

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»
(СПбГУПТД)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ВШТЭ



Рабочая программа дисциплины

Б1.В.10	Разработка и применение цифровых двойников (Digital Twins) для АСУТП
----------------	--

Учебный план: ФГОС3++m150404ПИСС-1_26-12.plx

Кафедра: 32 Автоматизации технологических процессов и производств

Направление подготовки:
(специальность) 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Профиль подготовки:
(специализация) Прикладные информационные системы в сфере автоматизированных систем управления технологическими процессами

Уровень образования: магистратура

Форма обучения: очная

План учебного процесса

Семестр (курс для ЗАО)		Контактная работа обучающихся		Сам. работа	Контроль, час.	Трудоёмкость, ЗЕТ	Форма промежуточной аттестации
		Лекции	Лаб. занятия				
4	УП	36	36	72	36	5	Экзамен
	РПД	36	36	72	36	5	
Итого	УП	36	36	72	36	5	
	РПД	36	36	72	36	5	

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств, утверждённым приказом Минобрнауки России от 25.11.2020 г. № 1452

Составитель (и):

старший преподаватель

Игнатьева
Юрьевна

Татьяна

От кафедры составителя:

Заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств

Ковалев Д.А.

От выпускающей кафедры:

Заведующий кафедрой

Ковалев Д.А.

Методический отдел:

Фахретдинова А. Р.

1 ВВЕДЕНИЕ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1 Цель дисциплины: Формирование системных компетенций в области архитектуры, разработки и практического применения цифровых двойников технологических объектов для повышения эффективности проектирования, отладки и эксплуатации АСУТП.

1.2 Задачи дисциплины:

1. Изучить современные форматы обмена данными и протоколы интеграции цифровых двойников в корпоративную среду.

2. Освоить методы имитационного моделирования для проверки гипотез и концепций управления.

3. Сформировать навыки документирования моделей и валидации результатов моделирования.

1.3 Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Предварительная подготовка предполагает создание основы для формирования компетенций, указанных в п. 2, при изучении дисциплин:

2 КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

ПК-5: Способен формировать комплект проектной документации для организации автоматизированного участка или линии
Знать: форматы обмена данными при интеграции цифровых двойников
Уметь: оформлять документацию на модели
Владеть: навыками документирования результатов моделирования
ПК-1: Способен разрабатывать концепции и технического задания на проектирование автоматизированной системы управления технологическими процессами
Знать: возможности цифровых двойников для проверки концепций управления
Уметь: использовать цифровые двойники для обоснования решений
Владеть: методами валидации концепции через имитационное моделирование

3 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование и содержание разделов, тем и учебных занятий	Семестр (курс для ЗАО)	Контактная работа		СР (часы)	Форма текущего контроля
		Лек. (часы)	Лаб. (часы)		
Раздел 1. Основы цифровых двойников и форматы обмена данными	4				О
Тема 1. Введение в цифровые двойники (DT) в АСУТП. Определение DT, уровни зрелости (Prototype, Instance, Aggregate), роль в жизненном цикле промышленного объекта.		2	2	4	
Тема 2. Архитектурные решения промышленных DT. Соотношение с уровнями ISA-95, использование Edge и Cloud, брокеры сообщений.		2	2	4	
Тема 3. Протоколы и форматы обмена данными (OPC UA, MQTT). Сравнение OPC UA и MQTT. Sparkplug B, их роль в интеграции модели и SCADA.		2	2	4	
Тема 4. Форматы сериализации и семантического описания (JSON, XML, AutomationML). Применение JSON/XML для потоков данных и AutomationML для описания структуры оборудования.		2	2	4	
Раздел 2. Имитационное моделирование, калибровка и валидация					О
Тема 5. Математическое ядро гибридных моделей. Сочетание дифференциальных уравнений (физика) и нейросетевых корректоров для повышения точности.		2	2	4	
Тема 6. Методы калибровки параметров модели. Использование градиентных и эволюционных алгоритмов (генетических) для подгонки коэффициентов.		2	2	4	
Тема 7. Статистические критерии валидации. Расчёт и интерпретация метрик точности, их пороговые значения для АСУТП.		2	2	4	

Тема 8. Графические методы и анализ остатков Сравнение кривых, графики «расчёт–эксперимент», автокорреляция остатков для выявления систематических ошибок.		2	2	4	
Раздел 3. Проверка концепций управления и сценарный анализ					
Тема 9. SIL, PIL и HIL-тестирование: этапы и отличия Описание методологий проверки алгоритмов без реального объекта (SIL) и с контроллером (HIL).		2	2	4	
Тема 10. Сценарный анализ «What-if» и его применение Проведение виртуальных экспериментов для оценки влияния возмущений и изменения параметров.		2	2	4	О
Тема 11. Сравнение ПИД, каскадного и нечёткого регуляторов на ДТ Построение критериев качества и выбор оптимальной стратегии для типовых объектов.		2	2	4	
Тема 12. Моделирование аварийных и переходных режимов Имитация отказов датчиков и исполнительных механизмов, резких изменений нагрузки.		2	2	4	
Раздел 4. Документирование и обоснование решений на основе ДТ					
Тема 13. Стандарты оформления документации на модели Требования к паспорту ДТ, руководству оператора, протоколам испытаний.		2	2	4	О
Тема 14. Структура и содержание «Паспорта цифрового двойника» Перечень обязательных разделов: назначение, область применения, входы/выходы, результаты валидации.		2	2	4	
Тема 15. Оформление протоколов валидации и сценарных экспериментов Правила представления таблиц, графиков, статистических выводов и заключений о пригодности модели.		2	2	4	
Раздел 5. Интеграция, экономика и защита проекта					
Тема 16. Интеграция ДТ с MES и ERP через OPC UA и B2MML Обмен данными о производственных заказах, оперативных планах и материальных потоках.		2	2	4	О

Тема 17. Техничко-экономическое обоснование (ТЭО) на базе DT Расчёт экономического эффекта от модернизации управления (снижение брака, энергозатрат, аварий).		2	2	4	
Тема 18. Кибербезопасность цифровых двойников и тренды развития Защита каналов передачи, использование искусственного интеллекта для самонастройки моделей.		2	2	4	
Итого в семестре (на курсе для ЗАО)		36	36	72	
Консультации и промежуточная аттестация (Экзамен)		2,5		33,5	
Всего контактная работа и СР по дисциплине		74,5		105,5	

4 КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Курсовое проектирование учебным планом не предусмотрено

5 БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ

Использование балльно-рейтинговой системы не предусмотрено.

6. ОПИСАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, КРИТЕРИЕВ, СИСТЕМЫ И СРЕДСТВ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

6.1 Показатели оценивания

Код компетенции	Показатели оценивания результатов обучения
ПК-1	Способен применять знание возможностей цифровых двойников для проверки концепций управления с целью их использования для обоснования проектных решений, владеет методами валидации концепции через имитационное моделирование.
ПК-5	Способен применять знание форматов обмена данными при интеграции цифровых двойников для оформления документации на модели, владеет навыками документирования результатов моделирования.

6.2 Система и критерии оценивания

Шкала оценивания	Критерии оценивания сформированности компетенций	
	Устное собеседование	Письменная работа
5 (отлично)	Обучающийся показывает всестороннее и глубокое знание основных документов, свободно ориентируется в основных понятиях, терминах и определениях при ответе; усвоил основную и знаком с дополнительной литературой; может объяснить взаимосвязь основных терминов и их значение для последующей профессиональной деятельности; проявляет творческие способности и широкую эрудицию в использовании учебного материала. Получил правильный ответ на практическое задание и может его интерпретировать.	
4 (хорошо)	Обучающийся показывает достаточный уровень знаний основных документов, ориентируется в основных понятиях и определениях; усвоил основную литературу; допускает незначительные погрешности при ответах на вопросы экзаменационного билета и	

	дополнительные вопросы преподавателя. Получил правильный ответ на практическое задание, но испытывает затруднения с его интерпретацией.	
3 (удовлетворительно)	Обучающийся показывает знания учебного материала в минимальном объеме; может сформулировать понятия и определения, но при этом, допуская большое количество непринципиальных ошибок; знаком с основной литературой; допускает существенные ошибки в ответе на экзамене, но может устранить их под руководством преподавателя. Обучающийся вникает в смысл условия практического задания, понимает план его решения, однако, не может в полной мере реализовать ее решение.	
2 (неудовлетворительно)	Обучающийся не имеет достаточного уровня знания дисциплины; не может сформулировать основные понятия и термины; плохо ориентируется в основных понятиях и определениях; плохо знаком с основной литературой; допускает при ответе на экзамене существенные ошибки и не может устранить их даже под руководством преподавателя. Попытка списывания, использования неразрешенных технических устройств или пользование подсказкой другого человека. Не правильное решение практического задания, представление чужой работы, отказ от выполнения задания.	

6.3 Типовые контрольные задания и/или иные материалы, используемые для оценки результатов обучения

6.3.1 Типовые контрольные вопросы

№ п/п	Формулировки вопросов
Семестр 4	
1	Опишите роль OPC UA в построении цифрового двойника. Какие информационные модели наиболее актуальны для ЦБП и теплоэнергетики?
2	Сравните форматы JSON, XML и Protobuf с точки зрения производительности и удобства для потоковой передачи данных от SCADA к модели. В каких случаях предпочтителен каждый из них?
3	Что такое AutomationML (AML)? Как он используется для описания технологической топологии и связей между оборудованием? Приведите пример для узла теплообменника
4	Как организовать двунаправленный обмен данными между цифровым двойником и MES/ERP системами? Какие стандарты (B2MML, OPC UA) здесь задействованы?
5	Объясните различия между геометрическими форматами (STEP, IGES, JT) и поведенческими моделями. Почему для АСУТП важнее именно поведенческое описание?
6	В чём суть SIL-тестирования? Опишите, как с помощью цифрового двойника проверить новый алгоритм управления перед его внедрением на реальном объекте (на примере котла или варочного котла).
7	Что такое HIL-тестирование и чем оно отличается от SIL? Когда его применение обязательно?
8	Как цифровой двойник позволяет моделировать аварийные ситуации (обрыв датчика, отказ исполнительного механизма)? Приведите пример для содорегенерационного котла.
9	Опишите методологию сценарного анализа «What-if» для оценки влияния изменения качества сырья (например, влажности щепы) на работу ТЭЦ.
10	Каким образом DT помогает проверять гипотезы о модернизации (замена регулятора, установка дополнительного датчика) без остановки производства?
11	Назовите основные разделы «Паспорта цифрового двойника» согласно ГОСТ Р 57700.37-2023. Какие данные о модели должны быть в нём обязательно отражены?

12	Как правильно оформить «Протокол валидации»? Какие таблицы и графики должны в нём присутствовать для подтверждения адекватности модели?
13	Опишите структуру «Руководства оператора по работе с цифровым двойником». Какие сценарии использования должны быть описаны?
14	Какие требования ЕСКД (ГОСТ 2.105, 2.106) предъявляются к текстовым документам, содержащим математические выкладки и алгоритмы?
15	Как документируется процесс калибровки модели: какие исходные данные, методы и результаты должны фиксироваться?
16	Приведите пример технико-экономического обоснования (ТЭО) для внедрения цифрового двойника на теплоэлектроцентрали. Какие статьи затрат и эффектов вы учтёте?
17	Как с помощью ДТ доказать целесообразность перехода с ПИД-регулятора на прогнозирующий MPC для управления сушильной частью БДМ? Какие критерии качества (время регулирования, перерегулирование, энергопотребление) вы используете?
18	Опишите, как цифровой двойник помогает обосновать выбор оптимального режима работы парового котла (температура, избыток воздуха) для снижения выбросов NOx.
19	Как результаты сценарного моделирования используются для пересмотра регламентов эксплуатации оборудования (периодичность обслуживания, допустимые отклонения параметров)?
20	Предложите алгоритм обоснования замены дорогостоящего расходомера на виртуальный сенсор, построенный на основе ДТ.
21	Перечислите статистические критерии для количественной оценки точности модели (RMSE, MAPE, коэффициент детерминации). Как интерпретировать их значения?
22	Опишите графические методы валидации: сравнение кривых, анализ остатков, кросс-корреляция. Для какого типа данных они наиболее информативны?
23	Как проводится калибровка параметров модели с использованием генетического алгоритма? В каких случаях этот метод предпочтительнее градиентных методов?
24	Что такое переобучение модели и как его избежать при валидации на ограниченном наборе данных? Опишите процедуру кросс-валидации.
25	Как оценить адекватность модели для дискретных событий? Какие метрики здесь применимы?

6.3.2 Типовые тестовые задания

Не предусмотрено.

6.3.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

1. Валидация модели котла-утилизатора.
2. Разработка структуры паспорта цифрового двойника.
3. Документирование результатов калибровки.

6.4 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов обучения

6.4.1 Условия допуска обучающегося к промежуточной аттестации и порядок ликвидации академической задолженности

Проведение промежуточной аттестации регламентировано локальным нормативным актом СПбГУПТД «Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся»

6.4.2 Форма проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Устная ☐ + Письменная ☐ Компьютерное тестирование ☐ Иная ☐

6.4.3 Особенности проведения промежуточной аттестации по дисциплине

- Время на подготовку ответа на экзамене - 30 минут;
- Возможность пользоваться справочными материалами, калькулятором.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1 Учебная литература

Автор	Заглавие	Издательство	Год издания	Ссылка
7.1.1 Основная учебная литература				
Нерсисянц, А. А.	Имитационное моделирование инфокоммуникационных сетей и устройств	Москва: Ай Пи Ар Медиа	2022	https://www.iprbooks.hop.ru/122222.html
Ефромеева, Е. В., Ефромеев, Н. М.	Имитационное моделирование: основы практического применения в среде AnyLogic	Саратов: Вузовское образование	2020	http://www.iprbookshop.ru/86701.html

Бурьков, Д. В., Волощенко, Ю. П.	Математическое имитационное моделирование электротехнических и робототехнических систем	Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета	2020	http://www.iprbookshop.ru/107953.html
7.1.2 Дополнительная учебная литература				
Пименов В. И.	Имитационное моделирование	Санкт-Петербург: СПбГУПТД	2021	http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=202101

7.2 Перечень профессиональных баз данных и информационно-справочных систем

1. Электронная библиотека СПб ГУПТД - <http://www.iprbookshop.ru>.
2. Электронная библиотека ВШТЭ СПб ГУПТД - http://nizrp.narod.ru/ebmu_m.htm.

7.3 Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

MicrosoftWindows 8
MicrosoftOfficeProfessional 2013
MasterSCADA

7.4 Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Аудитория	Оснащение
Компьютерный класс	Мультимедийное оборудование, компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду
Лекционная аудитория	Мультимедийное оборудование, специализированная мебель, доска