

# Технология дополненной реальности как средство технического обслуживания оборудования металлургических производств

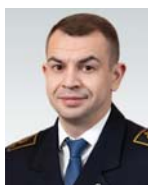
УДК 654:681.5



**Н. И. Котелева,**  
доцент кафедры автоматизации  
технологических процессов и производств,  
канд. техн. наук,  
эл. почта: Kotelova\_NI@pers.spmi.ru



**В. В. Вальнев,**  
аспирант кафедры автоматизации  
технологических процессов и производств



**Н. А. Королев,**  
ведущий научный сотрудник учебно-научного  
центра цифровых технологий,  
канд. техн. наук

Санкт-Петербургский горный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Технология дополненной реальности открывает новые перспективы для повышения эффективности работы металлургических предприятий [1, 2]. В среднесрочной перспективе это может быть достигнуто за счет повышения безопасности и эффективности труда работников, осуществляющих техническое обслуживание оборудования. А в долгосрочной перспективе — может стать ядром большой комплексной диагностической системы с задействованием технологии цифрового двойника, моделирования, автоматического формирования плана, подготовки и реализации комплексных сервисных мероприятий обслуживания и ремонта оборудования.

Реакторы с перемешивающим устройством являются основным технологическим оборудованием гидрометаллургической переработки руд. При этом основные энергетические затраты берет на себя оборудование с электроприводом — оно обеспечивает перемешивание с заданной частотой для достижения целевых показателей процесса [3]. Электродвигатели не только потребляют значительную часть энергии на производстве [4], но и часто выходят из строя. Эта проблема является общей для всех отраслей промышленности (в нефтедобывающей [5, 6], пищевой, легкой и т. д. [7, 8]). Для избежания простоев

В эпоху развития цифровых технологий все большая их часть находит применение в разных отраслях промышленности. В статье предложен подход к использованию технологии дополненной реальности при обслуживании реакторов с перемешивающими устройствами. Подобный подход может быть применен к любому виду оборудования, он легко интегрируется в существующие системы автоматизации и не требует больших инвестиций на начальном этапе, предполагая постепенное усовершенствование и наращивание функционала.

Показаны основной набор функциональных требований системы технического обслуживания оборудования на основе технологии дополненной реальности, способы оценки работоспособности системы, перспективы расширения и усовершенствования функциональных возможностей, направления интеграции таких систем в существующие автоматизированные системы управления на предприятии.

Проверку эффективности системы с дополненной реальностью проводили путем определения среднего времени выполнения каждого этапа обслуживания и обработки результатов по критерию Манна – Уитни. Применение предложенного решения позволило сократить среднее время обслуживания единицы оборудования в 2,3 раза, а эффективность проведения работ увеличилась на 5 %.

**Ключевые слова:** дополненная реальность, техническое обслуживание, металлургия, цифровизация, IoT, системы управления, автоматизация, индустрия 4.0.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.04.02

оборудования необходимо проведение мониторинга и диагностики параметров электродвигателей, чтобы предотвратить непредвиденные поломки и остановку технологического процесса в связи с этим. Использование разных датчиков и способов диагностики неисправностей помогает справиться с перечисленными задачами [9, 10]. Простои оборудования могут возникать из-за многих причин: от износа, который характерен для всех механических элементов оборудования, до неисправности средств измерений и преобразователей сигналов [11, 12]. При этом сильно сказывается и человеческий ресурс. Квалификация персонала, сроки выполнения операций, опыт и вовлеченность в работу напрямую влияют на работу оборудования [13, 14]. Для любого устройства также необходимо проведение работ по обслуживанию и ремонту. Это может быть как плановый, так и капитальный ремонт, но это требует остановки и вывода оборудования из технологического процесса [15, 16]. Эффективные способы проведения соответствующих работ повысят скорость обслуживания и позволят сократить простои как самого оборудования, так и, возможно, производственного участка в целом.

©Котелева Н. И., Вальнев В. В., Королев Н. А., 2023



Дополненная реальность предоставляет новые возможности улучшения сборочных и ремонтных работ. Так, созданы портативные и удобные в использовании мобильные AR-устройства (от augmented reality — дополненная реальность) [17, 18]. Их широко применяют при обучении операторов и прочего персонала навыкам сборки, монтажа и обслуживания в целях сокращения длительного чтения документации [19, 20]. В другом исследовании предложена виртуальная среда для обучения работе на насосных станциях. В разработанной среде есть конструкции и оборудование, которые упрощают взаимодействие пользователя с производственным процессом, контрольно-измерительными приборами, мониторингом и управлением станцией [21, 22].

Благодаря развитию программ численного и имитационного моделирования становится возможна отработка нештатных ситуаций и проверка алгоритмов управления на компьютерных тренажерных комплексах. Такой способ исследования и отладки технологических процессов применим как в обучении, так и при пусконаладочных процессах [23, 24]. Авторы работы [25] используют компьютерное CFD-моделирование\* реактора с мешалкой для определения необходимого шага дискретизации и размера сетки в целях сопоставления модели с производственным процессом. В результате исследования авторы получили комплексную модель автоклавного реактора с пятью контроллерами, поддерживающими температурный баланс в соответствии с производственными параметрами [25].

Любая система диагностики основана на показаниях датчиков оборудования [26, 27], а значит является составляющей структуры управления технологическим процессом [28]. Для прогнозирования срока службы разных компонентов машин в работе [29] предложен метод с использованием дополненной реальности и интернета вещей (IoT, internet of things).

Для реактора с мешалкой рекомендованы следующие контролируемые переменные: уровень и давление в реакторе, рециркуляционном клапане компрессора, скорость мешалки, а также переменные с хорошими самооптимизирующими свойствами, включая температуру реактора, состав компонентов в продувке и рециркуляционный поток или скорость работы компрессора. Осуществимость выбора такого набора параметров подтверждена моделированием в исследовании [30].

Авторы работы [31] отмечают, что повышения производительности процесса перемешивания можно достичь за счет регулируемой мощности электродвигателя мешалки. При этом исследование показало, что периодическая подача субстрата не обязательно влияет на скорость гидролиза и выход. Однако она

воздействует на поток суспензии внутри реактора и мощность двигателя мешалки. Соответственно, путем разработки процедуры периодической подпитки, основанной на мощности двигателя мешалки, необходимой для перемешивания суспензии, можно оптимизировать общее потребление энергии [32, 33].

Изменение подачи катализатора в мешалку представляет собой серьезную проблему для контроллеров и систем управления, так как это приводит к высокому и резкому скачку ошибки начальной температуры. Отмечается, что управление реактором с мешалкой на основе регулятора нечеткой логики позволяет уменьшить погрешность при управлении и может снизить вероятность перегрева аппарата, поскольку температуры удерживаются в более узком рабочем диапазоне [33].

Исследуя и решая проблему простоев оборудования, в исследованиях [34, 35] разработали информационную систему на основе IoT и машинного обучения для мониторинга температуры двигателя. Отмечают, что контроль температуры повышает эффективность работы и снижает затраты на обслуживание и ремонт перемешивающей установки из-за предоставления своевременной информации о работе двигателя на объекте.

Целью представленной работы является повышение эффективности проведения технического обслуживания оборудования металлургических производств с применением технологии дополненной реальности и оценка работоспособности системы на примере реакторов с перемешивающими устройствами.

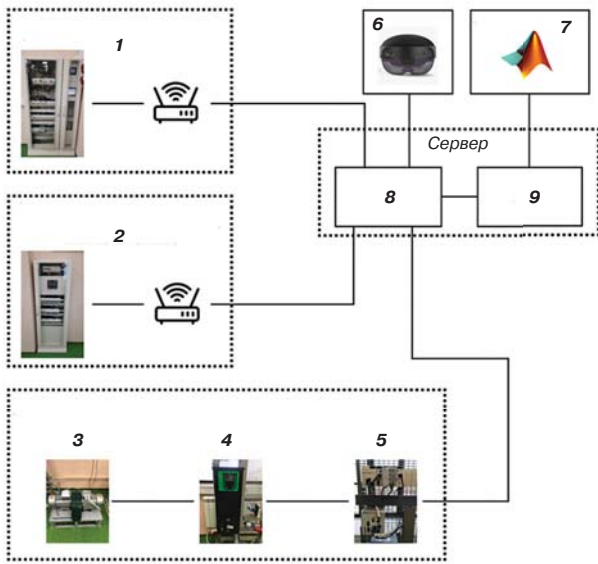
### Материалы и методы исследования

*Разработка структурной схемы системы.* При разработке структурной схемы системы учитывали такие свойства, как модульность, масштабируемость, интегрируемость и скорость получения информации. Предлагаемая в работе структурная схема представлена на **рис. 1**.

Система делится на три уровня: физический, коммуникационный и приложения. Информационная модель системы представлена на **рис. 2**.

К физическому уровню относится асинхронный электродвигатель AIP 80B4, преобразователь частоты Altivar Process ATV900, ПЛК Modicon M340 и два электрических распределительных шкафа. В составе одного из них — трехфазный счетчик электроэнергии iEM3155. Его используют для мониторинга электрических показателей электродвигателя. Второе распределительное устройство включает автоматические выключатели IC60 с мотор-редуктором и Smartlink шиной, что обеспечивает подключение к локальной сети по протоколу Modbus TCP/IP и удаленному управлению электрической цепью, в которую включен электродвигатель. На коммуникационном уровне расположена серверная часть системы, которая представляет собой MQTT-брокер

\* CFD (computational fluid dynamics modeling) — моделирование динамики сплошных сред.



**Рис. 1.** Общая схема системы:  
 1 — распределительный шкаф со счетчиками электроэнергии; 2 — распределительный шкаф с «умными» автоматическими выключателями; 3 — электродвигатель АИР80В4; 4 — преобразователь частоты Altivar ATV900; 5 — программируемый логический контроллер (ПЛК) Modicon M340; 6 — очки дополненной реальности; 7 — Simulink-модель симуляции динамической системы электропривода и мешалки; 8 — Mosquitto MQTT Broker — брокер (сервер), обеспечивающий обмен информацией по протоколу MQTT; 9 — OPC UA Server (unified architecture) — протокол передачи данных в промышленных сетях

и OPC-сервер. Совместное использование на уровне коммуникации технологий MQTT и OPC UA позволит интегрировать разрабатываемую систему и обеспечить взаимосвязь с определенным принципом качества, присущим этим технологиям [36, 37].

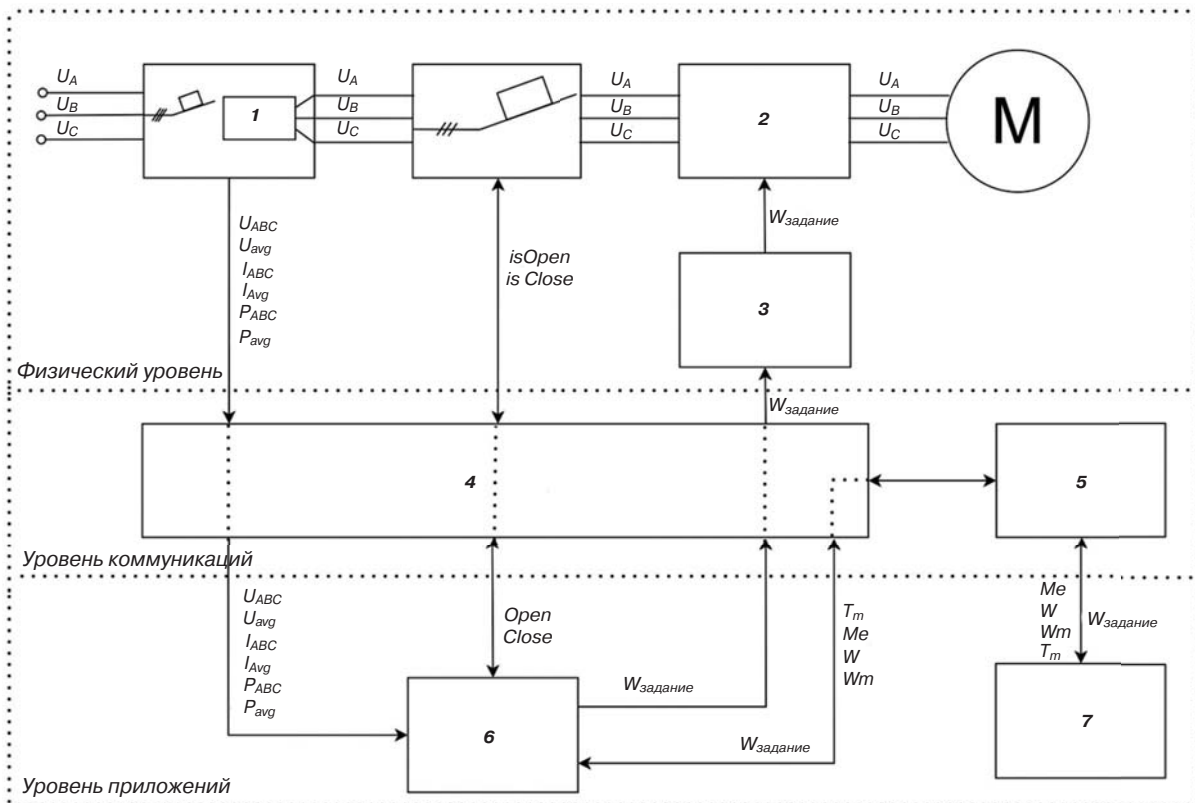
**Функционал системы.** Формирование функциональных особенностей системы является главным шагом при ее создании. В работе представлен минимальный, на взгляд авторов, набор функций, необходимых на первоначальном этапе внедрения системы (табл. 1). По мере эксплуатации этот набор может быть расширен и усовершенствован.

**Разработка динамической модели объекта.** На рис. 3 представлена модель управления электроприводом мешалки и расчет скорости вращения и момента. Важной особенностью представленной модели является интеграционный компонент, в качестве которого выбрана технология OPC UA.

Для построения динамической модели, представленной на рис. 3, использовали упрощенную структуру системы векторного регулирования скорости асинхронного двигателя (представлена на рис. 4) и структурную схему системы регулирования скорости (рис. 5).

Аналитические уравнения математической модели АД имеют следующий вид:

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha},$$



**Рис. 2.** Информационная модель системы:  
 1 — трехфазный счетчик электроэнергии iEM3155; 2 — преобразователь частоты; 3 — программируемый логический контроллер; 4 — MQTT-брокер; 5 — OPC-сервер; 6 — очки дополненной реальности; 7 — Simulink-модель

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -R_r I_{r\alpha} - \omega \Psi_{r\beta},$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -R_r I_{r\beta} + \omega \Psi_{r\alpha},$$

$$I_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \Psi_{r\alpha},$$

$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \Psi_{r\beta},$$

$$I_{r\alpha} = \frac{-k_s}{\sigma L_r} \Psi_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{r\alpha},$$

$$I_{r\beta} = \frac{-k_s}{\sigma L_r} \Psi_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{r\beta},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(M - M_c)}{J},$$

$$M = 1,5zL_\mu(I_{r\alpha}I_{s\beta} - I_{r\beta}I_{s\alpha}),$$

$$M_c = k\omega^2,$$

где  $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$  — проекции вектора потокосцепления статора и ротора на оси системы координат  $(\alpha - \beta)$ ;  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$  — проекции вектора напряжения статора на оси системы координат  $(\alpha - \beta)$ ;  $I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}$  — проекции вектора тока статора и ротора на оси системы координат  $(\alpha - \beta)$ ;  $R_s$  и  $R_r$  — соответственно активное сопротивление обмотки статора и ротора;  $\omega$  — частота вращения ротора;  $L_s$  и  $L_r$  — индуктивность обмотки статора и ротора;  $\sigma$  — коэффициент рассеяния;  $k_s$  и  $k_r$  — коэффициенты рассеяния статора и ротора;  $L_\mu$  — индуктивность цепи намагничивания;  $z$  — число пар полюсов;  $J$  — момент инерции ротора;  $k$  — вентиляторный коэффициент насоса.

Математическое моделирование устройства проводили на примере турбинной мешалки со следующими конструктивными параметрами:

Диаметр емкости.....	0,715 м
Плотность среды .....	1108 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость среды .....	0,0017 Н·с/м <sup>2</sup>
Частота вращения исполнительного механизма ....	1,5 с <sup>-1</sup>
Тип мешалки.....	14
Требуемый сервис-фактор .....	1,5

Таблица 1  
Функции системы

Функция	До внедрения системы дополненной реальности	После внедрения системы дополненной реальности
Поиск неисправностей или подготовка к выполнению сервисных действий		
Поиск нужной единицы оборудования	Сопоставление технологических карт или схем с фактическим расположением оборудования	Использование виртуальных объектов (стрелки, звуки, вибрация, виртуальные модели оборудования). Система автоматически визуализирует объект, который нуждается во внимании оператора
Выполнение операции технического обслуживания единицы оборудования	Электронные или бумажные инструкции, личный или производственный опыт обслуживающего персонала	Вызов и использование сборно-разборной 3D-модели оборудования. Демонстрация на экране деталей оборудования, необходимых инструментов
Получение дополнительной информации (например, о технологических параметрах)	Поиск информации по приборам, использование переносных устройств, сличение реального и системного объекта, звонок диспетчеру	Получение подробной информации при активации функции в тот же момент времени по любой единице оборудования (паспортные данные, рабочая документация, текущие технологические параметры)
Устранение причины или выполнение сервисных действий		
Тестирование действий по принципу «Что если...»	Личный или производственный опыт обслуживающего персонала	Динамическая модель, позволяющая проигрывать любые сценарии (включение/отключение оборудования, вывод или ввод технологических участков в работу, увеличение производительности и т. д.)
Вызов технической поддержки	Использование нескольких устройств для звонка, передачи информации и пр.	Использование одного экрана, переключение на вид RealtimeView для отображения объекта в том виде, в котором его видит обслуживающий персонал. Маркировка экспертом и визуализация этих маркеров и пометок перед сотрудником, проводящим обслуживание
Заключительный этап обслуживания		
Внесение в систему сервисных операций	Использование электронных носителей или журнала	Автоматическое ведение сервисного журнала
Контроль качества	Использование дополнительных бригад, привлечение поднадзорных организаций	Автоматический контроль качества по алгоритмам (фото- и видеофиксация, классификация и распознавание действий пользователя)
Общие функции системы		
Функция голосового управления	—	Вызов эксперта, вызов диспетчера, фотофиксация, видеофиксация, пуск/останов оборудования из единого окна, загрузка реальных и/или моделируемых параметров оборудования, ответ на команды пользователя

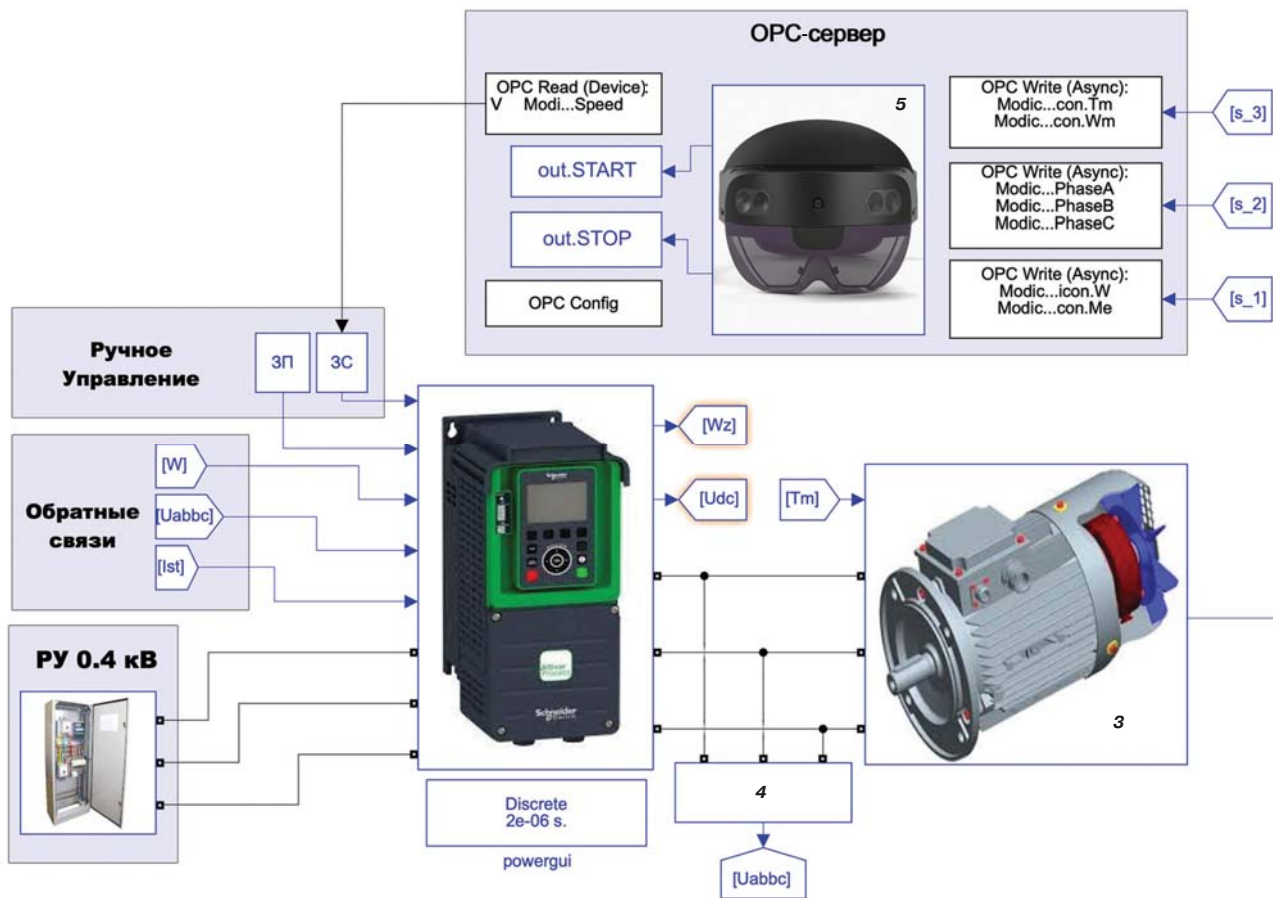


Рис. 3. Динамическая модель системы электропривода и мешалки в Matlab Simulink: 1 — мешалка; 2 — датчики тока; 3 — асинхронный двигатель; 4 — датчики напряжения; 5 — очки дополненной реальности

В качестве среды рассматривали раствор гидроксида натрия 10 %, скорость вращения лопастей — 90 мин<sup>-1</sup>, режим работы >10 ч в день.

Мощность мешалки характеризует количество энергии, подводимой в единицу времени к перемешиваемой жидкости, и определяется формулой:

$$N = K_N \rho n^3 d_M^5,$$

где  $n$  — скорость вращения мешалки;  $d_M$  — диаметр лопастей мешалки;  $\rho$  — плотность жидкости;  $K_N$  — коэффициент мощности, зависящий от конструкции и числа ярусов мешалки.

**Результаты исследований и их обсуждение**

На рис. 6 представлены результаты работы динамической модели.

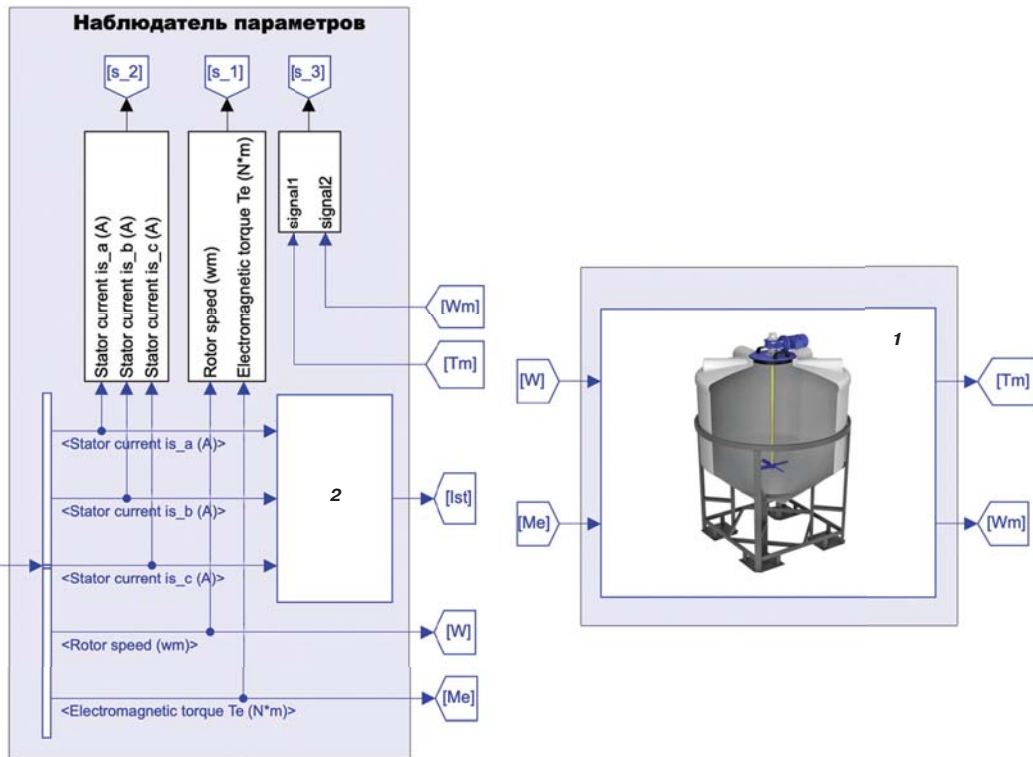
Адекватность имитационной модели подтверждается поддержанием динамических характеристик электропривода мешалки (частот вращения и моментов электродвигателя и мешалки), а также обеспечением момента на валу при загрузке и разгрузке мешалки с поддержанием постоянной частоты вращения вала.

На рис. 7 представлена часть экранов системы дополненной реальности для обслуживания электродвигателя.

В табл. 2 приведен результат тестирования системы. В графе «время» указано его среднее значение (среднее арифметическое), необходимое для выполнения указанной операции технического обслуживания человеком. При тестировании системы

Таблица 2  
Результаты испытаний

Операция	Время выполнения, с	
	с системой	без системы
Поиск необходимой детали оборудования	10	50
Проверка параметров мешалки	5	30
Проверка направления вращения мешалки	5	30
Проверка целостности пропеллера, без разборки мешалки	10	60
Проверка целостности резиновой оболочки кабеля, проверка изоляции	30	30
Замена кабеля, с занесением в журнал	45	60
Сделать фотофиксацию	10	20
Сделать видеofиксацию	15	25
<b>Суммарное время по всем операциям</b>	<b>130</b>	<b>305</b>



Продолжение рис. 3.

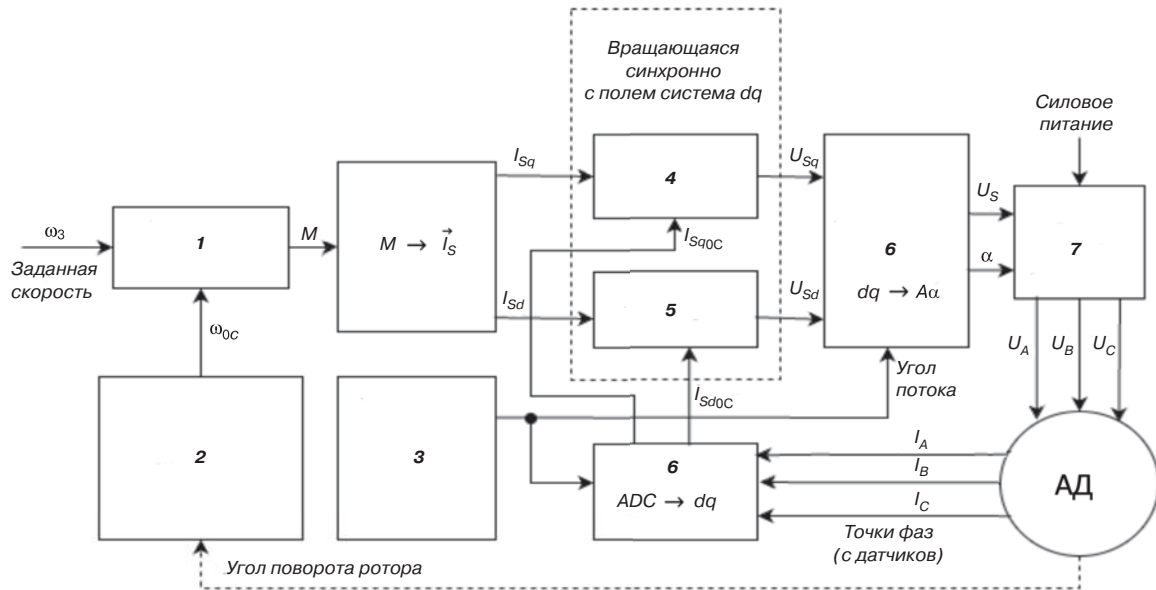
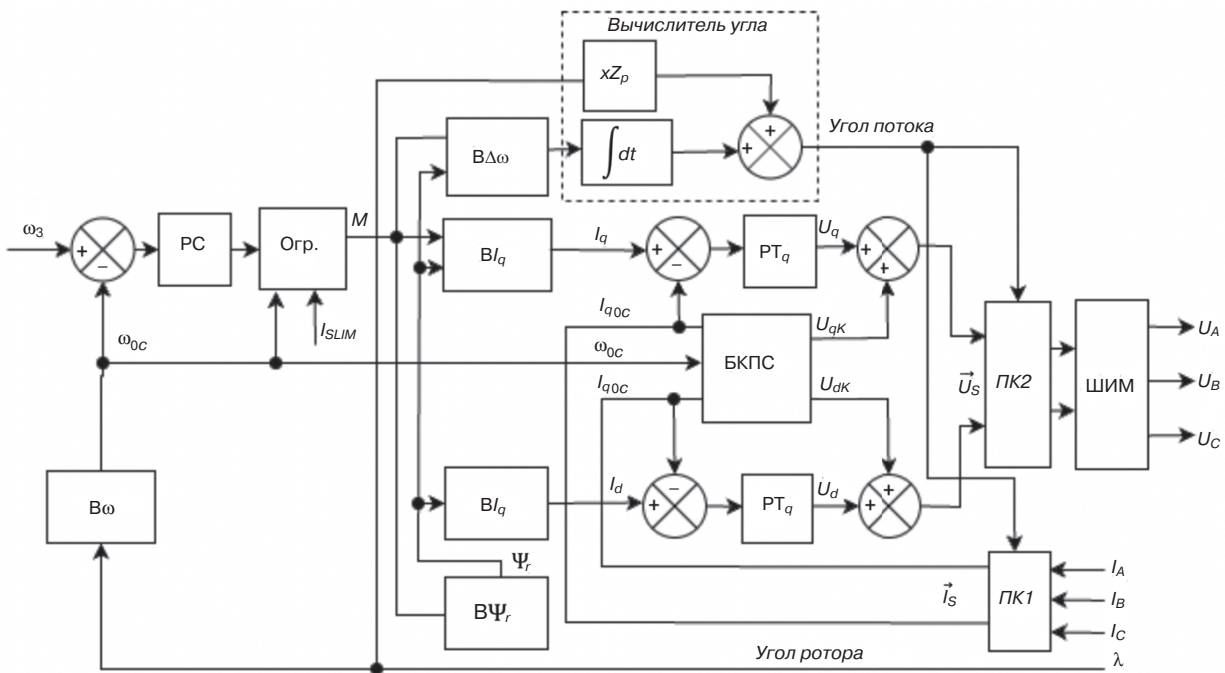


Рис. 4. Структура системы векторного регулирования скорости асинхронного двигателя (АД):

1 – регулятор скорости; 2 – вычислитель скорости ротора; 3 – измеритель или вычислитель угла  $\psi_R$ ; 4 – регулятор тока  $I_{sq}$ ; 5 – регулятор тока  $I_{sd}$ ; 6 – преобразователь координат; 7 – преобразователь широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

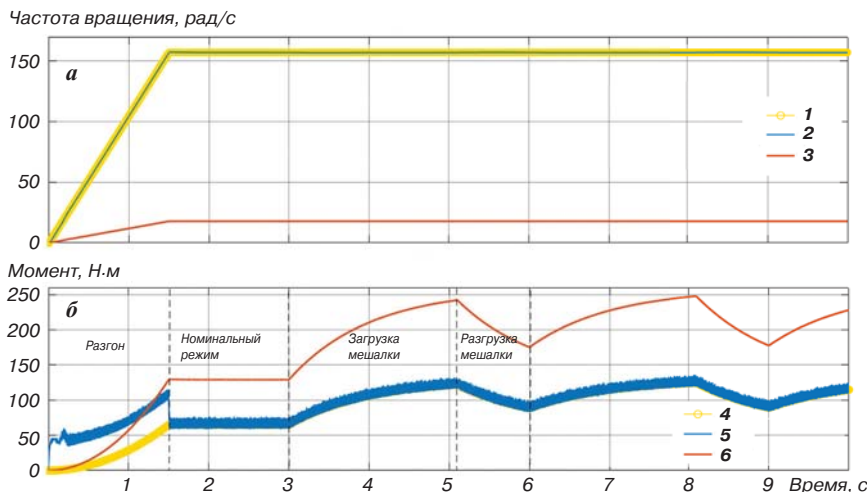
испытуемым предлагалось выполнить определенные операции сначала без использования системы, а потом с ее применением. Всего было протестировано 37 человек. Дополнительно в качестве испытуемых были задействованы группы по 12 человек. Одной группе предлагали выполнить действия с использованием системы, другой группе — без ее применения.

Результаты испытаний прямо демонстрируют высокую эффективность использования системы для проведения технического обслуживания. Среднее время сопровождения сократилось практически в 2,3 раза. При этом необходимо учитывать, что результаты по обслуживанию были получены в лабораторных условиях, и это несколько искажает (иллюзорно упрощает) действительность.



**Рис. 5.** Структурная схема системы регулирования скорости:

В $\omega$  — вычислитель скорости. Если в системе регулирования используют датчик положения (например, фотоимпульсный), то этот узел осуществляет вычисление скорости по приращению угла. При построении систем без датчика положения или скорости такой узел осуществляет оценку реальной скорости по модели косвенными методами; PC — регулятор скорости (ПИ или ПИД-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по скорости сигнал задания момента); Огр. — ограничитель момента — ограничивает момент в зависимости от частоты; В $\Psi_r$  — вычислитель потока, выполняет функцию задания потока ротора при работе с постоянным потоком или оптимизации потока ротора в зависимости от момента; В $I_d$  — вычислитель  $d$ -составляющей тока; В $I_q$  — вычислитель  $q$ -составляющей тока; В $\Delta\omega$  — вычислитель частоты скольжения; РТ $_d$  — регулятор тока  $d$ -составляющей (П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси  $d$ ); РТ $_q$  — регулятор тока  $q$ -составляющей (П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси  $q$ ); БКПС — блок компенсации перекрестных связей, вычисляет напряжения компенсации перекрестных связей; ПК1 — преобразователь координат, осуществляет перевод тока статора из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную, а затем во вращающуюся систему  $dq$ ; ПК2 — преобразователь координат, осуществляет перевод вектора напряжения статора из вращающейся системы  $dq$  в неподвижную систему координат



**Рис. 6.** Моделирование параметров электродвигателя и мешалки: а — частота вращения; б — момент; 1 — задание частоты вращения ротора; 2 — фактическая частота вращения ротора; 3 — частота вращения вала мешалки; 4 — задание момента на валу электродвигателя; 5 — фактический момент на валу электродвигателя; 6 — момент на валу мешалки

Кроме оценки результатов по времени для единицы оборудования дополнительно рекомендуется проводить расширенный анализ этой системы с использованием когнитивно-психологических факторов. Для

проведения такой экспертизы давно зарекомендована методика NASA-TLX (The NASA Task Load Index) тест [38, 39]. Испытуемым предлагали ответить на следующие вопросы, где ответом являлась постановка баллов от 0 до 10:

а) оцените, чувствовали ли вы угрозу, разочарование или раздражение (0 — не чувствовал, 10 — ярко чувствовал);

б) насколько сложно вам было выполнять свою работу (0 — легко, 10 — очень сложно);

в) насколько успешно вы справились со своей задачей (0 — не справился, 10 — отлично справился);

г) как быстро вы справились с заданием (0 — очень медленно, 10 — очень быстро);

д) насколько физически сложной была задача (0 — очень легкая, 10 — очень сложная);

е) насколько сложной была задача в целом (0 — очень легкая, 10 — очень сложная).

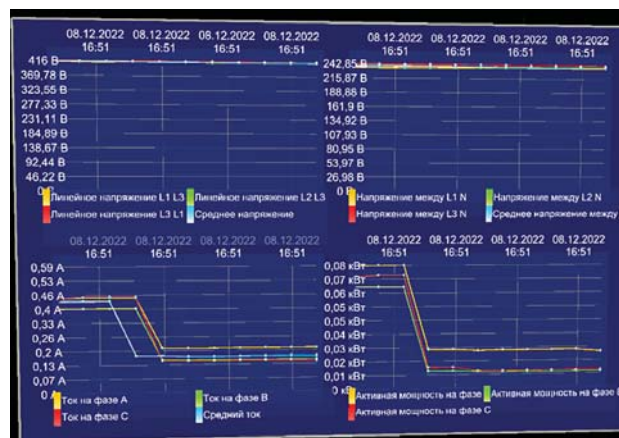
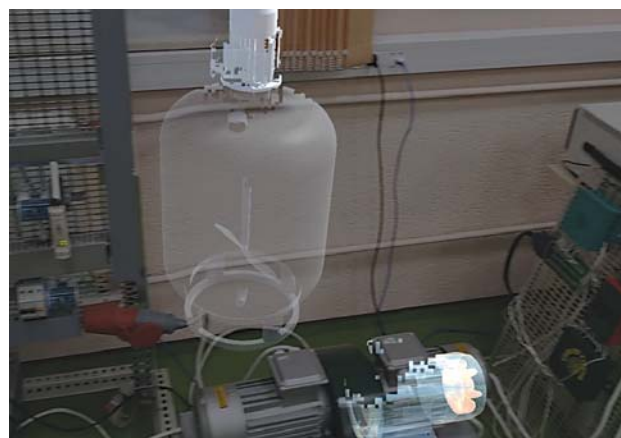


Рис. 7. Внешний вид разработанной системы

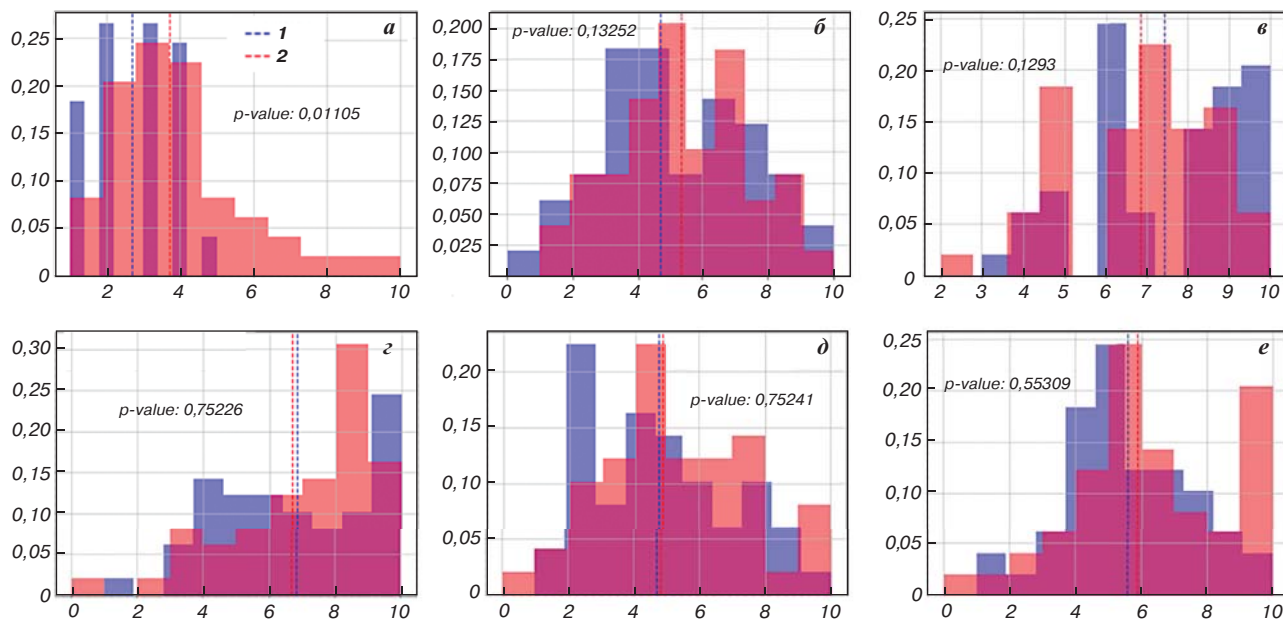


Рис. 8. Результаты опроса (а–е — заданные вопросы):  
1 — с использованием системы; 2 — без нее

Результаты опроса обрабатывали по критерию Манна – Уитни [40, 41]. На рис. 8 представлены результаты.

Можно сделать вывод, что при задании уровня значимости  $p = 0,01$  допустимо говорить о равенстве дисперсий в эксперименте, а поскольку  $p$ -value во всех случаях больше 0,01 (уровня значимости), то выдвинутую

гипотезу не отвергаем. Пунктирной линией на графиках показаны средние арифметические значения для каждого эксперимента. Исходя из полученных значений, нормировали средние значения результатов опроса, переводя их в шкалу от 0 до 100 %. Таким образом получили «полезный» процент для каждого



параметра, характеризующего когнитивно-психологический фактор. Рассчитав разницу средних арифметических «полезных» процентов для результатов с использованием системы с дополненной реальностью и без нее, мы получили результат, равный 5 %, который охарактеризовали как увеличение эффективности обслуживания единицы оборудования при применении дополненной реальности.

### Выводы и заключение

Система технического обслуживания, где задействованы технологии дополненной реальности, детализирует определение неисправностей и повышает эффективность принятия решений при обслуживании и ремонте электрооборудования. Время, затраченное на обнаружение дефекта и вывод аппарата из процесса, уменьшается ввиду сокращения информационного пути от персонала, находящегося на производственном объекте, до оператора, осуществляющего контроль технологического процесса. Это позволяет на месте определить необходимость проведения ремонта, основываясь на отображении в дополненной реальности классифицированной неисправности, возможном ее распространении, прогнозируемом состоянии оборудования и, как результат, работе технологической установки.

Помимо эффективности при диагностировании аппаратов, дополненная реальность дает эффект в проведении их ремонта. Поскольку неисправность рассчитана и известна, эта технология однозначно указывает на место поломки в оборудовании, а также отображает действия и инструменты, которые необходимы во время ремонта. Соответственно, время, затраченное на восстановление, сокращается, что приводит к уменьшению простоя машин и, как следствие, технологического участка.

Таким образом, исследование показало эффективность применения технологии дополненной реальности при техническом обслуживании оборудования металлургических производств. Представленный в работе функционал системы является минимальным для получения экономического эффекта. Расширение функционала может быть связано как с охватом большей части оборудования (то есть шириной охвата), так и с внедрением новых функций. Например, большим вопросом является создание сценариев обслуживания аппаратов и записи данных сценариев в систему. Разработка системы автоматического создания таких сценариев может являться хорошим примером развития исследований в этом направлении.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

*Tsvetnye Metally*. 2023. No. 4. pp. 14–23  
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.02

### AUGMENTED REALITY AS A MEANS OF METALLURGICAL EQUIPMENT SERVICING

#### Information about authors

N. I. Koteleva, Associate Professor at the Department of Process and Plant Automation<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: Koteleva\_NI@pers.spmi.ru

V. V. Valnev, Postgraduate Student of the Department of Process and Plant Automation<sup>1</sup>

N. A. Korolev, Lead Researcher at the Research and Training Centre for Digital Technology<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences

<sup>1</sup>Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

#### Abstract

In the era of digital technology, more and more of it finds application in various industries. This paper proposes to use technology of augmented reality for maintenance of stirred tank reactors. The proposed approach can be applied to any type of equipment, as it can be easily integrated with the existing automation systems and does not require much investment at the initial stage, implying gradual optimization and functionality build-up. This paper describes the basic set of functional requirements of an augmented reality-based maintenance system, methods of assessing the system performance, as well as scaling-up and streamlining prospects. The paper also describes how such systems can be integrated with existing control systems of a production company. The effectiveness of the developed augmented reality-based system was verified by determining the average execution time of each service stage and processing the outcomes using the Mann-Whitney U test. The use of the augmented reality system resulted in the reduction of the average service time by 2.3 times, while the maintenance efficiency increased by 5%.

**Key words:** augmented reality, maintenance, metallurgy, digitalization, IoT, control systems, automation, industry 4.0.

#### References

- Ralph B. J., Woschank M., Miklautsch Ph., König A. et al. MUL 4.0: Systematic digitalization of a value chain from raw material to recycling. *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 55. pp. 335–342.
- Phua A., Davies C. H. J., Delaney G. W. A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. *Computers in Industry*. 2022. Vol. 140, Iss. 3. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103667.
- Zhukovskii Y. L., Sizyakova E. V. The introduction of the system of energy saving and energy efficiency at the enterprises of metallurgy. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 202. pp. 153–155.
- Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29, No. 3. pp. 1521–1541.
- Kunshin A. et al. Development of monitoring and forecasting technology energy efficiency of well drilling using mechanical specific energy. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 19. DOI: 10.3390/en15197408.
- Dvoynikov M., Kunshin A. A., Blinov P., Morozov V. Development of mathematical model for controlling drilling parameters with screw downhole motor. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2020. Vol. 33, No. 7. pp. 1423–1430.
- Sun Y., Wang J., Wang X. Fault diagnosis of mechanical equipment in high energy consumption industries in China: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 186. 109833.
- Aguilera J. J., Meesenburg W., Ommen T. et al. A review of common faults in large-scale heat pumps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 168, Iss. 12. 112826.
- Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144, Iss. 4. 106908.
- Khokhlov S., Abiev Z., Makkoev V. The choice of optical flame detectors for automatic explosion containment systems based on the results of explosion radiation analysis of methane-and dust-air mixtures. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12, No. 3. 1515.
- Kottre A., Schöler T., Legat C. Applying engineering knowledge in alarm flood reduction to reduce machine downtime. *IFAC-Papers OnLine*. 2022. Vol. 55, No. 2. pp. 54–59.

12. Krishnan Umachandran, Roosefert Mohan T., Preetha Roselyn J., Uthra R. A. et al. Intelligent machine learning based total productive maintenance approach for achieving zero downtime in industrial machinery. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 157. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107267.
13. Plotnikova I., Sheveleva E., Narimanov R. Application of the system for electrical equipment diagnostics and its analysis. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 433. pp. 111–119.
14. Lipis E. A., Schislyayeva E. Qualification and mobility of transport complex personnel in the digitalization of shipbuilding. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. pp. 2138–2150.
15. Ramere M. D., Laseinde O. T. Optimization of condition-based maintenance strategy prediction for aging automotive industrial equipment using FMEA. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 180. pp. 229–238.
16. Geng S., Wang X. Predictive maintenance scheduling for multiple power equipment based on data-driven fault prediction. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Vol. 164. 107898.
17. Sääski J., Salonen T., Liinasuo M., Pakkanen J. et al. Augmented reality efficiency in manufacturing industry: a case study. *DS 50: Proceedings of Nord-Design 2008 Conference, Tallinn, Estonia*. 21–23.08.2008. 2008. pp. 99–109.
18. Zheng L., Liu X., An Z., Li S. et al. A smart assistance system for cable assembly by combining wearable augmented reality with portable visual inspection. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2020. Vol. 2, No. 1. pp. 12–27.
19. Costa C. M., Viega G., Sousa A. J., Rocha L. F. Modeling of video projectors in OpenGL for implementing a spatial augmented reality teaching system for assembly operations. *19th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*. 2019. DOI: 10.1109/ICARSC.2019.8733617.
20. Pogodaev A., Muzyleva I., Yazykova L., Kondratev S. The use of augmented reality technologies in electrical engineering. *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency*. 2020. pp. 646–650.
21. Romo J. E., Tipantasi G. R., Andsluz V. H., Sánchez J. S. Virtual training on pumping stations for drinking water supply systems. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2019. Vol. 11614 LNCS. pp. 10–429.
22. Ko C., Lee H., Lim Y., Lee W. B. Development of augmented virtual reality-based operator training system for accident prevention in a refinery. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 38, Iss. 8. pp. 1566–1577.
23. Beloglazov I. I., Petrov P. A., Bazhin V. Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 50–54. DOI: 10.17580/em.2020.02.12.
24. Khokhlov V., Lukin V., Khokhlov S. Modelling full-colour images of Earth: simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface. *Annals of GIS*. 2022. Vol. 29, Iss. 2. DOI: 10.1080/19475683.2022.2064911.
25. Turman E., Wayne S. CFD modeling of LDPE autoclave reactor to reduce ethylene decomposition: Part 1 validating computational methods. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 257, Iss. 9. 117720.
26. Kondrasheva N. K., Kireeva E. V., Zyryanova O. V. Development of new compositions for dust control in the mining and mineral transportation industry. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 248, No. 2. pp. 272–280.
27. Zhdaneev O. V., Zaytsev A. V., Prodan T. Possibilities for creating Russian high-tech bottomhole assembly. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252, No. 6. pp. 872–884.
28. Bushuev A. B., Boykov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V. et al. Synthesis of optimal information and energy schemes of measuring and converting devices. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021. Vol. 22, No. 10. pp. 518–526.
29. Rajan V., Sobhana N. V., Jayakrishnan R. Machine fault diagnostics and condition monitoring using augmented reality and IoT. *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. 2019. pp. 910–914.
30. Larsson T., Hestetun K., Hovland E., Skogestad S. Self-optimizing control of a large-scale plant: The Tennessee Eastman process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2001. Vol. 40, No. 22. pp. 4889–4901.
31. Sotaniemi V.-H., Taskila S., Ojamo H., Tanskanen J. Controlled feeding of lignocellulosic substrate enhances the performance of fed-batch enzymatic hydrolysis in a stirred tank reactor. *Biomass & Bioenergy*. 2016. Vol. 91. pp. 271–277.
32. Skamyin A., Belsky A., Dobush V., Gurevich I. Computation of nonlinear load harmonic currents in the presence of external distortions. *Computation*. 2022. Vol. 10, Iss. 3. 41.
33. Kurilin S., Dli M., Sokolov A. Linear induction motors for non-ferrous metallurgy. *Non-ferrous Metals*. 2021. No. 1. pp. 67–73. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.09.
34. Turman E. M., Wayne S. Leveraging fuzzy Logic PID controllers for accelerating chemical reactor CFD. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 262. p. 118029.
35. Romashev A. O., Nikolaeva N. V., Gatiatullin B. L. Adaptive approach formation using machine vision technology to determine the parameters of enrichment products deposition. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 677–685.
36. Paduloh P., Fatahillah H., Ramadhan M. A., Muhendra R. et al. Designing of temperature control for agitator machine using Internet of Thing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1063, Iss. 1. 012053.
37. Shilpa V., Vidya A., Pattar S. MQTT based secure transport layer communication for mutual authentication in IoT network. *Global Transitions Proceedings*. 2022. Vol. 3, Iss. 1. pp. 60–66.
38. Koo J., Kim Y.-G. Resource identifier interoperability among heterogeneous IoT platforms. *International Computer Engineering Conference*. 2022. Vol. 34, Iss. 7. pp. 4191–4208.
39. Mohammadian M., Parsaei H., Mokarami H., Kazemi R. Cognitive demands and mental workload: A field study of the mining control room operators. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, Iss. 2. e08860.
40. Hart S. G., Staveland L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988. Vol. 52. pp. 139–183.
41. Ruxton G. D. The unequal variance t-test is an underused alternative to Student's t-test and the Mann-Whitney U test. *Behavioral Ecology*. 2006. Vol. 17, Iss. 4. pp. 688–690.
42. Al-Badi A., Khan A., Eid-Alotaibi. Perceptions of learners and instructors towards artificial intelligence in personalized learning. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 201. pp. 445–451.

