ограниченности по ДР-функционалу, на одно приложение *Vuforia Inspect* выделяется работа только с одним *Product Status*. Пример работы в редакторе *Vuforia Editor* при разработке приложения *Vuforia Instruct* представлен на рис. 1.

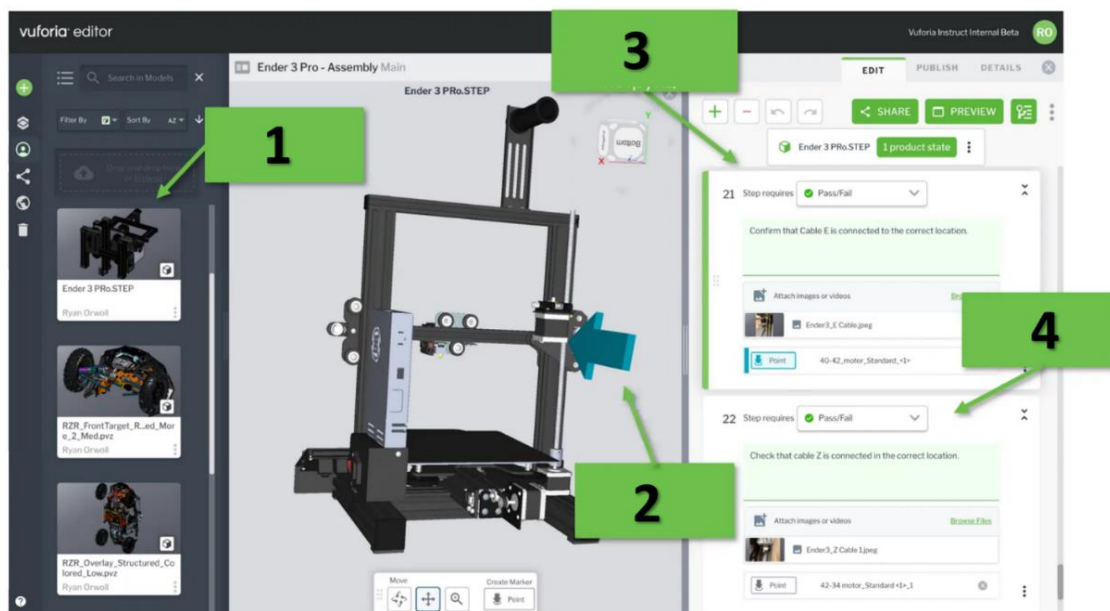


Рис. 1. Разработка в редакторе *Vuforia Editor* инструкции по визуальной инспекции изделия для применения в *Vuforia Instruct*:

- 1 — импорт САПР-данных; 2 — расстановка указателей элементов конструкции, на которые надо обратить внимание;
- 3 — описание действий по инспекции представленного на рассмотрение изделия ("памятка инспектора");
- 4 — интерактивная метка об исполнении инспектором соответствующего шага инспекции

Пример физического устройства, полученного для визуальной инспекции в приложения *Vuforia Instruct*, представлен на рис. 2. Инспектор в режиме реального времени на очередном шаге проверяет наличие конструктивного элемента — направляющей укладчика филамента — в составе инспектируемого изделия (белый контур на переднем плане — *SLAM*-таргет искомого узла).



Рис. 2. Пример работы приложения *Vuforia Instruct*

По мнению авторов данной работы, *Vuforia Instruct* — это наиболее сбалансированное и простое в освоении средство разработки приложений дополненной реальности для автоматизации промышленных процессов визуальной инспекции качества сборочных работ. Само приложение размещено на сервере в сети, аналогично приложениям дополненной реальности, выполненным в *Vuforia Studio*. Среда разработки *Vuforia Editor* также представляет собой облачное решение, доступное через *Web*-интерфейс. *Vuforia Editor* и репозиторий приложений для *Vuforia Instruct* — это "облачные" серверы с локализацией за пределами РФ, доступ к которым оформляется в виде подписки. Реализация работы с данными серверами осуществляется на основе облачной *SAAS*-структуры *Atlas*. На практике в условиях отечественного применения это означает, что с марта 2022 г. подписка на сервисы серверов *Vuforia Editor* и *Vuforia Instruct* недоступна [5, 6].

Применение технологии искусственного интеллекта для задачи визуального контроля

Визуальный контроль качества выполнения, например сборочных работ, сводится к тому, что необходимо классифицировать цифровой видеоконтент и определить похож или нет тот класс, который определен в результате обработки видеоконтента, на ожидаемый. Если рассматривать задачу визуальной инспекции входного видеопотока как задачу классификации получаемого контента, то можно принимать

решения с использованием технологии искусственного интеллекта. Авторами в работе [6] приведен пример освоения технологии искусственного интеллекта для решения промышленной задачи этапа сборки, когда оператор решал, правильный ли компонент он видит в зоне сборки. Вариант применения технологий работы с видеоконтентом от ООО "Мотив НТ", показанный в [6, рис. 3], подразумевал тензорный анализ видеозображения, распознавание и классификацию объекта, а также показ результата этого распознавания на экране. Очевидно, что была решена не только задача классификации, но и задача детектирования объектов на основе алгоритмов искусственного интеллекта.

В принципе, для задачи визуальной инспекции готового изделия — не для контроля пошаговой операции сборки, а только для финальной инспекции качества сборки — достаточно и классификации. Классификация видеоконтента в задачах машинного зрения выполняется в с использованием алгоритмов тензорного анализа и обучения нейронных сетей [7]. В отсутствие отечественного нейрочипа аппаратная составляющая для реализации такого рода алгоритмов основана на использовании видеопроцессоров и специального ПО для эффективного выполнения параллельных высоконагруженных вычислений. Лидерство в аппаратной реализации в течение нескольких последних лет уверенно удерживает компания *nVIDIA* с ее структурами центрального процессорного устройства (ЦПУ) и внедрением программных компонент *CUDA*. Отечественных аппаратных аналогов *nVIDIA* в настоящее время нет, но пока еще существуют реальные возможности получить работоспособные *nVIDIA* многоядерные ЦПУ-решения с полной поддержкой *CUDA* для отечественных разработок, в том числе и в области искусственного интеллекта.

В распоряжение авторов статьи был предоставлен модуль *nVIDIA Jetson Nano* — базовый компонент программно-аппаратного комплекса искусственного интеллекта для решения задачи визуальной инспекции качества сборки. Технические возможности работы с тяжело нагруженными вычислениями в *nVIDIA Jetson Nano* реализуются за счет многоядерных ЦПУ и графического процессора и оцениваются в 0.47 *TFLOPs*, что уже достаточно для выполнения работ по обработке видеопотока в реальном времени с параллельным распознаванием и классификацией. Для проверки возможностей использования алгоритмов компьютерного зрения на аппаратной платформе *nVIDIA Jetson Nano* сборка была доработана путем установки двух цифровых видеокамер *Raspberry Pi V2-8MP* непосредственно на макетную плату *Jetson Nano* по интерфейсу *MIPI CSI-2* и дополнительно еще одной *Web*-камеры, подключаемой к *Jetson Nano* по *USB*-интерфейсу. Спарка камер *Pi V2-8MP* рассматривалась в качестве устройства непосредственного захвата стереоизображе-

ния с возможностью анализа глубины получаемого изображения. *Web*-камера, в отличие от камер *Pi V2-8MP*, рассматривали не в качестве смонтированного на корпусе *Jetson Nano*, а вынесенного за пределы модуля присоединенного устройства захвата изображения инспектируемой области рабочего места.

На *nVIDIA Jetson Nano* была установлена операционная система *UBUNTU 18.04*, в состав которой входит полнофункциональная базовая типовая реализация языка программирования *Python* версий 2.7 и 3.6. Для реализации программ компьютерного зрения, использования алгоритмов искусственного интеллекта и для работы с нейронными сетями аппаратно-программный комплекс был дополнен библиотеками тензорного анализа *TensorRT* и репозитарием пре-тренированных сетей *DNN*, утилитами для классификации, детектирования и сегментации с поддержкой специализированных библиотек обработки изображений *Caffe*, *TensorFlow UFF* и свертков *ONNX*. Весь комплект ПО, включая операционную систему, *DNN*-репозитарий и утилиты, не подпадает под санкционные ограничения и доступен отечественным пользователям для скачивания и установки. Возможные разработки на основе рассматриваемого программно-аппаратного комплекса могут быть доведены до уровня коммерческого использования.

В отличие от проектов, где сочетаются машинное зрение и дополненная реальность, когда вся трудоемкость сводится к правильному ис-

пользованию заранее подготовленных и включенных в базовый состав платформы модулей-виджетов, проекты на основе искусственного интеллекта существенно более трудоёмки в разработке и требуют более высокого профессионального уровня разработчиков в области объектно-ориентированного программирования. В случае применения искусственного интеллекта вместо *3D*-моделей конструкторским подразделениям необходимо по каждому из предполагаемых классов распознаваемых объектов готовить три группы наборов датасетов — тренировочный, тестовый и валидационный, причем готовить эти датасеты по месту применения самостоятельно, то есть без привлечения САПР-специалистов. Кроме того, поскольку расчеты выполняются в автоматическом режиме, задача тренировки на своих датасетах типовых *DNN*-сетей требует значительно большего машинного времени, даже с учетом высокой производительности многоядерных структур процессорной части *nVIDIA Jetson Nano*. Следовательно, разработчикам придется заняться оптимизацией ПО с учетом ограничений задействованного аппаратного и системного обеспечения и реальных условий промышленного применения.

На рис. 3 представлен разработанный авторами прототип рабочего места инспектора качества на базе комплекта *nVIDIA Jetson Nano*, который использовали для проверки применимости технологии искусственного интеллекта в промышленных задачах визуального контроля качества сборки.

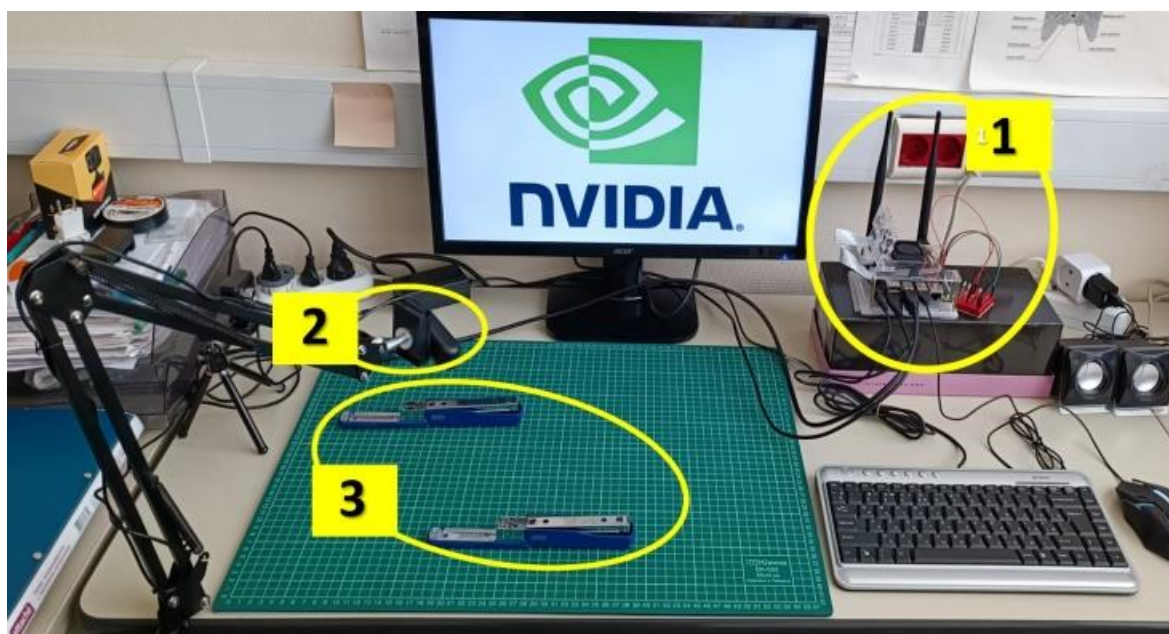


Рис. 3. Состав стенда на основе комплекта *nVIDIA Jetson Nano*

- 1 — *nVIDIA Jetson Nano* с двумя *Raspberry Pi V2-8MP* камерами, выходом на *USB*-аудиокарту и системой *LED*-индикации результатов инспекции, соединенной с *GPIO*-контактным полем;
- 2 — вынесенная *Web*-камера контроля образцов в поле визуальной инспекции;
- 3 — два образца некоторых механических устройств в поле визуальной инспекции: нижний — собранный без нарушений, верхний — бракованный

Основой процесса классификации на *DNN*-сети пользовательских датасетов стало базовое ПО — *Image Processing*. Программные доработки процедур *Image Processing* выполнялись с помощью модификации базового ПО *Tensor RT* (версия *Python 3.6*). Оригинальные дополнительные процедуры были разработаны в виде законченных программных фрагментов и блоков кода. Полученные решения были проинтегрированы в базовое ПО для решения задачи повышения достоверности в ходе распознавания с помощью компьютерного зрения и генерации сигналов для внешних процессов и процедур в ходе успешного выполнения классификации по сверточной сети с помощью искусственного интеллекта. Прототип рабочего места оператора визуальной инспекции качества выполнения сборочных операций в комплектации, представленной на рис. 3, проходил тестирование, результативность которого отмечена в ходе первичных оценочных демонстраций [8].

Заключение

Применение технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта для визуальной инспекции результата выполнения сборочных операций на постах промышленного контроля качества позволяет ослабить влияние человеческого фактора и решать задачи автоматизации инспекции и контроля на уровне, достаточном для достижения полноценной цифровой трансформации промышленного дискретного производства. По мнению авторов, подкрепленному реальным опытом, решение задач визуальной постоперационной инспекции изделий, выполняемых с привлечением технологии *SLAM*-распознавания (дополненная реальность) или с использованием тренинга нейронных сетей глубокого обучения (искусственный интеллект), в настоящее время находящихся в стадии демонстрационных образцов, только начинает привлекать внимание индустрий. Пока что результаты, которые достигнуты и продемонстрированы с помощью этих технологий, еще только анализируют на предмет практической возможности внедрения и необходимости глубокой доработки под требования заказчиков. Однако выполненные авторами работы позволяют определить практическую ценность каждого из подходов, равно как и возможности их промышленной реализации в условиях существующих санкционных ограничений.

Применение технологии дополненной реальности для визуальной инспекции качества выполнения сборочных операций на постах промышленного контроля качества наиболее эффективно, просто и без программирования может быть реализовано с использованием платформы *Vuforia Instruct*. Процедуры визуальной инспекции в этом случае может разработать персонал, не сертифицированный в каче-

стве пользователей САПР и не имеющий квалификацию программистов. Для хранения разработок используются облачные сервисы, что отменяет расходы предприятия-заказчика на содержание и администрирование структуры хранения—доступа. Отмечается низкий порог входа в технологию, что привлекательно в случае промышленной реализации. Основным недостатком — санкции с марта 2022 г., полный запрет со стороны вендора на доступ к *Vuforia Editor-Vuforia Instruct* для предприятий и организаций, работающих на территории РФ и Белоруссии.

Применение технологии искусственного интеллекта для визуальной инспекции качества выполнения сборочных операций наиболее рационально может быть реализовано с использованием специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов *nVIDIA Jetson*, в частности *nVIDIA Jetson Nano*. Для применения технологии искусственного интеллекта требуется штат квалифицированных специалистов в области подготовки классификационных датасетов контролируемой продукции, программистов в области объектно-ориентированного ПО. Отмечаются существенные затраты машинного времени на стадии подготовки исходных данных и тренинга и ретренинга нейронных сетей. Однако в случае использования технологии искусственного интеллекта отсутствуют ограничения, связанные с применением промышленной платформы дополненной реальности — технические и программные компоненты для начала разработки приложений на территории РФ легально доступны. Таким образом, для отечественного пользователя при решении практических индустриальных задач, использующих "машинное зрение" и обработку полученного видеоконтента, использование технологии искусственного интеллекта предпочтительнее даже с учетом высокого порога входа в такую технологию.

Литература

1. Machine vision for Industry 4.0: application and case studies / edited by Roshani Raut, Salahddine Krit, Prasenjit Chatterjee // CRC Press — Taylor & Francis Group, LLC3. 2022.
2. SLAM (метод) [Электронный ресурс]. [https://ru.wikipedia.org/wiki/SLAM_\(%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/SLAM_(%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4)) (дата обращения: 14.02.2023).
3. Технология дополненной реальности / Лекция № 10. Промышленное применение ДР. Платформа от компании PTC Vuforia [Электронный ресурс]. http://a0601.narod.ru/AR_Lctn_10.pdf (дата обращения: 14.02.2023).
4. Лабораторная работа №3. Vuforia Studio: Создание приложения дополненной реальности (часть II из III) [Электронный ресурс]. http://a0601.narod.ru/LR03_ARforPot.pdf (дата обращения: 14.02.2023).
5. Краужкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Технология дополненной реальности как

эффективный инструмент применения пошаговых руководств и инструкций на рабочем месте // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. №2. С. 23-28.

6. Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Платформы дополненной реальности для промышленного применения: Россия 2022 // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 4. С. 3—10.

7. Содем Ян Эрик. Программирование компьютерного зрения на языке Python. — М.: ДМК-пресс, 2016. — 312 с.

8. Проверка стенда-прототипа ПТС для выявления брака на конвейере. AI под Jetson Nano. Image processing [Электронный ресурс]. <https://www.youtube.com/watch?v=Lx1aR19U2ro> (дата обращения: 14.02.2023).

APPLICATION OF AUGMENTED REALITY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO AUTOMATE THE VISUAL INSPECTION PROCESSES OF MANUFACTURING ASSEMBLY OPERATIONS

M. A. Pirogova, I. E. Leshikhina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

V. A. Krayushkin

LLC "PTS", Moscow, Russia

The article discusses the possibilities of augmented reality (AR) and artificial intelligence (AI) technologies to improve the productivity and efficiency of performing operations of the visual inspections the quality of assembly operations. The features of both technologies and the specifics of practical application are analyzed.

Keywords: augmented reality, artificial intelligence, computer vision, digital transformation.

Пирогова Марина Аркадьевна, доцент.

E-mail: PirogovaMA@mpei.ru

Лешихина Ирина Евгеньевна, доцент.

E-mail: liy56@mail.ru

Краюшкин Владимир Анатольевич, руководитель проектов.

E-mail: vkray@pts-russia.com

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.