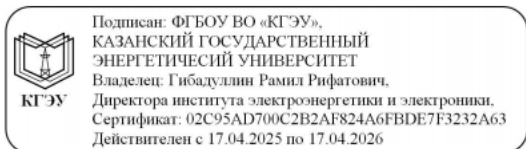




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Директор  
Института электроэнергетики и  
электроники

\_\_\_\_\_ Гибадуллин Р. Р.  
«24» февраля 2026 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.04. Виртуальное проектирование и цифровые двойники**

*(Код и наименование дисциплины в соответствии с РУП)*

Направление подготовки

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
*(Код и наименование направления подготовк (специальности))*

Направленность(и)  
(профиль(и))

13.04.02 Цифровая автоматизация и роботизация в  
энергетике  
*(Наименование направленности (профиля) образовательной программы)*

Квалификация

магистр

*(Бакалавр / Магистр)*

Программу разработал(и):

Наименование кафедры	Должность, уч.степень, уч.звание	ФИО разработчика
ТОЭ	Ст. преп. Каф. ТОЭ	Гарифуллина Н.А.

Согласование	Наименование подразделения	Дата	№ протокола	Подпись
Одобрена	Кафедра-разработчик «Теоретические основы электротехники»	28.01.2026	№7	Зав. кафедрой, д.т.н, профессор Садыков М.Ф.
Согласована	Выпускающая кафедра «Теоретические основы электротехники»	28.01.2026	№7	Зав. кафедрой, д.т.н, профессор Садыков М.Ф.
Согласована	Учебно-методический совет ИЭЭ	24.02.2026	№5	Директор ИЭЭ, к.т.н., доцент Гибадуллин Р.Р.
Одобрена	Ученый совет ИЭЭ	24.02.2026	№6	Директор ИЭЭ, к.т.н., доцент Гибадуллин Р.Р.

## 1. Цель, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины Б1.В.04. «Виртуальное проектирование и цифровые двойники» является: изучение создания, валидации и применения цифровых двойников и средств виртуального проектирования на всех этапах жизненного цикла сложных технических объектов и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), а также подготовка к решению задач цифровой трансформации промышленных и энергетических предприятий.

Задачами дисциплины являются:

- изучение понятийного аппарата и классификации цифровых моделей, теней и двойников, процедуры верификации, валидации и тестирования цифровых двойников на устойчивость и точность;
- приобретение навыков разработки и построения физических и эмпирических моделей оборудования,
- формирование навыков создания гибридных моделей, объединяющих физические принципы и машинное обучение.

Компетенции и индикаторы, формируемые у обучающихся:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора
ПК-1 Способен осуществлять эксплуатацию, развитие и цифровую трансформацию систем автоматизации и управления технологическими процессами (АСУ ТП) энергообъектов	ПК-1.3. Использует цифровое проектирование и моделирование режимов работы систем автоматизации.

## 2. Место дисциплины в структуре ОП

Предшествующие дисциплины (модули), практики, НИР, др.

**Б1.В.01. Цифровые системы автоматизации и управления**

Последующие дисциплины (модули), практики, НИР, др.

**Б2.В.03(Пд) Производственная практика (преддипломная)**

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1. Структура дисциплины

Для очной формы обучения

Вид учебной работы	Всего ЗЕ	Всего часов	Семестр(ы)
			3
<b>ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ ДИСЦИПЛИНЫ</b>	3	108	108
<b>КОНТАКТНАЯ РАБОТА</b>	-	38	38
<b>АУДИТОРНАЯ РАБОТА</b>	0,7	24	24
Лекции	0,2	8	8
Практические (семинарские) занятия	0	0	0
Лабораторные работы	0,5	16	16
<b>САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА ОБУЧАЮЩЕГОСЯ</b>	2,3	84	84
Проработка учебного материала	1,3	48	48
Курсовой проект	-	-	-
Курсовая работа	-	-	-
Подготовка к промежуточной аттестации	1	36	36
Промежуточная аттестация:			Э

#### 3.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и видам занятий

Разделы дисциплины	Всего часов	Распределение трудоемкости по видам учебной работы				Формы и вид контроля	Индексы индикаторов формируемых компетенций
		лекции	лаб. раб.	пр. зан.	сам. раб.		
Раздел 1. Теоретические основы и инструментарий цифровых двойников	24	2	8	0	14	ТК 1	ПК-1.3, 3, У, В

Раздел 2. Методы разработки и исследования цифровых двойников	28	2	6	0	20	ТК 2	ПК-1.3, 3, У, В
Раздел 3. Интеграция, эксплуатация и цифровая трансформация	20	4	2	0	14	ТК 3	ПК-1.3, 3, У, В
Зачет	36					ОМ	ПК-1.3, 3, У, В
<b>Итого за 3 семестр</b>	<b>108</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>48</b>		
<b>ИТОГО</b>	<b>108</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>48</b>		

### 3.3. Содержание дисциплины

#### **Раздел 1. Теоретические основы и инструментарий цифровых двойников**

Тема 1.1. Концепция цифровых двойников и виртуального проектирования.

Эволюция виртуального проектирования от традиционных САД-моделей к киберфизическим. Ввод понятий «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник».

Тема 1.2. Обзор платформ и сред разработки цифровых двойников.

Изучение современного программного инструментария для создания компонентов цифровых двойников. Обзор открытых и проприетарных платформ: САД-системы (FreeCAD) для геометрического моделирования, среды физического моделирования (OpenModelica).

#### **Раздел 2. Методы разработки и исследования цифровых двойников**

Тема 2.1. Парадигмы моделирования: физический, эмпирический и гибридный подходы.

Обзор трех фундаментальных методов создания моделей для цифровых двойников: физическое моделирование, основанное на законах природы; эмпирическое моделирование, опирающееся исключительно на данные; и гибридное моделирование, объединяющее сильные стороны обоих подходов.

Тема 2.2. Инструментарий и методы работы с моделями.

Реализация моделей в открытом программном стеке: интеграция OpenModelica и Python через OMPython, стандарт FMI/FMU для обмена динамическими моделями, процедуры параметрической идентификации и калибровки, а также методы тестирования на устойчивость и точность (верификация, валидация, метрики регрессии, стресс-тестирование).

Тема 2.3. Комплексное применение и выводы

Ключевые принципы выбора подхода в зависимости от инженерной задачи.

### **Раздел 3. Интеграция, эксплуатация и цифровая трансформация**

Тема 3.1. Архитектура и протоколы промышленной интеграции.

Многоуровневая модель ISA-95, место цифрового двойника и концепция Unified Namespace (UNS) как единого информационного пространства. Детальный обзор промышленных протоколов. Критерии выбора протокола для различных сценариев цифровых двойников.

Тема 3.2. Теневой режим и безопасное внедрение цифровых двойников

Методология Shadow Mode: этапы от SIL-тестирования до автоматического управления. Критерии успешного прохождения теневого режима и организационные аспекты перехода. Риски, связанные с внедрением, и меры их минимизации.

Тема 3.3. Техничко-экономическое обоснование и документирование проектов.

Источники экономического эффекта (сокращение затрат, простоев, брака, инвестиций, монетизация данных). Методика расчёта и срока окупаемости, анализ чувствительности на примере насосной станции. Паспорт цифрового двойника.

Тема 3.4. Стандартизация, риски и барьеры внедрения

Обзор российских и международных стандартов, деятельность ТК-194 «Кибер-физические системы». Систематизация технических, организационных, экономических и регуляторных барьеров, «цифровой парадокс».

Тема 3.5. Перспективы развития технологии цифровых двойников.

Федеративные цифровые двойники и экосистемы взаимодействия.  
 Интеграция с иммерсивными технологиями и киберфизические тренажёры.  
 Сервис-ориентированное проектирование .

### 3.4. Тематический план практических занятий

*Данный вид работы не предусмотрен учебным планом.*

### 3.5. Тематический план лабораторных работ

Лабораторная работа №1. Знакомство с FreeCAD: параметрическое 3D-моделирование.

Лабораторная работа №2. Знакомство с OpenModelica: физическое 1D-моделирование.

Лабораторная работа №3. Знакомство с Python и Jupyter Notebook: анализ данных

Лабораторная работа №4. Знакомство с OpenSCADA / Node-RED: визуализация и интеграция данных

Лабораторная работа №5. Создание параметрической модели объекта.

Лабораторная работа №6. Разработка модели центробежного насоса с трубопроводной обвязкой.

Лабораторная работа №7. Построение эмпирической модели для прогнозирования параметров.

Лабораторная работа №8. Интеграция цифрового двойника.

### 3.6. Курсовой проект /курсовая работа

*Данный вид работы не предусмотрен учебным планом.*

## 4. Оценивание результатов обучения

Оценивание результатов обучения по дисциплине осуществляется в рамках текущего контроля и промежуточной аттестации, проводимых по балльно-рейтинговой системе (БРС).

Шкала оценки результатов обучения по дисциплине:

Код компетенции	Код индикатора компетенции и	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Уровень сформированности индикатора компетенции			
			Высокий	Средний	Ниже среднего	Низкий
			от 85 до 100	от 70 до 84	от 55 до 69	от 0 до 54
			Шкала оценивания			
			отлично	хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно

		зачтено			не зачтено	
ПК-1	ПК-1.3.	знать:				
		Знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	хорошо знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	знает плохо классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	не знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы
		уметь:				
		умеет проводить валидацию, оценку точности моделей и оформлять паспорт цифрового двойника	свободно умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	в основном умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	не всегда умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	не умеет разрабатывать, проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника
владеть:						
Владеет навыками документирования результатов проектирования.	Умело работает документировать результаты проектирования	Хорошо документирует результаты проектирования	Способен документировать результаты проектирования	не умеет документировать результаты проектирования		

Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации приведены в Приложении к рабочей программе дисциплины.

*Полный комплект заданий и материалов, необходимых для оценивания результатов обучения по дисциплине, хранится на кафедре разработчика.*

## 5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

## 5.1. Учебно-методическое обеспечение

### 5.1.1. Основная литература.

1. Петров, А. М. Имитационное моделирование технологических систем и комплексов: учебное пособие для вузов / А. М. Петров, И. С. Беляев, О. Н. Демченко. — Санкт-Петербург: Лань, 2025. — 112 с. — ISBN 978-5-507-52172-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/483002>.

2. Зубкова, Т. М. Построение системы автоматизированного проектирования технологических объектов / Т. М. Зубкова. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2023. — 264 с. — ISBN 978-5-507-45733-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/282371>.

3. Моделирование процессов и систем: учебное пособие / А.В. Петров. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 288 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/212213>. - ISBN 978-5-8114-1886-2. - Текст: электронный.

5. Пашко А. Д. Моделирование систем и процессов промышленных предприятий: учебно-методическое пособие / А. Д. Пашко, С. А. Засыпкина. - Санкт-Петербург: Лань, 2024. - 92 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/433946>. - ISBN 978-5-507-50043-7. - Текст: электронный.

6. Николаев, С. В. Моделирование систем и процессов: учебник / С. В. Николаев. — Москва: КноРус, 2025. — 223 с. — ISBN 978-5-406-14217-2. — URL: <https://book.ru/book/956749>.

### 5.1.2. Дополнительная литература

1. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python / В. Ф. Очков, К. А. Орлов, Ю. В. Чудова [и др.]. — Санкт-Петербург: Лань, 2023. — 212 с. — ISBN 978-5-507-45821-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/319406>.

2. Фролов, О. Ю. Моделирование автоматизированного производства: учебно-методическое пособие / О. Ю. Фролов, Е. И. Борзенко. — Томск: ТГУ, 2016. — 32 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/105043>.

3. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учебное пособие для вузов / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. - 224 с.: ил. - ISBN 5-94157-578-5. - Текст: непосредственный.

4. Агафонов, Е. Д. Моделирование систем: учебное пособие / Е. Д. Агафонов, О. В. Чубарова. — Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2025. — 88 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/513684>.

5. Лапшина, М. Л. Моделирование процессов и систем : учебное пособие / М. Л. Лапшина, Д. Д. Лапшин. — Воронеж : ВГЛУ, 2023. — 59 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/386918>.

6. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем : учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 5-е изд., стер. - Москва : Высш. шк., 2007. - 343 с. : ил. - ISBN 978-5-06-003860-6. - Текст: непосредственный.

7. Горлач, Б. А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б. А. Горлач, В. Г. Шахов. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2023. — 292 с. — ISBN 978-5-507-46275-9. — Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/305219> (дата обращения: 10.03.2026). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## 5.2. Информационное обеспечение

### 5.2.1. Электронные и интернет-ресурсы

1. Электронно-библиотечная система «Лань» (<https://e.lanbook.com/>)
2. ДК размещенный в LMS Moodle 3.0

### 5.2.2. Профессиональные базы данных / Информационно-справочные системы

1. Международная реферативная база данных ([http:// link.springer.com](http://link.springer.com)).
2. Научная электронная библиотека "elibrary.ru" (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>).
3. Российская государственная библиотека (<http://www.rsl.ru>)
4. Энциклопедии, словари, справочники (URL: <http://www.rubricon.com>).

### 5.2.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение дисциплины

1. Пользовательская операционная система Windows 10.
2. ПО для эффективного онлайн- взаимодействия преподавателя и студента LMS Moodle. <https://download.moodle.org/releases/latest/>
3. Система поиска информации в сети интернет Браузер Chrome
4. Пакет программ для создания и просмотра файлов формата PD Adobe Acrobat "ИРБИС 64 (модульная поставка): АРМ «Читатель», АРМ "Книговыдача
5. Программное обеспечение FreeCAD, официальный сайт: <https://www.freecad.org/>
6. Программное обеспечение OpenModelica, официальный сайт: <https://openmodelica.org/>
7. Программное обеспечение Anaconda (Python), официальный сайт: <https://www.anaconda.com/>
8. Программное обеспечение OpenSCADA, официальный сайт:

## 6. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Наименование вида учебной работы	Наименование учебной аудитории, специализированной лаборатории	Перечень необходимого оборудования и технических средств обучения
Лекции	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа	Специализированная учебная мебель, технические средства обучения, служащие для представления учебной информации большой аудитории (мультимедийный проектор, компьютер (ноутбук), экран), демонстрационное оборудование, учебно-наглядные пособия
Лабораторные занятия	Компьютерный класс с выходом в интернет А-309	Специализированная учебная мебель, компьютеры, технические средства обучения (мультимедийный проектор, компьютер (ноутбук), экран), видеокамеры, программное обеспечение
Самостоятельная работа	Компьютерный класс с выходом в Интернет А-309	Специализированная учебная мебель, компьютеры, технические средства обучения (мультимедийный проектор, компьютер (ноутбук), экран), видеокамеры, программное обеспечение
	Читальный зал библиотеки	Специализированная мебель, компьютерная техника с возможностью выхода в Интернет и обеспечением доступа в ЭИОС, экран, мультимедийный проектор, программное обеспечение

## 7. Особенности организации образовательной деятельности для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Лица с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) и инвалиды имеют возможность беспрепятственно перемещаться из одного учебно-лабораторного корпуса в другой, подняться на все этажи учебно-лабораторных корпусов, заниматься в учебных и иных помещениях с учетом особенностей психофизического развития и состояния здоровья.

Для обучения лиц с ОВЗ и инвалидов, имеющих нарушения опорно-двигательного аппарата, обеспечены условия беспрепятственного доступа во все учебные помещения. Информация о специальных условиях, созданных для обучающихся с ОВЗ и инвалидов, размещена на сайте университета

[www//kgeu.ru](http://www/kgeu.ru). Имеется возможность оказания технической помощи ассистентом, а также услуг сурдопереводчиков и тифлосурдопереводчиков.

Для адаптации к восприятию лицами с ОВЗ и инвалидами с нарушенным слухом справочного, учебного материала по дисциплине обеспечиваются следующие условия:

- для лучшей ориентации в аудитории, применяются сигналы оповещения о начале и конце занятия (слово «звонок» пишется на доске);
- внимание слабослышащего обучающегося привлекается педагогом жестом (на плечо кладется рука, осуществляется нерезкое похлопывание);
- разговаривая с обучающимся, педагогический работник смотрит на него, говорит ясно, короткими предложениями, обеспечивая возможность чтения по губам.

Компенсация затруднений речевого и интеллектуального развития слабослышащих обучающихся проводится путем:

- использования схем, диаграмм, рисунков, компьютерных презентаций с гиперссылками, комментирующими отдельные компоненты изображения;
- регулярного применения упражнений на графическое выделение существенных признаков предметов и явлений;
- обеспечения возможности для обучающегося получить адресную консультацию по электронной почте по мере необходимости.

Для адаптации к восприятию лицами с ОВЗ и инвалидами с нарушениями зрения справочного, учебного, просветительского материала, предусмотренного образовательной программой по выбранному направлению подготовки, обеспечиваются следующие условия:

- ведется адаптация официального сайта в сети Интернет с учетом особых потребностей инвалидов по зрению, обеспечивается наличие крупношрифтовой справочной информации о расписании учебных занятий;
- педагогический работник, его собеседник (при необходимости), присутствующие на занятии, представляются обучающимся, при этом каждый раз называется тот, к кому педагогический работник обращается;
- действия, жесты, перемещения педагогического работника коротко и ясно комментируются;
- печатная информация предоставляется крупным шрифтом (от 18 пунктов), тотально озвучивается;
- обеспечивается необходимый уровень освещенности помещений;
- предоставляется возможность использовать компьютеры во время

занятий и право записи объяснений на диктофон (по желанию обучающихся).

Форма проведения текущей и промежуточной аттестации для обучающихся с ОВЗ и инвалидов определяется педагогическим работником в соответствии с учебным планом. При необходимости обучающемуся с ОВЗ, инвалиду с учетом их индивидуальных психофизических особенностей дается возможность пройти промежуточную аттестацию устно, письменно на бумаге, письменно на компьютере, в форме тестирования и т.п., либо предоставляется дополнительное время для подготовки ответа.

## **8. Методические рекомендации для преподавателей по организации воспитательной работы с обучающимися.**

Методическое обеспечение процесса воспитания обучающихся выступает одним из определяющих факторов высокого качества образования. Преподаватель вуза, демонстрируя высокий профессионализм, эрудицию, четкую гражданскую позицию, самодисциплину, творческий подход в решении профессиональных задач, в ходе образовательного процесса способствует формированию гармоничной личности.

При реализации дисциплины преподаватель может использовать следующие методы воспитательной работы:

- методы формирования сознания личности (беседа, диспут, внушение, инструктаж, контроль, объяснение, пример, самоконтроль, рассказ, совет, убеждение и др.);

- методы организации деятельности и формирования опыта поведения (задание, общественное мнение, педагогическое требование, поручение, приучение, создание воспитывающих ситуаций, тренинг, упражнение, и др.);

- методы мотивации деятельности и поведения (одобрение, поощрение социальной активности, порицание, создание ситуаций успеха, создание ситуаций для эмоционально-нравственных переживаний, соревнование и др.)

При реализации дисциплины преподаватель должен учитывать следующие направления воспитательной деятельности:

*Гражданское и патриотическое воспитание:*

- формирование у обучающихся целостного мировоззрения, российской идентичности, уважения к своей семье, обществу, государству, принятым в семье и обществе духовно-нравственным и социокультурным ценностям, к национальному, культурному и историческому наследию, формирование стремления к его сохранению и развитию;

- формирование у обучающихся активной гражданской позиции, основанной на традиционных культурных, духовных и нравственных ценностях российского общества, для повышения способности ответственно реализовывать свои конституционные права и обязанности;

- развитие правовой и политической культуры обучающихся, расширение конструктивного участия в принятии решений, затрагивающих их права и интересы, в том числе в различных формах самоорганизации, самоуправления, общественно-значимой деятельности;

- формирование мотивов, нравственных и смысловых установок личности, позволяющих противостоять экстремизму, ксенофобии, дискриминации по социальным, религиозным, расовым, национальным признакам, межэтнической и межконфессиональной нетерпимости, другим негативным социальным явлениям.

*Духовно-нравственное воспитание:*

- воспитание чувства достоинства, чести и честности, совестливости, уважения к родителям, учителям, людям старшего поколения;

- формирование принципов коллективизма и солидарности, духа милосердия и сострадания, привычки заботиться о людях, находящихся в трудной жизненной ситуации;

- формирование солидарности и чувства социальной ответственности по отношению к людям с ограниченными возможностями здоровья, преодоление психологических барьеров по отношению к людям с ограниченными возможностями;

- формирование эмоционально насыщенного и духовно возвышенного отношения к миру, способности и умения передавать другим свой эстетический опыт.

*Культурно-просветительское воспитание:*

- формирование эстетической картины мира;

- формирование уважения к культурным ценностям родного города, края, страны;

- повышение познавательной активности обучающихся.

*Научно-образовательное воспитание:*

- формирование у обучающихся научного мировоззрения;

- формирование умения получать знания;

- формирование навыков анализа и синтеза информации, в том числе в профессиональной области.

**Вносимые изменения и утверждения на новый учебный год**

№ п/п	№ раздела внесения изменений	Дата внесения изменений	Содержание изменений	«Согласовано» Зав. каф. реализующей	«Согласовано» председатель УМК института (факультета), в состав которого входит выпускающая
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					



**К Г Э  
У**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования**  
**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)**

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
по дисциплине**

**Б1.В.04. Виртуальное проектирование и цифровые двойники**

Направление подготовки

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Направленность  
(профиль)

Цифровая автоматизация и роботизация в энергетике

Квалификация

Магистр



## 2. Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации

Шкала оценки результатов обучения по дисциплине:

Код компетенции	Код индикатора компетенции и	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Уровень сформированности индикатора компетенции			
			Высокий	Средний	Ниже среднего	Низкий
			от 85 до 100	от 70 до 84	от 55 до 69	от 0 до 54
			Шкала оценивания			
			отлично	хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно
			зачтено		не зачтено	
ПК-1	ПК-1.3.	знать:				
		Знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	хорошо знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	знает плохо классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы	не знает классификацию и уровни зрелости цифровых двойников и принципы интеграции цифровых двойников в АСУ ТП и корпоративные системы
		уметь:				
		умеет проводить валидацию, оценку точности моделей и оформлять паспорт цифрового двойника	свободно умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	в основном умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	не всегда умеет проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника	не умеет разрабатывать, проводить валидацию, оценку точности моделей, оформлять паспорт цифрового двойника
владеть:						

		Владеет навыками документирования результатов проектирования.	Умело работает документировать результаты проектирования	Хорошо документирует результаты проектирования	Способен документировать результаты проектирования	не умеет документировать результаты проектирования
--	--	---	--	--	--	--

Оценка **«Отлично»** выставляется студенту, который обладает всесторонними, систематизированными и глубокими знаниями материала учебной программы, умеет свободно выполнять задания, предусмотренные учебной программой, усвоил основную и ознакомился с дополнительной литературой.

Оценка **«Хорошо»** выставляется студенту, обнаружившему полное знание материала учебной программы, успешно выполняющему предусмотренные учебной программой задания, усвоившему материал основной литературы, рекомендуемой учебной программой.

Оценка **«Удовлетворительно»** выставляется студенту, который показал знание основного материала учебной программы в объеме, достаточном и необходимом для дальнейшей учебы, справился с выполнением заданий, знаком с основной литературой.

Оценка **«Неудовлетворительно»** выставляется студенту, не знающему основной части материала учебной программы, допускающему принципиальные ошибки в выполнении заданий, неуверенно с большими затруднениями выполняющему практические работы

### 3. Перечень оценочных средств

Краткая характеристика оценочных средств, используемых при текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающегося по дисциплине:

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Описание оценочного средства
Тест (Тест)	Система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося	Комплект тестовых заданий
Отчет по лабораторной работе (ОЛР)	Выполнение лабораторной работы, обработка результатов испытаний, измерений, эксперимента. Оформление отчета, защита результатов лабораторной работы по отчету	Перечень заданий и вопросов для защиты лабораторной работы, перечень требований к отчету

**4. Перечень контрольных заданий или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений и навыков, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения дисциплины**  
**Для текущего контроля ТК 1:**

Проверяемая компетенция:

ПК-1.3. Способен осуществлять эксплуатацию, развитие и цифровую трансформацию систем автоматизации и управления технологическими процессами (АСУ ТП) энергообъектов.

1. ТЕСТ

1. Какой термин обозначает цифровое представление актива, которое получает данные от объекта в автоматическом режиме, но НЕ управляет им напрямую и НЕ передаёт данные обратно объекту?

- а) Цифровая модель (Digital Model)
- б) Цифровая тень (Digital Shadow)
- в) Цифровой двойник (Digital Twin)
- г) Цифровой макет (Digital Mock-Up)

2. Какие два обязательных признака отличают «цифрового двойника» от «цифровой тени»?

- а) Наличие 3D-визуализации
- б) Автоматический двунаправленный поток данных между физическим объектом и цифровой копией
- в) Использование технологий машинного обучения
- г) Способность модели напрямую влиять на управление объектом (изменять режимы, уставки)

3. Установите соответствие между уровнем зрелости цифрового двойника и его характеристикой:

Уровень	Характеристика
1) Цифровая модель (Digital Model)	А) Автоматический однонаправленный поток данных от объекта к модели
2) Цифровая тень	Б) Полная интеграция: объект → модель → объект (замкнутый цикл)
3) Цифровой двойник	В) Ручной ввод данных, отсутствие автоматической связи

4. Что такое PLM (Product Lifecycle Management)?

- а) Система для автоматизации технологических процессов
- б) Концепция управления жизненным циклом изделия от проектирования до утилизации
- в) Программный пакет для 3D-моделирования
- г) База данных нормативно-справочной информации

5. Какая концепция НЕ относится к базовым принципам Industry 4.0?
- а) Киберфизические системы (CPS)
  - б) Интернет вещей (IoT)
  - в) Складской учёт на бумажных носителях
  - г) Цифровые двойники
6. Что такое MBSE (Model-Based Systems Engineering)?
- а) Моделирование бизнес-процессов предприятия
  - б) Системная инженерия, основанная на моделях, где модель является первичным артефактом разработки
  - в) Расчёт механической прочности конструкций
  - г) Создание 3D-моделей в CAD-системах
7. Для каких целей создаются цифровые двойники в промышленности и энергетике? (Выберите три правильных ответа)
- а) Для прогнозирования остаточного ресурса оборудования
  - б) Для замещения физического объекта в полном объёме
  - в) Для оптимизации режимов работы и снижения эксплуатационных затрат
  - г) Для проведения виртуальных испытаний и сокращения натуральных экспериментов
  - д) Для украшения отчётов и презентаций
8. Какая из перечисленных сред НЕ является платформой для создания цифровых двойников?
- а) ANSYS Twin Builder
  - б) Paint
  - в) MATLAB/Simulink
  - г) OpenModelica
9. Что такое параметрическая CAD-модель?
- а) Модель, созданная без указания размеров
  - б) Трёхмерная модель, геометрия которой управляется через набор переменных и зависимостей
  - в) Фотография объекта
  - г) Расчётная сетка для CFD-анализа
10. Какой формат файла наиболее подходит для передачи геометрической модели из CAD-системы в CAE-пакет для инженерного анализа?
- а) .docx
  - б) .step (.stp)
  - в) .mp4
  - г) .exe
11. Что такое «цифровой макет» (Digital Mock-Up)?
- а) Имитационная модель технологического процесса
  - б) Электронное описание изделия, содержащее его геометрию, структуру и свойства, предназначенное для визуализации и проверки сборки

в) Нейросетевая модель прогнозирования отказов

г) Документация на бумажном носителе

12. В чём ключевое различие между САД- и САЕ-системами?

а) САД — для черчения, САЕ — для видеомонтажа

б) САД — для создания геометрии и конструкторской документации, САЕ — для инженерных расчётов и анализа (прочность, гидравлика, тепло)

в) САД — бесплатное ПО, САЕ — только платное

г) Различий нет, это синонимы

13. Какие протоколы передачи данных наиболее часто используются для интеграции цифровых двойников с АСУ ТП? (Выберите два)

а) OPC UA

б) MQTT

в) HTTP (без расширений)

г) FTP

14. Является ли статическая 3D-модель насоса, созданная в КОМПАС-3D и не связанная с реальными данными, цифровым двойником?

а) Да, если она точно повторяет геометрию

б) Нет, это цифровая модель или цифровой макет, так как отсутствует автоматическая связь с объектом

г) Да, если она сохранена в облаке

15. Закончите предложение:

«Цифровой двойник, в отличие от обычной имитационной модели, обязательно должен иметь \_\_\_\_\_ связь с физическим объектом в режиме реального времени или близком к реальному».

16. (Задание повышенной сложности) Расположите этапы эволюции цифрового представления объекта в правильном порядке от начального к наиболее развитому:

1. Цифровой двойник (Digital Twin)

2. Цифровая тень (Digital Shadow)

3. Цифровая модель (Digital Model)

4. Физический объект без цифрового описания

Ответы к тесту:

1 б) Цифровая тень (Digital Shadow)

2 б) и г)

3 1-В, 2-А, 3-Б

4 б)

5 в)

6 б)

7 а), в), г)

8 б)

9 б)

- 10 б)
- 11 б)
- 12 б)
- 13 а) и б)
- 14 б)
- 15 двунаправленную / двустороннюю
- 16 4 → 3 → 2 → 1 Физический объект → Модель (ручной ввод) → Тень (авто ввод) → Двойник (замкнутый цикл)

## 2. ОЛР

### **Лабораторная работа №1. Знакомство с FreeCAD: параметрическое 3D-моделирование.**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Что такое параметрическое моделирование и в чём его преимущество перед «жёстким» моделированием?
2. Какие верстаки FreeCAD используются для создания твёрдотельных моделей?
3. Как в FreeCAD организована связь между электронной таблицей и размерами эскиза?
4. Для чего нужен формат STEP? Какие данные он сохраняет?
5. Что произойдёт с моделью, если удалить электронную таблицу Parameters?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы,
- Файл модели FreeCAD (.FCStd).
- Экспортированный STEP-файл.
- Краткое описание созданной модели и её параметров
- Выводы

### **Лабораторная работа № 2. Знакомство с OpenModelica: физическое 1D-моделирование**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Что означает «акаузальное» моделирование и чем оно отличается от блочно-ориентированного?
2. Как в Modelica задаются начальные условия для переменных состояния?
3. Какие численные методы использует OpenModelica для интегрирования?

4. Для чего предназначен формат FMU и какие типы интерфейсов FMI существуют?
5. Каким образом можно передавать данные из OpenModelica в другие программы?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы,
- Тексты созданных моделей (.mo файлы).
- Скриншоты графиков для различных значений параметров.
- Экспортированный FMU-файл.
- Краткий анализ поведения моделей.

### **Лабораторная работа № 3. Знакомство с Python и Jupyter Notebook: анализ данных**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Чем Jupyter Notebook отличается от обычного скрипта Python?
2. Какие основные структуры данных предоставляет библиотека NumPy?
3. Для каких задач используется библиотека Pandas?
4. Какие типы графиков можно строить с помощью Matplotlib?
5. Как выполнить первичный статистический анализ данных (среднее, медиана, корреляция)?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы,
- Jupyter Notebook (.ipynb) со всеми выполненными ячейками.
- Экспортированный HTML-файл ноутбука.
- Сгенерированный CSV-файл.
- Вывод

### **Лабораторная работа № 4. Знакомство с OpenSCADA / Node-RED: визуализация и интеграция данных**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Каково назначение SCADA-систем в промышленной автоматизации?
2. Что такое «тег» и как он связан с физическими параметрами?
3. Какие протоколы используются для сбора данных от контроллеров?
4. В чём различие между OpenSCADA и Node-RED? Для каких задач предпочтителен каждый из них?
5. Каким образом настраивается сигнализация при выходе параметра за допустимые пределы?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы,
- Скриншоты созданной мнемосхемы.
- Описание настроек источников данных.
- Файл конфигурации (для OpenSCADA — .prj, для Node-RED — экспортированный поток JSON).
- Краткий вывод о возможностях изученной SCADA-платформы.

## Для текущего контроля ТК 2:

Проверяемая компетенция:

ПК-1.3. Способен осуществлять эксплуатацию, развитие и цифровую трансформацию систем автоматизации и управления технологическими процессами (АСУ ТП) энергообъектов.

### 1. ТЕСТ

1. Какие два основных подхода к моделированию технологических процессов существуют?

- а) Детерминированный и стохастический
- б) Физический (white-box) и эмпирический (black-box)
- в) Линейный и нелинейный
- г) Статический и динамический

2. Что такое 1D-моделирование в контексте цифровых двойников?

- а) Моделирование объектов, имеющих только одно измерение
- б) Моделирование физических процессов на основе сосредоточенных параметров (гидравлика, теплообмен, механика) без учёта точной 3D-геометрии
- в) Моделирование в одномерном пространстве координат
- г) Создание принципиальных схем в Visio

3. Какие методы относятся к эмпирическому (data-driven) моделированию?  
(Выберите три)

- а) Регрессионный анализ
- б) Решение дифференциальных уравнений теплообмена
- в) Нейронные сети
- г) Случайный лес (Random Forest)
- д) Метод конечных элементов

4. Что такое параметрическая идентификация модели?

- а) Присвоение модели уникального идентификатора в базе данных
- б) Процесс определения численных значений коэффициентов и параметров модели на основе экспериментальных данных

- в) Создание 3D-модели с параметрически заданными размерами
- г) Шифрование модели для защиты интеллектуальной собственности

5. Установите соответствие между типом модели и её описанием:

Тип модели	Описание
1) Физическая	А) Модель строится исключительно на основе исторических данных, внутренние процессы не описываются
2) Эмпирическая	Б) Модель, объединяющая физические уравнения и корректирующие алгоритмы машинного обучения
3) Гибридная	В) Модель основана на фундаментальных законах физики (сохранение массы, энергии, импульса)

6. Какая метка НЕ используется для оценки точности регрессионной модели прогнозирования?

- а) MAE (Mean Absolute Error)
- б) RMSE (Root Mean Square Error)
- в) Коэффициент детерминации  $R^2$
- г) Матрица ошибок (Confusion Matrix)

7. Для решения какой задачи чаще всего применяются методы спектрального анализа (FFT, вейвлет-преобразование) в цифровых двойниках?

- а) Прогнозирование остаточного ресурса подшипников по вибрационным сигналам
- б) Расчёт гидравлического сопротивления трубопровода
- в) Определение геометрических размеров детали
- г) Оценка экономической эффективности

8. Расположите этапы построения эмпирической (data-driven) модели в правильной последовательности:

1. Обучение модели на тренировочной выборке
2. Сбор и очистка исходных данных
3. Оценка точности на тестовой выборке
4. Выделение признаков (feature engineering)
5. Выбор алгоритма машинного обучения

Правильная последовательность:

9. Что такое «гибридная модель» в контексте цифровых двойников?

- а) Модель, работающая на двух разных компьютерах
- б) Комбинация физической модели (первопринципной) и модели машинного обучения, корректирующей её погрешности
- в) Модель, написанная на двух языках программирования
- г) 3D-модель, сочетающая твёрдотельное и поверхностное моделирование

10. В чём основная цель верификации модели?

- а) Проверка, правильно ли модель реализована с математической и алгоритмической точки зрения
- б) Проверка, соответствует ли модель реальному объекту с заданной точностью
- в) Утверждение модели руководством предприятия
- г) Защита модели от несанкционированного доступа

11. В чём основная цель валидации модели?

- а) Проверка синтаксической корректности программного кода
- б) Проверка соответствия модели реальному объекту или процессу с требуемой точностью
- в) Оптимизация вычислительной производительности
- г) Документирование модели

12. Что такое переобучение (overfitting) модели машинного обучения?

- а) Слишком долгое обучение модели
- б) Модель слишком точно запомнила обучающую выборку, но плохо обобщает новые данные
- в) Модель имеет слишком мало параметров
- г) Ошибка в программном коде

13. Какие методы позволяют предотвратить переобучение? (Выберите два)

- а) Кросс-валидация
- б) Увеличение сложности модели (больше слоёв нейросети)
- в) Регуляризация (L1, L2)
- г) Исключение тестовой выборки

14. Что такое кросс-валидация (cross-validation)?

- а) Проверка модели на перекрёстное влияние параметров
- б) Метод оценки обобщающей способности модели путём многократного разбиения данных на обучающие и валидационные подвыборки
- в) Сравнение двух разных моделей между собой
- г) Тестирование модели на экстремальных значениях

15. Какой метод тестирования модели подразумевает подачу на вход

зашумлённых сигналов, экстремальных значений или имитацию отказа датчиков?

- а) Модульное тестирование
- б) Стресс-тестирование (тестирование на устойчивость)
- в) Приёмочное тестирование
- г) Интеграционное тестирование

Ответы к тесту:

- 1 б)
- 2 б)
- 3 а), в), г)
- 4 1-В, 2-А, 3-Б
- 5 б)
- 6 г)
- 7 а)
- 8 2 → 4 → 5 → 1 → 3
- 9 б)
- 10 а)
- 11 б)
- 12 б)
- 13 а), в)
- 14 б)
- 15 б)

## 2. ОЛР

### **Лабораторная работа №5. Создание параметрической модели объекта.**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Что такое параметризация и зачем она нужна при создании цифровых двойников?
2. Какие преимущества даёт связь САД-модели с электронной таблицей?
3. Почему формат STEP является предпочтительным для обмена геометрией?
4. Опишите структуру дерева построения в вашей модели.
5. Можно ли экспортировать из FreeCAD параметрическую модель в OpenModelica напрямую? Если нет, как передать параметры?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы,
- Готовая параметрическая 3D-модель задвижки.
- Электронная таблица параметров с алиасами.

- Экспортированный STEP-файл.
- Вывод о работоспособности параметрической модели.

### **Лабораторная работа №6. Разработка модели центробежного насоса с трубопроводной обвязкой.**

Контрольные вопросы для защиты:

1. Что такое 1D-моделирование? Какие задачи удобно решать этим методом?
2. Запишите уравнение характеристики центробежного насоса. Физический смысл коэффициентов.
3. Как связаны напор, подача и частота вращения насоса (законы подобия)?
4. Что произойдет с рабочей точкой при увеличении геодезической высоты?
5. Для чего нужен экспорт в FMU? Какие данные содержит этот файл?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы
- 1D-гидравлическая модель центробежного насоса в OpenModelica.
- Рабочая точка насосной установки для номинального режима.
- Исследование влияния частоты вращения на положение рабочей точки.
- Экспорт модели в FMU для использования в последующих работах.
- Выводы

### **Лабораторная работа №7. Построение эмпирической модели для прогнозирования параметров.**

Контрольные вопросы для защиты:

1. В чём различие между физическим (white-box) и эмпирическим (black-box) моделированием? Приведите преимущества и недостатки каждого подхода .
2. Что такое коэффициент детерминации  $R^2$ ? В каких пределах он изменяется и как интерпретируется?
3. Почему важно разделять выборку на обучающую и тестовую? Что такое переобучение (overfitting)?
4. Какие метрики качества регрессии вы знаете? В каких случаях предпочтительнее использовать MAE, а в каких – RMSE?
5. Как интерпретировать значение коэффициента регрессии, если данные были стандартизированы (масштабированы)?
6. Для чего в модели добавляют константу (intercept)? Что произойдет, если её не добавить?

Требования к отчету.

Отчет должен содержать:

- Название и цель работы
- Разведочный анализ данных.
- Модель множественной линейной регрессии.
- Получены метрики качества: MAE = 1.23°C, R<sup>2</sup> = 0.89.
- Сохраненная модель в формате \*.pkl
- Вывод

### Для текущего контроля ТК 3:

#### 1. ТЕСТ

1. Какой протокол передачи данных наиболее часто используется для вертикальной интеграции цифровых двойников с АСУ ТП и обеспечивает стандартизированную информационную модель?

- а) HTTP
- б) OPC UA
- в) FTP
- г) SMTP

2. Какие два протокола являются наиболее распространёнными в архитектуре промышленного Интернета вещей (IIoT) для передачи телеметрических данных от полевых устройств в облачные платформы цифровых двойников?

- а) Modbus RTU
- б) MQTT
- в) AMQP
- г) OPC UA

3. Что такое «теневого режим» (shadow mode) при внедрении цифрового двойника?

- а) Режим, при котором цифровой двойник полностью управляет объектом, а оператор только наблюдает
- б) Режим параллельной работы цифрового двойника с реальным объектом без выдачи управляющих воздействий, с целью верификации модели
- в) Режим ночной работы системы без присутствия персонала
- г) Режим защиты информации от несанкционированного доступа

4. Какой документ является основным техническим свидетельством, удостоверяющим характеристики, границы применимости и порядок эксплуатации цифрового двойника?

- а) Техническое задание

- б) Паспорт цифрового двойника
- в) Договор на разработку
- г) Акт ввода в эксплуатацию

5. Установите соответствие между типом корпоративной системы и её функцией в контуре интеграции с цифровым двойником:

Система	Функция
1) SCADA	А) Управление техническим обслуживанием и ремонтами, учёт наработки, планирование ТОиР
2) EAM	Б) Мониторинг и визуализация технологических параметров, сигнализация, интерфейс оператора
3) ERP	В) Управление жизненным циклом изделия, интеграция конструкторских и технологических данных
4) PLM	Г) Планирование ресурсов предприятия, закупки, финансы, складской учёт

6. Какие разделы обязательно должны присутствовать в паспорте цифрового двойника? (Выберите три)

- а) Назначение и область применения модели
- б) Исходный код модели (полный листинг)
- в) Метрологические характеристики (ведомость погрешностей)
- г) Регламент калибровки и актуализации
- д) Маркетинговый план продвижения

7. Что отражает ведомость погрешностей модели?

- а) Смету затрат на разработку модели
- б) Систематическую и случайную составляющие погрешности, диапазоны адекватности, условия достижения заявленной точности
- в) Перечень датчиков, использованных для валидации
- г) График поверки контроллеров

8. Расположите этапы внедрения цифрового двойника в промышленную эксплуатацию в правильной последовательности:

1. Промышленная эксплуатация
2. Разработка и лабораторные испытания
3. Опытная эксплуатация (пилотный проект)
4. Формирование требований и технического задания

## 5. Интеграционное тестирование на реальном объекте (HIL/SIL)

Правильная последовательность: \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_

9. Какие из перечисленных факторов являются источниками экономического эффекта от внедрения цифровых двойников? (Выберите три)

- а) Сокращение простоев оборудования за счёт предиктивного обслуживания
- б) Удорожание лицензионного программного обеспечения
- в) Оптимизация режимов работы, снижение удельного расхода топлива/энергии
- г) Увеличение численности ремонтного персонала
- д) Сокращение затрат на натурные испытания и физическое прототипирование

10. Как часто требуется проводить калибровку (актуализацию) цифрового двойника?

- а) Никогда, модель статична после разработки
- б) Периодически, в соответствии с регламентом, а также после капитальных ремонтов или модернизации оборудования
- в) Каждый час
- г) Только при смене оператора

11. Какая архитектура интеграции предполагает, что цифровой двойник работает на той же вычислительной платформе, что и система управления, и может напрямую влиять на управляющие сигналы?

- а) Локальный цифровой двойник (edge)
- б) Облачный цифровой двойник (cloud)
- в) Автономный цифровой макет
- г) Бумажный паспорт

12. Что такое «цифровая трансформация» предприятия в контексте АСУ ТП?

- а) Замена бумажных носителей электронными
- б) Переход к управлению жизненным циклом активов на основе цифровых моделей, интеграция данных и процессов на всех стадиях, изменение бизнес-моделей эксплуатации
- в) Покупка нового серверного оборудования
- г) Переименование отдела автоматизации

13. Какие данные передаются от цифрового двойника в ЕАМ-систему? (Выберите два)

- а) Прогнозируемый остаточный ресурс оборудования

- б) 3D-модель оборудования
- в) Рекомендуемая дата и объём ремонтных работ
- г) Исходный код модели

14. Установите соответствие между риском внедрения цифрового двойника и методом его снижения:

Риск	Метод снижения
1) Несоответствие модели реальному объекту после ремонта	А) Теневой режим, поэтапное внедрение, резервирование традиционных систем управления
2) Отказ системы управления при некорректных рекомендациях двойника	Б) Регулярная калибровка, актуализация параметров модели
3) Кибератаки на каналы передачи данных	В) Шифрование трафика, использование VPN, сегментация сетей
4) Неприятие персоналом новых инструментов	Г) Обучение, вовлечение операторов в разработку, демонстрация эффективности

15. Закончите предложение:

«Регламент эксплуатации цифрового двойника должен определять периодичность его \_\_\_\_\_, порядок действий при изменении технологической схемы и ответственность за актуальность модели».

## 2. ОЛР

### Лабораторная работа № 8. Интеграция цифрового двойника.

Контрольные вопросы для защиты:

1. Какие три типа сетей определены в ПНСТ 952-2024 для обмена информацией в структуре цифрового двойника? Опишите назначение каждой .
2. Кто несёт ответственность за достоверность данных, размещаемых в АИС «Цифровой двойник» согласно регламенту г. Москвы?
3. Каковы основные преимущества OPC UA перед более простыми протоколами (например, Modbus TCP)?
4. В чём различие между интерфейсами Model Exchange и Co-Simulation в стандарте FMI? Какой тип используется в данной работе и почему?
5. Какие факторы влияют на величину задержек при передаче данных между компонентами цифрового двойника? Как их можно минимизировать?

6. В чём заключается смысл гибридного прогноза (комитета моделей)? При каких условиях он даёт лучший результат, чем каждая из моделей по отдельности?

7. Что понимается под метаданными в контексте цифровых двойников? Приведите примеры метаданных для переменной «температура подшипника» .

8. Какие меры безопасности необходимо предусмотреть при организации обмена данными между цифровым двойником и реальным оборудованием?

9. Как изменится архитектура интеграции, если необходимо одновременно отслеживать 100 насосных агрегатов, а не один?

10. Какие стандарты регламентируют обмен информацией в структуре цифровых двойников для производственной сферы?

Требования к отчету.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и задачи работы.
2. Схему архитектуры разработанного интегрированного решения с указанием информационных потоков.
3. Описание компонентов:
4. Листинги ключевых программных модулей (интеграционный скрипт, настройки SCADA).
5. Скриншоты работающей системы:
6. Результаты тестирования:
7. Выводы

Полный комплект заданий и материалов, необходимых для оценивания результатов обучения по дисциплине, хранится на кафедре разработчика и содержит *50 тестовых вопросов на каждую компетенцию, из них 20% - закрытого типа, 80% - открытого типа.*

### **Для промежуточной аттестации:**

1. Понятийный аппарат: цифровая модель, цифровая тень, цифровой двойник. Критерии различия, направления потоков данных.
2. Уровни зрелости цифровых двойников (по Gartner, Industrial Internet Consortium). Характеристика каждого уровня.
3. Эволюция систем автоматизации и проектирования: от CAD/CAE к цифровым двойникам.
4. Место цифровых двойников в концепциях Industry 4.0, Индустрия 5.0, PLM (управление жизненным циклом изделия).
5. Системная инженерия на основе моделей (MBSE): принципы, отличие от традиционного подхода.

6. Цели и задачи создания цифровых двойников в промышленности и энергетике (прогнозирование, оптимизация, виртуальные испытания, обучение персонала).
7. Классификация цифровых моделей по степени интеграции с физическим объектом и по решаемым задачам.
8. Параметрическое CAD-моделирование как основа цифрового макета. Принципы параметризации, преимущества.
9. Обзор программных платформ для создания цифровых двойников: MATLAB/Simulink, ANSYS Twin Builder, OpenModelica, AnyLogic, ZuluTest. Критерии выбора.
10. Форматы обмена данными между CAD/CAE-системами (STEP, IGES, Parasolid). Роль нейтральных форматов в интеграции.
11. Промышленные протоколы передачи данных (OPC UA, MQTT, Modbus TCP): назначение, особенности, области применения.
12. Понятие «цифровой макет» (Digital Mock-Up) и его отличие от цифрового двойника.
13. Жизненный цикл цифрового двойника: стадии разработки, эксплуатации и утилизации.
14. Роль IoT (промышленного Интернета вещей) в сборе данных для цифровых двойников.
15. Принципы построения единого информационного пространства на основе цифровых платформ.
16. Физическое (white-box) моделирование: основные законы, области применения, преимущества и недостатки.
17. Эмпирическое (black-box) моделирование на основе данных: этапы построения, методы машинного обучения.
18. Гибридное (grey-box) моделирование: принципы построения, архитектура, примеры реализации.
19. 1D-моделирование систем с сосредоточенными параметрами: инструменты, типовые задачи, связь с 3D-моделями.
20. Моделирование гидравлических, тепловых и механических систем в среде MATLAB/Simulink или OpenModelica.
21. Параметрическая идентификация моделей: постановка задачи, методы оптимизации, критерии сходимости.
22. Регрессионный анализ и нейросетевые модели для прогнозирования параметров оборудования.
23. Оценка точности регрессионных моделей: метрики MAE, RMSE, MAPE,  $R^2$ . Интерпретация результатов.
24. Верификация модели: определение, методы, отличие от валидации.
25. Валидация модели: определение, процедуры, сопоставление с эталонными данными.

26. Переобучение (overfitting) моделей машинного обучения: причины, признаки, методы предотвращения (кросс-валидация, регуляризация).
27. Кросс-валидация: схемы (k-fold, leave-one-out), назначение, правила применения.
28. Тестирование моделей на устойчивость (стресс-тестирование): зашумление сигналов, пропуски данных, экстремальные режимы.
29. Методы обработки сигналов и выделения признаков для диагностики оборудования (спектральный анализ, вейвлет-преобразование).
30. Прогнозирование остаточного ресурса (RUL): подходы на основе физики отказа и на основе данных.
31. Имитационное моделирование (дискретно-событийное, системная динамика, агентное) и его роль в цифровых двойниках.
32. Метод Монте-Карло: сущность, применение для оценки надёжности и анализа рисков.
33. Hardware-in-the-Loop (HIL) и Software-in-the-Loop (SIL) тестирование: назначение, различия, реализация.
34. Архитектура интеграции цифрового двойника в АСУ ТП: уровни, компоненты, потоки данных.
35. Интеграция цифрового двойника со SCADA-системами: визуализация прогнозов, сигнализация, советчик оператора.
36. OPC UA: архитектура клиент-сервер, информационные модели, роль в интеграции цифровых двойников.
37. MQTT: протокол асинхронного обмена, применение в распределённых системах и IoT.
38. Интеграция цифровых двойников с EAM и ERP-системами: цели, обмен данными, сквозное управление жизненным циклом.
39. «Теневой режим» (shadow mode) при внедрении цифрового двойника: цель, организация, оценка результатов.
40. Паспорт цифрового двойника: структура, обязательные разделы, назначение.
41. Ведомость погрешностей модели: содержание, методика расчёта, оформление.
42. Эксплуатационная документация на цифровой двойник: состав, требования к разработке.
43. Регламент технического обслуживания и калибровки цифрового двойника: периодичность, процедуры, ответственные.
44. Управление версиями и конфигурациями модели на протяжении жизненного цикла.
45. Методики оценки экономической эффективности внедрения цифровых двойников: сокращение простоев, оптимизация ТОиР, снижение затрат на натурные испытания.

46. Риски внедрения цифровых двойников в критическую инфраструктуру: технические, организационные, кибербезопасность.

47. Организация проекта по созданию цифрового двойника: этапы, роли участников, взаимодействие служб автоматизации, диагностики и эксплуатации.

48. Особенности внедрения цифровых двойников на действующих объектах (brownfield): проблемы и решения.

49. Цифровая трансформация предприятия: понятие, этапы, роль цифровых двойников в изменении бизнес-процессов.

50. Тенденции развития технологий цифровых двойников: интеграция с искусственным интеллектом, облачные платформы, цифровые платформы управления активами.