

Фабрики обучения для промышленности и транспорта в эпоху цифровых близнецов

О.Н.Покусаев, В.П.Куприяновский, А.В.Корзун, А.А.Климов, М.Г.Жабицкий, Д.Е.Намиот, А.В.Семочкин

Аннотация— Образовательные программы в системах высшего образования должны быть более гибкими и адаптироваться к развивающимся навыкам и потребностям в обучении инженерных отраслей. Изменения потребностей в профессиональных навыках все чаще требуются в связи с продолжающейся цифровизацией промышленности, а также с ростом внедрения новых технологий. Учебные программы в высших учебных заведениях необходимо адаптировать к эпохе цифровых технологий, например, путем обеспечения того, чтобы выпускники инженерных специальностей понимали ценность больших данных, эффективность работы, получаемую за счет роботизации и автоматизации и т.д. Предоставление инженерных курсов в вузах должно стать более адаптируемым для включения цифровых технологий. Системы профессионального образования и обучения должны быть адаптированы для удовлетворения быстро меняющегося характера потребностей в профессиональных навыках в машиностроительных отраслях в целом и в инженерных фирмах, ориентированных на производство, в частности. Дигитализация и цифровые навыки должны быть основными характеристиками программ обучения инженеров. Кажущийся простым образовательный процесс, веками состоявший из чтения лекций, семинаров попал в ситуацию необходимости новых решений не только в части лекций, но и в том, как организовывать проведение практических семинаров, а также подготовку выпускных работ и магистерских диссертаций.

Ключевые слова—образование, цифровые близнецы.

I. ВВЕДЕНИЕ

По мере того, как обрабатывающая промышленность движется к более цифровому, интеллектуальному и гибкому сценарию, изменения, необходимые для достижения ожиданий от структуры Индустрии 4.0 (I4.0), многочисленны и обширны, включая, в том числе, и использование продукции I4.0 в транспортно-логистической сфере. Тем не менее, общее отсутствие понимания того, как новые технологии могут быть

интегрированы и должны быть реализованы, ограничивает скорость принятия таких изменений и связанных с ними положительных воздействий. Это состояние теперь напрямую влияет на образовательную сферу, находившуюся в относительно стабильном состоянии много десятилетий, но сегодня также ставшей частью трансформаций.

В общеевропейском исследовании [1], поименованном как «Рекомендации, касающиеся образования, развития навыков и потребностей в обучении в инженерных секторах» отмечено, что их исследование [1] показало, что машиностроительная отрасль быстро меняется, что обусловлено цифровизацией и, в частности, более широким использованием новых технологий. Новые навыки, связанные с цифровизацией, необходимо будет внедрить во все инженерные отрасли ЕС на уровне рабочей силы. Цифровизация также меняет характер необходимых личных и социальных навыков. Рекомендации [1] таковы:

1. Необходимо развивать цифровые и технологические навыки высшего уровня среди выпускников инженерных специальностей / аспирантов и среди инженеров, например, в области искусственного интеллекта и машинного обучения, цифровизации (автоматизация, роботизация) и науки о данных, чтобы укрепить большие данные, возможности аналитики и использование новых технологий.

В условиях перехода к умным фабрикам и центрам цифрового производства будет возрастать спрос на профессиональные навыки в машиностроительных отраслях ЕС[1]. Например:

- Ожидается, что в ближайшее десятилетие спрос на специалистов по ИИ и машинному обучению будет значительным.

- Потребуется значительно больше специалистов по данным для анализа больших данных, генерируемых центрами цифрового производства, и более широкого использования технологий, связанных с Индустрией 4.0.

2. Образовательные программы в системах высшего образования должны быть более гибкими и адаптироваться к развивающимся навыкам и потребностям в обучении инженерных отраслей ЕС [1].

Изменения потребностей в профессиональных навыках все чаще требуются в связи с продолжающейся цифровизацией промышленности ЕС, а также с ростом внедрения новых технологий. Учебные программы в высших учебных заведениях (ВУЗах) необходимо

Статья получена 30 ноября 2020.

О.Н.Покусаев – РУТ (МИИТ) (email: o.pokusaev@rut.digital)

В.П.Куприяновский - РУТ (МИИТ) (email: vpkupriyanovskiy@gmail.com)

А.В.Корзун - Агентство промышленного развития Москвы (email: KorzunAV@develop.mos.ru)

А.А.Климов - РУТ (МИИТ) (email: aaklimov1961@gmail.com)

М.Г.Жабицкий - Высшая инженерная школа НИЯУ МИФ (email: jabitsky@mail.ru) Д.Е. Намиот - МГУ имени М.В. Ломоносова; РУТ (МИИТ) (e-mail: dnamiot@gmail.com)

А.В.Семочкин – РУТ (РОАТ) (email: a.semochkin@rut.digital)

адаптировать к эпохе цифровых технологий, например, путем обеспечения того, чтобы выпускники инженерных специальностей понимали ценность больших данных, эффективность работы, получаемую за счет роботизации и автоматизации, а также переход к центрам цифрового производства и т.д. Предоставление инженерных курсов в вузах должно стать более адаптируемым для включения цифровых технологий. Потребуется больше курсов в новых и появляющихся областях, таких как искусственный интеллект, робототехника и анализ больших данных, чтобы отразить потребности промышленности [1].

3. Системы профессионального образования и обучения должны быть адаптированы для удовлетворения быстро меняющегося характера потребностей в профессиональных навыках в машиностроительных отраслях ЕС в целом и в инженерных фирмах, ориентированных на производство, в частности.

Дигитализация и цифровые навыки должны быть основными характеристиками программ обучения инженеров. Схемы инженерного обучения, подобные тем, которые распространены в Германии, могли бы получить более широкое развитие в других странах Европы, и могли бы сделать значительный упор на цифровые навыки [1].

Думается, что все сказанное выше вполне справедливо и для российского инженерного образования. Кажущийся простым образовательный процесс веками состоявший из чтения лекций, семинаров, магистерских и дипломных работ попал в ситуацию необходимости новых решений не только в части лекций, но и в том, что стало затруднено проведение практических семинаров, и особенно сложными стали подготовка дипломов и магистерских работ.

В докторской диссертации «Профессиональная квалификация в «Индустрии 4.0» - построение модели компетенций и учебной программы, основанной на компетенциях» [2], защищенной в одном из лучших технических университетов Европы и мира Мюнхенском техническом университет по этому поводу сказано следующее:

«Интенсивные технологические разработки последних лет, такие как датчики, киберфизические системы, интеллектуальные сети или автоматизация, поднимают новую парадигму цифровой трансформации в сторону Индустрии 4.0. Индустрия 4.0 включает преобразование работы и производства с помощью автономных систем реального времени, которые позволяют создавать персонализированные, взаимосвязанные и интеллектуальные продукты, а также услуги. Компании вынуждены адаптировать свои ноу-хау и организационные структуры к этому изменению, чтобы добиться успеха на рынке. Среди множества проблем, которые возникают перед компаниями в этой парадигме, одна из наиболее важных - это квалификация сотрудников с необходимыми компетенциями для успешной работы в трансформированной рабочей среде.

Эту образовательную задачу следует в первую очередь решать в системе высшего образования, чтобы подготовить студентов как будущих сотрудников с компетенциями для Индустрии 4.0».

Из множества возможных тем, в этой плоскости, для обсуждения мы выбрали тему фабрик обучения, реализация которых показала уже свою эффективность, но практически не известна в России. Для удобства читателя мы приводим российские публикации близкие к рассматриваемой в одном перечне [3-27], снабдив каждую интернет адресом, по которому их можно получить. Также и все остальные источники снабжены такими ссылками.

II. ФАБРИКИ ОБУЧЕНИЯ – ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ

Термин «фабрика обучения» состоит из двух слов. Слово «обучение» указывает на развитие компетенций, а слово «фабрика» определяет реалистичную производственную среду [28]. Общепринятое определение было согласовано в CWG CIRP и опубликовано в энциклопедии CIRP: [28] Согласно Международной академии производственной инженерии (CIRP), фабрика обучения определяется как:

- процессы, которые являются аутентичными, включают несколько станций и включают как технические, так и организационные аспекты,
- изменяемая настройка напоминает реальную цепочку создания стоимости,
- производимый физический продукт, и
- как дидактическая концепция, которая включает формальное, инфорнальное и неформальное обучение, основанное на собственных действиях обучаемых при подходе к обучению на месте.

В зависимости от цели фабрики обучения обучение осуществляется посредством преподавания, обучения и / или исследований. Следовательно, результатами обучения могут быть развитие компетенций и / или инновации. Желательна операционная модель, обеспечивающая устойчивую работу обучающейся фабрики [28].

Разница между фабриками обучения и фабриками моделей состоит в том, что фабрики обучения предоставляют дидактическую концепцию и операционную модель для обучения.

Термин «фабрика обучения» впервые появился в США в 1994 году, когда Национальный научный фонд (NSF) наградил консорциум Пенсильванского государственного университета. Промышленные дизайнерские проекты были поддержаны на предприятии площадью 2000 м² с использованием машин, инструментов и материалов. Выяснилось, что реальные проблемы отрасли можно решить в реальных условиях [28]. В Европе за последнее десятилетие было создано все больше и больше учебных заведений использующих фабрики обучения. Одним из первых учебных заведений в этой волне является «Центр

промышленной производительности», основанный Институтом управления производством, технологиями и станками (Technische Universität Darmstadt), созданным в 2007 году [28]. В 2011 году в г. Дармштадте (Германия) была учреждена Инициатива «Европейские фабрики обучения» [28]. Инициатива привела к европейскому сотрудничеству в области изучения этих фабрик. В 2017 году в инициативу было решено включить учебные фабрики со всех континентов, и она была переименована в «Международную ассоциацию фабрик обучения» (International Association of Learning Factories [29]).

Международная ассоциация фабрик обучения (IALF) - это группа исследовательских институтов, управляющих фабриками обучения [29].

IALF нацелена на развитие сотрудничества между своими членами для достижения передового опыта в обучении и исследованиях в области машиностроения посредством обучения на этих фабриках. Поэтому участники стремятся [29]:

- Наладить обмен знаниями и передовым опытом,
- Воплотить синергизм в физическом создании учебных заведений, и
- Завоевать лидерство за счет инновационных усовершенствований.

Мы взяли второе определение «фабрики обучения» из [29], для того чтобы у читателя была возможность выбрать для себя лучшее:

«Учебная фабрика - это среда обучения, в которой процессы и технологии основаны на реальной промышленной площадке, что позволяет напрямую подойти к процессу создания продукта. Учебные фабрики основаны на дидактической концепции, в которой упор делается на экспериментальное и проблемное обучение. Философии непрерывного улучшения способствуют собственные действия и интерактивное участие участников» [29].

Кроме того на рисунке 1 мы приводим измерения фабрики обучения и ее свойства

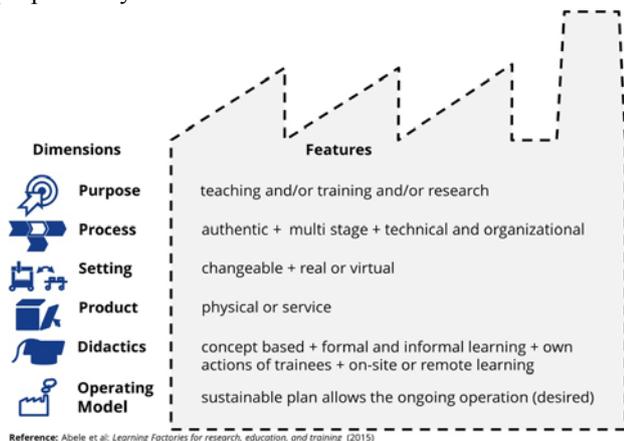


Рис. 1. Измерения фабрики обучения и ее свойства [29]

С 2017 года IALF каждый год проводит под своей эгидой уже традиционные конференции по тематике фабрик обучения. В 2020 году состоялась уже десятая конференция [29], ее труды опубликованы [30], и далее

мы постараемся познакомить читателя с некоторыми из этих публикаций.

Далее мы решили привести примеры существующих фабрик обучения [28], начиная с фабрик обучения в академических кругах.

Технический университет Дармштадт: Process Learning Factory CiP

Process Learning Factory CiP Технического университета Дармштадта фокусируется на развитии компетенций для бережливого производства и Индустрии 4.0. Она была основана в 2007 году. Поставка сырья, обработка, контроль качества, сборка, упаковка и косвенные процессы моделируются аналогично малому и среднему предприятию. Помимо восьми вариантов пневмоцилиндра, индивидуальные требования клиентов к различным размерам реализуются в области минимальной обработки. На площади около 500 м² учащиеся применяют методы бережливого производства и решают проблемы на собственном опыте. Фабрика обучения может отображать различные сценарии от расточительной и несбалансированной производственной среды до бережливого и цифрового состояния. 15 различных учебных модулей состоят из основ бережливого производства, основных элементов бережливого производства и бережливого мышления. В рамках учебного модуля практический опыт чередуется с теоретическим обучением. Process Learning Factory CiP является частью центра компетенций МСП в регионе Рейн-Майн, финансируемого Федеральным министерством экономики и энергетики Германии. С внедрением новых технологий Industrie 4.0 концепция бережливого производства расширяется. Реализованы разные технологии, например прослеживаемость продукции, помощь работникам, цифровое управление цехами, профилактическое обслуживание и AGV. С каждой внедренной технологией интегрированы новые темы для учебных модулей. Кроме того, операционный институт создал множество учебных заведений для академических кругов и промышленности по всему миру [28].

Technische Universität Wien: экспериментальная фабрика обучения

В TU Wien Pilot Factory фокусируется на Industrie 4.0. Его фабрика обучения это реалистичная тестовая среда с реальными машинами, реальными производственными цепочками и реальным продуктом. На площади 900 м² производится 3D-принтер, использующий принцип моделирования наплавкой. Размеры принтера могут быть изменены в соответствии с требованиями заказчика. Интегрированы различные концепции Industrie 4.0, например адаптивность процессов и макетов, высокая степень взаимодействия человека с машиной и использование аналитики данных для прозрачности и оптимизации. Транспорт AGV связывает производство с участком сборки. Материал пополняется автоматически. Кроме того, операторам помогают

совместные роботы (коботы), системы помощи, сенсорные технологии и обработка изображений [28].

Стелленбосский университет: Фабрика обучения Стелленбоша

Учебная фабрика Стелленбошского университета Стелленбоша проводит тренинги по бережливым операциям, эргономике и является исследовательской платформой для Индустрии 4.0. Целевые группы - отраслевые партнеры и студенты промышленных инженеров. Новые разработки включают в себя двойную степень M.Sc. по программе с Ройтлингенским университетом. Немецкие студенты имеют возможность посетить летнюю школу. В обучающей фабрике интегрированы RFID-система отслеживания, контроля и визуализация KPI в реальном времени. Продукт Стелленбошского университета - это набор поездов железной дороги в масштабе O [28].

Виндзорский университет: iFactory

iFactory Виндзорского университета имеет основные темы интегрированного продукта - системное обучение и Industrie 4.0. Монтажные комплекты и натяжители автомобильных ремней занимают 200 кв. м. Отслеживание процессов, а также планирование и планирование производственных операций возможно с помощью RFID-меток. Вся система имеет модульную структуру и может быть реконфигурируема с помощью оборудования FESTO Didactic. Основная цель фабрики обучения - исследования, обучение и демонстрация для студентов и промышленности. Фабрика обучения была создана в 2011 году и является первой в своем роде в Северной Америке [28].

Люксембургский университет: лаборатория повышения квалификации

Лаборатория операционного совершенства Люксембургского университета - это место, где промышленные партнеры могут получить практический опыт работы с инструментами бережливого производства и продемонстрировать новые технологии, связанные с Индустрией 4.0. Примерами новых технологий являются интеграция RFID, дополненной реальности и цифровых руководств. Кроме того, на этой фабрике обучаются магистры инженерного дела. Фабрика обучения университета - это платформа для модернизации новых технологических функций с целью разработки, анализа и проверки их применимости на линиях сборки или разборки [28].

Technische Universität München: Фабрика обучения для бережливого производства (LSP)

Фабрика обучения бережливому производству (LSP) в TU München специализируется на бережливом производстве. Выпускаемая продукция представляет собой настоящую коробку передач в 24 вариантах. Помещение состоит из сборочного цеха, цеха кайдзен и теоретического учебного помещения. Отображены процессы логистики, сборки, контроля качества и

упаковки. Во время курса воссоздается типичное «бережливое» путешествие: от неудовлетворительной ситуации к скудному состоянию. Теория преподается на уроках теории. Каждый год предлагается от четырех до шести тренингов. Мобильное оборудование можно транспортировать в любое место [28].

Рурский университет Бохума: Фабрика обучения LPS

Основными темами LPS Learning Factory являются бережливое производство, Industrie 4.0 и эффективность использования ресурсов. Он был основан в 2009 году Рурским университетом Бохума. Пробки для бутылок, держатели для бутылок и различные изделия под заказ производятся на площади 1800 м². Производственная среда включает в себя различные станки, грузовые транспортные средства, станции ручной сборки и различных промышленных роботов. Основные темы - бережливое производство, Industrie 4.0 и ресурсоэффективность. Ежегодно 900 студентов выполняют здесь упражнения. Производятся реальные продукты, которые закупаются для промышленности. Кроме того, на фабрике обучения реализуются многочисленные исследовательские проекты, например, Модель зрелости Industrie 4.0, системы помощи и обучения, киберфизические производственные системы и промышленная робототехника. С 2018 года обучающая фабрика является частью центра компетенции SME 4.0 Siegen. [28].

Обучающие фабрики в промышленности: MPS Lernplattform

С 2011 года MPS Lernplattform Daimler AG производит различную продукцию на площади 3000 м², основной темой которой является бережливое производство. Используются оригинальные компоненты производства, а также модели 1:10 с несколькими имитациями. Смоделированы прессовый цех, кузовной цех, окрасочный цех, сборка и логистика как части автомобильной промышленности. Собранные изделия можно использовать повторно после обучения: например, блоки управления на крыше, солнцезащитные козырьки, чехлы, коврики или разрывы помещения. Обучение проводят квалифицированные штатные сотрудники, имеющие дидактические знания, а также многолетний опыт работы на производстве. Обучение состоит из 20% теории и 80% практики. Для участников, которые вносят важные идеи в свою повседневную работу, предлагается более десяти различных учебных модулей. MPS Lernplattform все больше полагается на сотрудничество с внешними партнерами, такими как Технический университет Дармштадта [28].

Фабрика обучения Festo в Шарнхаузене

Фабрика обучения Festo в Шарнхаузене находится под управлением Festo AG с 2014 года по четырем различным направлениям: механическая обработка, сборка клапана и пневмоострова, автоматизация и совершенствование процессов, администрирование

фабрики обучения. Пневматические клапаны и оборудование [28]. пневмоострова производятся на 220 м² в четырех помещениях. Предлагается более сорока учебных модулей на четырнадцать различных рабочих местах. Участники исключительно из Festo, особенно для обучения новых операторов и повышения квалификации действующих рабочих. Каждый руководитель группы или квалифицированный специалист команды самостоятельно обучает операторов. Поэтому были разработаны модули «Обучение преподавателей». Тренинги постоянно развиваются. Интегрируются новые продукты, новые процессы, новое производственное

Таблица 1: Примеры фабрик обучения в академических и промышленных кругах [28]

Фабрики обучения				
Name	Operator	Country	Product	Main Topics
Process Learning Factory CiP	Technical University Darmstadt	Germany	Pneumatic cylinder	Lean production and Industrie 4.0
DFA Demonstration Factory	RWTH Aachen	Germany	E-Mobility vehicles	Industrie 4.0, prototypes and industrialization
Die Lernfabrik	TU Braunschweig	Germany	Diverse	Sustainable production, CPPS, urban production
E Drive-Center	Friedrich-Alexander-University Erlangen Nürnberg	Germany	Electric engines	Production technology
ESB Logistics Learning Factory	ESB Business School Reutlingen	Germany	City scooter & accessories	Design, implementation, optimization, and digitization of partially automated assembly and logistics systems
ETA-Factory	PTW, TU Darmstadt	Germany	Control Plate for hydraulic pump, Gear-shaft combination	Energy efficiency, energy flexibility
Festo Learning Factory Scharnhausen	Festo AG	Germany	Pneumatic valves and valve terminals	Workplace-oriented trainings, Industry 4.0, and lean production
iFactory	University of Windsor	Canada	Desksets, belt tensioner	Integrated products – systems learning, Industry 4.0
IFA-Learning Factory	Leibnitz Universität Hannover	Germany	Helicopter and components	Factory planning, lean production, PPC
Integrated Learning Factory	Ruhr-University Bochum	Germany	Percussion drilling machine	Collaboration of product development and production

LEAN-Factory	Fraunhofer IPK, TU Berlin, ITCL GmbH	Germany	Pharmaceutical tablets	Lean management
Learning- and Innovation Factory (LIF)	TU Wien	Austria	Slot car	Integrated product & process planning, optimization of manufacturing and assembly operations
Learning factory aIE	University of Stuttgart	Germany	Desk tool set	Lean production and quality management
Learning Factory Global Production Karlsruhe	Karlsruhe Institute of technology	Germany	Electric drive	Lean production, assembly planning, Industrie 4.0
Lernfabrik für Schlanke Production (LSP)	TU München	Germany	Gears	Lean philosophy, Lean assembly
LMS Factory	University Patras	Greece	Diverse	Training, education
LPS Learning Factory	Ruhr-Universität Bochum	Germany	Bottle cap, bottle cap holder, various make-to-order products	Lean production, Industrie 4.0, resource efficiency, workers' participation, labor 4.0
MPS Lernplattform	Daimler AG	Germany	Different products	Lean
MTA Sztaki Learning Factory Győr	MTA Sztaki	Hungary	Recyclable dummy workpieces	CPPS aspects
Operational Excellence Laboratory	Université du Luxembourg	Luxemburg	Hole puncher	Lean production, Industrie 4.0
Pilot Factory Industrie 4.0	TU Wien	Austria	3D printer	Factory virtualization, adaptive manufacturing, cyber-physical assembly & logistics
Smart Mini-Factory	Free University of Bolzano	Italy	Pneumatic cylinder, pneumatic impact wrench	Smart manufacturing systems, automation
Stellenbosch Learning Factory	Stellenbosch University	South Africa	O-scale train set	Lean operations, ergonomics, Industrie 4.0

Примеры фабрик обучения в академических и промышленных кругах мы приводим также в таблице 1.

Концепция фабрик обучения открывает возможности интеграции для прежних дидактических и технических подходов, прокладывая путь к компетентностно-

ориентированному планированию и дизайну, ведущему к построению образования на принципах цифровых двойников. Благодаря реалистичной среде, учащиеся становятся более мотивированными, что способствует их развитию. Возможно обучение на основе проблем, проектов или исследований. Обучение, ориентированное на действия, дает значительные преимущества по сравнению с традиционными методами обучения. Методы, инновации и технологии могут быть легко

перенесены в промышленность. Посредством обучения на этих фабриках учащиеся могут применять методы в реалистичной производственной среде без негативных последствий остановки производственных линий на их собственном предприятии. [28, 29,30].

Интегрально [28, 29, 30] учебные фабрики имеют три уровня проектирования:

На макроуровне разработана полная образовательная программа и физическая производственная среда с заводскими элементами. Она включает в себя социально-техническую инфраструктуру (производственную среду, производственные процессы, продукт и сотрудников). В процесс проектирования должны быть включены цели обучения, целевые группы и другие заинтересованные стороны.

Различные учебные модули разработаны на мезоуровне. Каждый учебный модуль может использовать разные части среды фабрики обучения. Процесс обучения должен быть структурирован на этом проектном уровне.

Микроуровень сосредоточен на сценариях обучения в рамках учебного модуля. Сценарии обучения делятся на исследовательскую, экспериментальную, систематизирующую или рефлексивную составляющие. Цели обучения определяют сценарий обучения. На этом уровне проектирования следует учитывать подготовку самой фабрики обучения, а также поддержку обучения, учебные материалы, среду обучения и учебный продукт.

Следует отметить, что концепция фабрики обучения также ограничена. Планирование, разработка, строительство и эксплуатация учебных заведений требуют финансовых и кадровых ресурсов. Фабрикам по физическому обучению нужно место в помещении. Машины, рабочие места и другие заводские элементы необходимо покупать и обслуживать. Партнеры и персонал должны иметь желание и возможность участвовать в фабрике обучения. Устойчивость должна быть обеспечена посредством операционной модели. Кроме того, фабрики обучения отображают ограниченные разделы производственной среды. Одна фабрика обучения не может обеспечить подходящую общую среду для всех задач в академических кругах и промышленности. Однако, выгоды применения фабрик обучения велики и исследователи неумоимо расширяют возможности концепции и ее практическое применение о чем мы поговорим далее.

III ПРИМЕР ФАБРИКИ ОБУЧЕНИЯ – ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ I4.0 – SUPSI В УНИВЕРСИТЕТЕ ПРИКЛАДНЫХ НАУК И ИСКУССТВ ЮЖНОЙ ШВЕЙЦАРИИ

Для того чтобы продемонстрировать пример фабрики обучения для I4.0, мы взяли фабрику с названием SUPSI, которой нет в таблице 1, но является сегодня одной из лучших в мире и ей, к счастью, посвящена отдельная диссертация [31], в которой, в том числе, изучается ее трансформация в цифровой двойник.

В диссертации [31] описывается разработка и

реализация учебной фабрики в Университете прикладных наук и искусств Южной Швейцарии (SUPSI), направленная на восполнение пробела в развитии навыков, связанных с I4.0, на основе подхода «обучение на практике» и обеспечение исследовательской платформы, которая может способствовать сотрудничеству практиков и научных кругов в разработке и тестировании новых технологий.

Созданная фабрика отличается модульным подходом и, в существующей конфигурации, объединяет различные производственные технологии, такие как аддитивное производство, лазерная обработка и фрезерование. Эти технологии устанавливаются для текущего пилотного производства, предмета с широкими возможностями настройки, состоящего из игрового набора TANGRAM, упакованного в персонализированные коробки. Вся фабрика связана со своим цифровым двойником, который питается всеобъемлющей инфраструктурой мониторинга, состоящей из систем технического зрения и высокоточных измерительных приборов, позволяющих отслеживать производственные процессы в реальном времени.

Дизайн был разработан для того, чтобы фабрика обучения служила средством решения образовательных и исследовательских задач на самых разных уровнях. В качестве образовательного средства студенты и специалисты имеют возможность погрузиться в историю производства, изучая как классические темы автоматизации (программирование PLC, MES и SCADA, прецизионное управление осями и пневматику), так и современные технологии, характерные для самых передовых умных предприятий (Интернет вещей, системы технического зрения, моделирование и цифровой двойник, передовые методы измерения и интеллектуальные системы управления производством) [31].

С исследовательской точки зрения фабрика служит пилотным предприятием для внутренних исследований и прикладных промышленных проектов, в дополнение к которым разрабатываются, тестируются и интегрируются приложения, производственные методы и технологии.

Кроме того, фабрика позволяет осуществлять практический процесс передачи технологий между университетом и промышленностью. Фактически, она позволяет тестировать новые технологии, которые в какой-то момент могут быть интегрированы в реальное производственное предприятие, а также служит демонстрацией, позволяющей продемонстрировать и измерить в реалистичной среде преимущества, которые приносят более продвинутое решения или подходы.

Фабрика образования SUPSI была спроектирована с целью создания открытой платформы, подходящей для образовательных, исследовательских и технологических целей. По этой причине фабрика охватывает все различные проблемы, с которыми инженер сталкивается в реальной производственной среде, и принимает во

внимание различные уровни пирамиды автоматизации.

Это привело к тому, что создатели [31] решили начать с нуля и самостоятельно спроектировать всю фабрику обучения. Фактически, несмотря на то, что существует множество готовых решений (например, Festo didactic), всем им не хватает гибкости и настраиваемости [31]. Эти системы на самом деле являются закрытыми платформами, с которыми очень сложно взаимодействовать и которые очень сложно настроить для каждого отдельного проекта или потребностей дидактической деятельности. Кроме того, разработчики [31] решили, что крайне важно, чтобы на учебном заводе SUPSI был реализован реальный производственный процесс, в то время как в вышеупомянутых решениях обычно реализуется только процесс сборки фиктивного продукта и, таким образом, нет реальной производственной системы, установленной на заводе.

Различные области интересов, которые были рассмотрены в ходе разработки фабрики обучения [31]:

- Механическая конструкция аксессуаров деталей
- Программирование PLC
- Определение размеров и настройка сервоосей
- Программирование HMI
- Аддитивное производство
- Робототехника
- Пневматическая и электрическая трассировка
- Планирование безопасности
- Мониторинг производства
- Планирование производства
- Цифровой двойник

Фабрика обучения SUPSI, краткое вводное описание которой можно найти в [31], создает точку отчета для промышленных малых и средних предприятий, особенно из района Тичино, которые заблудились и нуждаются в руководстве по цифровизации.

Преимущества учебной фабрики обучения SUPSI не будут ограничиваться регионом Тичино, который будет первым и наиболее затронутым регионом, в основном из-за географической близости пилотного проекта, но результаты будут широко распространены по всей стране благодаря вкладу других университетов прикладных наук, с которыми SUPSI ежедневно сотрудничает. По этой теме уже профинансирован ряд проектов в Швейцарии и в ЕС, и SUPSI уже сотрудничает с несколькими компаниями и университетами, в том числе, и на уровне общеевропейских проектов.

Кроме того, универсальная основа цифрового производства фабрики обучения SUPSI позволяет реализовать множество будущих исследовательских проектов во многих различных областях, таких как Интернет вещей (IoT), дополненная реальность, облачные вычисления и другие.

Учебная фабрика SUPSI имеет модульную структуру, схема которой представлена на рисунке 2.

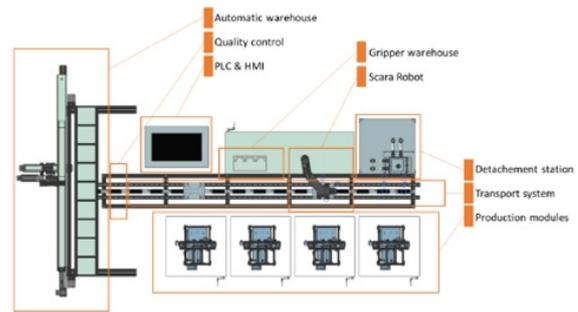


Рис. 2. Схема учебной фабрики SUPSI [31]

Как легко видеть, фабрика объединяет в себе всех участников, составляющих основу любого современного производственного предприятия [31]:

- Промышленные контроллеры (PLC) и человеко-машинный интерфейс (HMI): основные элементы любой автоматической машины, необходимые для программирования поведения самой машины, получения и обработки данных от установленных датчиков и обеспечения взаимодействия оператора.

- Автоматический склад: 81 позиция и обслуживается декартовым роботом, который загружает и выгружает каждую позицию.

- Производственные станки: в настоящее время на заводе установлены станки для опытного производства, аддитивного производства и лазерной гравировки.

- Продвинутая транспортная система: эта система основана на передовых технологиях и оборудована двумя разными транспортными средствами, которые можно перемещать независимо друг от друга. Первое посвящено перемещению различных деталей по разным модулям фабрики, в то время как второе позиционирует робота там, где это необходимо, позволяя ему взаимодействовать со всеми модулями фабрики.

- Станция проверки качества: эта станция основана на двухмерном лазерном триангуляционном сканере, который, благодаря взаимодействию с транспортной системой, позволяет получать трехмерное облако точек любой заготовки и выполнять анализ размеров, считывать штрих-коды и т. д.

- Промышленный робот в сочетании с системой автоматической смены инструмента: выбранный робот промышленного класса, его можно найти на многих реальных производственных предприятиях. На фабрике обучения SUPSI перед ним стоит задача загрузки / разгрузки производственных модулей, а также выполнения большинства операций по сборке. Головка робота оснащена пневматической системой смены инструмента, позволяющей роботу автоматически менять захват для выполнения различных назначенных задач.

Продукты, а также отдельные заготовки хранятся на одних и тех же поддонах (рисунок 3), которые могут удерживать все различные компоненты благодаря нанесенному на них слою резины.

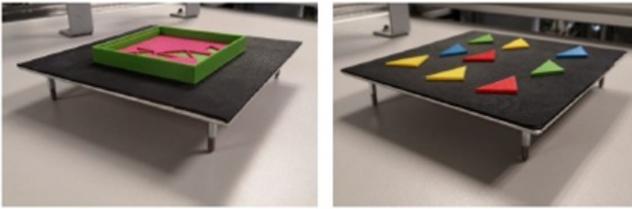


Рис. 3. Примеры поддонов [31].

Присутствие всех этих различных субъектов, особенно вместе с реальными производственными машинами, делает учебную фабрику SUPSI уникальной лабораторией среди того, что можно найти в университетах в целом.

Автоматический склад (рисунок 4) имеет 81 позицию и оснащен трехосным декартовым роботом, способным загружать и выгружать каждую ячейку, а также транспортную тележку транспортной системы. Его цель - хранение поддонов, на которых перевозятся готовые и полуфабрикаты, а также отдельные компоненты.



Рис. 4. Автоматический склад [31]

Каждая из осей робота приводится в движение отдельной сервоприводной системой, которая взаимодействует и управляется основным PLC.

Учебная производственная транспортная система SUPSI (рисунок 5) состоит из линейного двигателя, оснащенного в настоящий момент двумя носителями, которые могут перемещаться независимо, чтобы обеспечить производственные операции:

- Первый носитель размещает робота SCARA вдоль линии, позволяя ему обслуживать все различные станции;
- Второй перевозчик предназначен для транспортировки поддонов на склад и со склада. И робот SCARA, и декартовы роботы на складе могут загружать и выгружать поддоны с этого носителя.

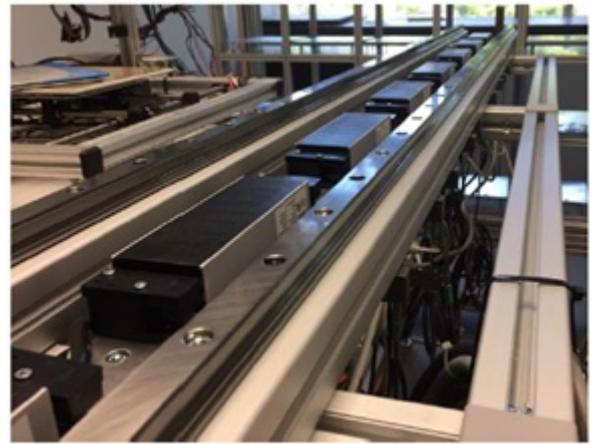


Рис. 5. Линейная транспортная система [31]

Робот SCARA (Omron R6YXGL400150, рисунок 6) установлен на одной из тележек линейной транспортной системы, что позволяет ему обслуживать все различные станции. Робот выполняет сборочные операции и отвечает за загрузку и разгрузку производственных модулей, а также за автоматическую станцию отсоединения.

Робот оснащен предохранительным пневматическим устройством, установленным на рабочем органе робота, предназначенным для защиты от столкновений и перегрузки с автоматическим сбросом от повреждений в результате столкновений или условий перегрузки [31].

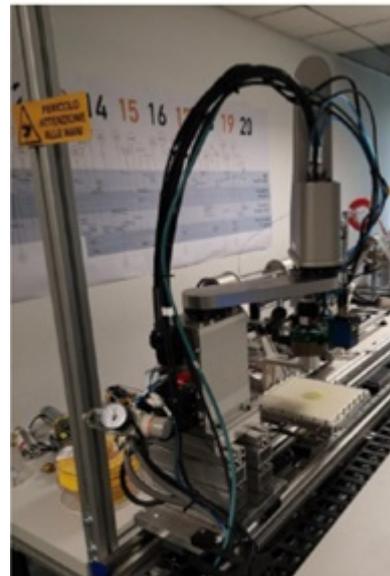


Рис. 6. Робот SCARA [31].

Головка робота оснащена интеллектуальной камерой (Wenglor B50S103, рисунок 7), что позволяет избежать механических приспособлений и сделать всю систему в целом более эластичной и надежной.

- Камера запрограммирована таким образом, чтобы:
 - Распознать облик формы и измерить положение своего центра тяжести и их вращения относительно опорного кадра камеры. Это позволяет направлять путь робота и захватывать контейнеры независимо от их положения на транспортном поддоне или на печатной

платформе (для операций отделения).

- Распознавать маркеры, прикрепленные к интерфейсу системы быстрой смены, установленному на захватах. Это позволяет измерять положение захвата и направлять робота, когда ему нужно что-то собрать.

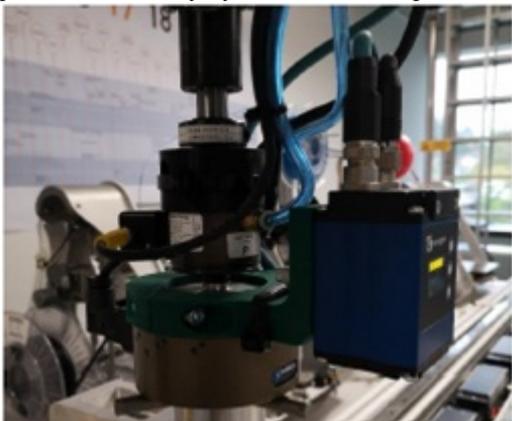


Рис. 7. Умная камера [31].

Для выполнения операций и передачи измеренных координат в систему отсчета робота была разработана специальная процедура калибровки. Вкратце: робот вручную позиционируется на нескольких идентифицируемых целях, а затем положение и ориентация этих же целей измеряются камерой; Сопоставляя результаты, можно вычислить матрицы преобразования между двумя системами, которые необходимо понять: матрицу перевода, матрицу поворота и преобразование из пикселей в миллиметры [31].

Первая версия функциональной цифровой двойники учебной фабрики SUPSI уже создана и позволяет [31]:

- Точное воспроизведение заводского поведения параллельно с выполняемыми операциями
- Точное воспроизведение заводского поведения в автономном режиме, позволяющее протестировать реализованный код, написанный в контроллере PLC, в смоделированной и, следовательно, безопасной среде. Эта функция особенно полезна в образовательных целях:

- о Учащиеся, работающие над основным PLC (2.2.3), могут программировать и тестировать свой код без риска столкновений или, в целом, нанесения каких-либо повреждений.

- о Студенты, работающие на дополнительных станциях PLC (2.2.10), могут работать параллельно, без необходимости чередоваться на реальном заводе с другими группами.

Кроме того, эти функции будут лежать в основе алгоритмов планирования на основе агентов, разрабатываемых для оптимизации производственного процесса и использования ресурсов). Это позволит оптимизировать процессы на основе доступных ресурсов и цели, налагаемой приоритетом в очереди заказов. Функциональный цифровой двойник полностью разрабатывается собственными силами благодаря долгому и обширному опыту в этой области, накопленному SUPSI за эти годы.

Используемое программное обеспечение поступает от

TTS (система передачи технологий, www.ttsnetwork.net), которая является партнерской компанией, специализирующейся в этой области и разрабатывающей собственное программное обеспечение.

На рисунке 8 приводится функциональная среда программирования цифровых двойников. Рисунок 9 показывает пример функционального цифрового двойника.

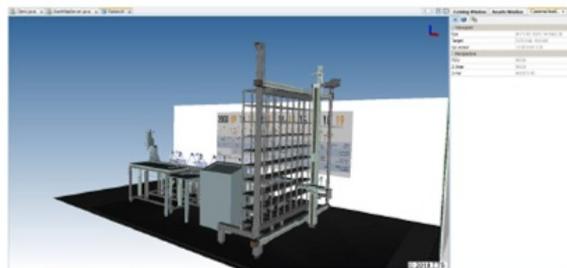


Рис. 8. Функциональная среда программирования цифровых двойников [31].



Рис. 9. Пример функционального цифрового двойника [31].

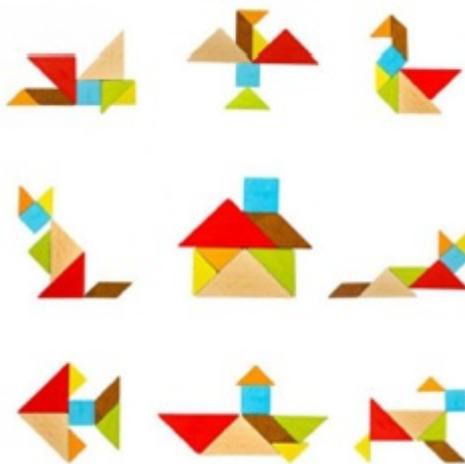


Рис. 10. Примеры фигур, представимых с помощью игрового набора Tangram [31].

Как уже говорилось выше, образование является одним из основных драйверов развития фабрики

образования SUPSI. Основная идея состоит в том, чтобы дать студентам возможность получить реальное практическое образование, поставив перед ними задачу, решить реальные проблемы на реальном предприятии, уделяя особое внимание парадигме индустрии 4.0. Это дает возможность, как восполнить пробел в учебных программах по менеджменту, в которых исторически не хватает лабораторий, так и удовлетворить потребности компаний, которые будут нанимать их в будущем. Фактически, как утверждается в [31], в настоящее время проводится множество исследований, направленных на определение навыков, которым должен обладать инженер. Общение и командная работа - одни из наиболее часто встречающихся, связанных со знанием технических наук. Однако их применение непросто из-за отсутствия образовательных подходов, которые способствуют развитию знаний, основанных на опыте. Учебные фабрики показали свою эффективность для развития теоретических и практических знаний в реальной производственной среде с использованием крайне эффективных педагогических игровых подходов, основанных на древней китайской игре (рисунок 10).

У фабрики образования в Университете прикладных наук и искусств Южной Швейцарии (SUPSI), помимо промышленных направлений, есть клиенты по транспортной тематике. Вот два вполне транспортных участника, использующие ее возможности [31]:

- Siemens Mobility: это отдельно управляемая компания Siemens AG, имеющая 4 основных бизнес-подразделения Mobility Management, посвященных интеллектуальным системам движения и железнодорожным технологиям, электрификации железных дорог, подвижному составу, сосредоточивающему все производство поездов и обслуживанию клиентов для технического обслуживания.

- SBB: Швейцарские федеральные железные дороги (нем. Schweizerische Bundesbahnen, SBB) - национальная железнодорожная компания Швейцарии.

Мы упоминали выше о сотрудничестве с этой фабрикой образования с европейскими проектами. Один из них это MirrorLabs [32] образовательный проект ЕС. MirrorLabs [32] намерен обучать студентов теме «Люди и роботы для устойчивого труда». Однако, для эффективного обучения учащимся потребуется доступ к реальному оборудованию. MirrorLabs разрабатывает общую, простую в использовании инфраструктуру ИКТ для существующего оборудования в лабораториях участвующих партнеров. В этой инфраструктуре должно быть место новым методам взаимодействия человека и робота, таким как дополненная реальность и виртуальная реальность. Сочетание AR / VR с существующей инфраструктурой робототехники довольно сложно. В рамках проекта будет разработана программная платформа и учебные пособия по ее настройке и началу работы с ней ([32] и учебники можно найти по адресу <https://mirrorlabs-ide.wixsite.com/mirrorlabs>).

IV ФАБРИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (BIM). LEGO – ИГРОВЫЕ ПОДХОДЫ

Игровые подходы используются широко и успешно для многих направлений инженерного образования (смотри предыдущий раздел). Одним из них является информационное моделирование или BIM – ведущая и подрывная IT технология в строительстве. I4.0 предполагает совершенно иные требования к производственным помещениям, чем в предыдущую эпоху. Образование BIM рассматривается сегодня в ряде проектов как профессиональная игра с использованием известной детской игры LEGO, имеющей невероятное количество возможностей. Так рассматривает обучение BIM один из очень успешных проектов Erasmus + BIM GAME имеющий лозунг – «Игра Vim- игра для создания 21-го века» [33]. Этот проект Erasmus + выполняется как стратегическое партнерство» во главе с GIP FTLV Академии Безансона. В [33] сказано:

«В то время как архитектурные проекты все чаще рассматриваются на международном уровне, обмен информацией между различными заинтересованными сторонами в строительстве становится серьезной проблемой. Чтобы облегчить этот обмен, BIM. Информационное моделирование зданий было разработано в последние годы, в частности, с использованием цифрового макета, обогащенного данными.

Поскольку все эти участники призваны работать вместе, имеет смысл обучать их вместе и предлагать им инструмент, BIM GAME, где они смогут протестировать общие процессы и в лучшем случае договориться о смене BIM. Целевая аудитория в обучении соответствует будущим акторам строительного проекта: архитектор, инженер-проектировщик, экономист по строительству, геодезист, оператор и т. д.

Эта проблема является европейской, и у каждой страны один и тот же вопрос о том, какой лучший метод выбрать для распространения этой новой культуры и, особенно, для ее интеграции в профессиональную практику. Этот проект, финансируемый Erasmus+ и поддерживаемый GIP Besançon, основан на многочисленных последующих проектах, осуществляемых в странах-партнерах. Такое объединение позволяет работать не только по национальным сценариям в отношении местных нормативных актов, но и по моделированию международных архитектурных проектов, которые сегодня соответствуют реальности на местах.

Новые методы работы, ориентированные на процесс BIM (информационное моделирование зданий и / или управление), требуют радикальной эволюции всех практик всех участников архитектурного проекта и совместного участия всех участников в достижении лучшего в каждой работе».

На международной конференции по фабрикам обучения в 2020 году было соответствующее выступление на тему применения LEGO В BIM образовании и публикация [34]. В этой публикации говорилось, что моделирование Villego® применялось в

ходе курса «Управление проектами» в 2019-2020 учебном году со студентами магистратуры LM-33 «Промышленное машиностроение» Свободного университета Бозен-Больцано в Италии. Семнадцать студентов участвовали в моделировании продолжительностью четыре часа. Распределенные роли в симуляционной игре проекта были следующими: один руководитель строительства и один помощник, три сборщика данных и два студента на каждого субподрядчика, серый, зеленый, синий, белый, красный и желтый. Руководитель строительства и помощник отвечали за координацию работы различных субподрядчиков для эффективной сборки дома Lego на месте. Как правило, заводское изготовление не разрешалось, а это означало, что кирпичи Lego можно было собирать только прямо на месте.

В моделировании [34] участвовали шесть субподрядчиков в соответствии с цветами кирпичиков Lego (например, серый субподрядчик отвечает за закладку фундамента; субподрядчик зеленый отвечает за сборку окон и дверей). Продолжительность строительства измерялась и отображалась на трех экранах. Каждые 10 секунд появлялся акустический сигнал, имитирующий один день в реальной строительной среде. Таким образом, одна минута представляет неделю с шестью рабочими днями. Строительная площадка была представлена зеленой табличкой, а пространство ограничивалось красно-белой липкой лентой на полу. Сборщиков данных попросили сесть на место и собирать следующие типы информации (при каждом звуковом сигнале):

- i) Общее время строительства.
- ii) Конкретные сделки, которые присутствовали на месте. Эта информация была агрегирована в KPI «Время нахождения субподрядчика на объекте»
- iii) Количество нарушений безопасности, в которых были применены следующие правила. Одновременно на территорию допускались только два человека. Если субподрядчики оставались на месте, им нужно было носить средства индивидуальной защиты в виде защитного колпачка.
- iv) Количество потерянного материала, когда кубики Lego, которые не были правильно собраны, должны были быть помещены в красный контейнер.
- v) Количество повторно использованного материала, выраженное в размещенных и затем замененных кирпичиках, учитывается как дополнительная штрафная стоимость (см. Таблицу 2). Перед началом первого и второго тура группе было разрешено в течение 20 минут изучить планы сборки и рабочие инструкции. В первом раунде применялась система управления производством Push, основанная на методе критического пути (CPM) [34].

Руководителю строительства и его помощнику [34]

приходилось вызывать различных субподрядчиков для выполнения их работы на месте на основе традиционного графика строительства, разработанного с помощью CPM и представленного в виде диаграммы Ганта. Во втором раунде применялись технологии LPS и Индустрия 4.0.

Состав дома Lego был изменен во втором раунде, чтобы избежать искажения результатов из-за эффектов кривой обучения. Использованы инновационные технологии лаборатории Smart Mini Factory [34]. Это были Oculus для VR, Microsoft HoloLens для AR, прочный планшет, показывающий BIM-модель дома Lego, а также запись с веб-камеры и визуализацию хода строительства в режиме реального времени на экранах лекционного зала [34].

Для того чтобы рамочные условия оставались такими же, как и в первом туре, участникам было разрешено изучить чертежи и рабочие планы в течение 20 минут. Кроме того, каждому субподрядчику было разрешено перемещаться по цифровой модели здания в виртуальной реальности с помощью Oculus не более 3 минут. В отличие от первого раунда, было применено планирование фаз как часть LPS. Здесь студентов попросили совместно спланировать процесс в обратном направлении, наклеив стикеры на определенные формы на стене лекционного зала [34]. Каждая заметка отображала конкретную задачу, ее продолжительность и необходимых предшественников.

В качестве дальнейшего улучшения был применен еженедельный план работы (как часть LPS). Здесь каждую неделю (60 секунд) нужно было заполнять специальную форму, называемую «планирование обязательств», с указанием конкретных задач, которые совместно планировалось выполнить на следующей неделе.

Во втором раунде каждую неделю (60 секунд) моделирование останавливали и оценивали количество выполненных задач. Если задачи не были выполнены, должна была быть указана конкретная «Причина невыполнения» с целью инициирования процесса постоянного улучшения среди участвующих студентов. В качестве дальнейшего совершенствования второго раунда руководитель строительства надел умные очки Microsoft HoloLens, чтобы спроектировать цифровой домик Lego в AR. Это было важным подспорьем в проведении непрерывного сравнения плановых показателей с целью помочь субподрядчикам на месте правильно разместить кирпичи Lego. Более того, в ходе второго тура на месте была размещена веб-камера с целью визуализировать процесс строительства дома из Lego в режиме реального времени [34].

В таблице 2 перечислены ключевые показатели эффективности (KPI), измеренные в первом и втором раунде. Они показывают, что время строительства может быть резко сокращено (почти до трети). Интересно, что время нахождения субподрядчика на объекте было уменьшено с 91 до 37 дней (1 день = 10 секунд), в то же время производительность на месте была увеличена (почти втрое). Другими словами, это

означает, что субподрядчики меньше работали на объекте, но были более продуктивными или сосредоточены на работе по добавлению стоимости по сравнению с первым раундом. Аналогично сократилось время простоя (отсутствие активности) на месте от 19 до 2 дней, что можно отнести к процессу совместного планирования и, таким образом, улучшенному согласованию со стороны LPS. С точки зрения качества, ошибки в готовом здании могут быть устранены, материал меньше использовался повторно и тратился меньше. Наконец, что важно, количество штрафов за безопасность можно уменьшить до уровня меньше половины по сравнению с первым раундом [34].

Таблица 2. Ключевые показатели эффективности первого и второго раунда [34]

	Round 1	Round 2
Construction time [min]	16	5:30
Productivity [elements/min]	6.38	18.55
Subcontractor time on site [10 seconds]	91	37
No activity on-site [10 seconds]	19	2
Errors in finished building [#number]	1	0
Safety penalties [#number]	12	5
Penalty for reuse of material [#number]	5	4
Wasted material [#number]	5	2

Этот пример показывает, что помощью хорошей образовательной методики и, используя совсем простые и недорогие игровые средства, можно достичь часто очень быстрых отличных результатов в номинации «фабрика образования».

V ФАБРИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ I4.0. LEGO – ИГРОВЫЕ ПОДХОДЫ

Идея использования LEGO в качестве учебного материала основана на убеждении, что эффективное обучение возможно через игру [35]. В последнее время LEGO, как «мозговой шторм» (MINDSTORMS) все чаще используется как обучающий инструмент для нескольких инженерных дисциплин, таких как робототехника, компьютерное программирование и управление. Несколько приложений базирующихся на LEGO систем для учебных целей можно найти в литературе, например, в обучающих встроенных системах [35], кодировании MATLAB, теории управления, а также в концепциях информатики, проверка модели и сборе данных [35].

В целом, использование LEGO в инженерных курсах, посвященных производственным системам, встречается реже. Но как сообщается в [35] разработан для этого класс моделирования дискретных событий, в котором студенты могут изучить динамику 7-станций модели производственной линии и провести эксперименты с целью построения имитационной модели системы как проектной работы конечно. Также было выполнено принятие решений по улучшению системы на основе моделирования.

В [35] говорится, что в этой технике разработана

поточная линия, состоящая из одного питателя и двух машин с промежуточным буфером. Машины были запрограммированы на имитацию отказов различной продолжительности. Курс преследовал три основные цели: (1) понимание времени обработки и интенсивности отказов путем сбора данных, (2) моделировании системы с целью оптимизации производительности, времени цикла, и незавершенной работы, и (3) проектирование системы с точки зрения распределения буферов. Благодаря такой развитой системе, как утверждается в [35], студенты смогли изучить и понять основные концепции стохастического моделирования, планирования производства, и контроля. Авторы системы, следуя [35], также показали, что понимание студентами динамического поведения производственной системы улучшилось более эффективно, чем при традиционном обучении на основе лекций. Санчес и Бусио [35] использовали производственную систему для обучения принципам управления дискретными системами событий для аспирантов и так чтобы они могли получить практический опыт работы с автоматизированной системой. Физическая система была замкнутой линией, которая состоит из двух рабочих станций, двух систем подачи, двух диспетчеров и конвейерной системы. Целью проекта [35] была разработка и реализация иерархического супервизора для физической модели, способного выполнять производство по расписанию, а также для разработки контроллеров для наблюдения за задачами распределения ресурсов во время производства.

В [35] авторы сообщают, что разработали компьютерную интегрированную производственную среду для проектирования и сборки построенных изделий с блоками LEGO. Цель заключалась в том, чтобы научить студентов программному обеспечению для планирования процессов и траектории движения последовательности производства. Рисунок 11 показывает базовые элементы настройки на LEGO для производственной системы.

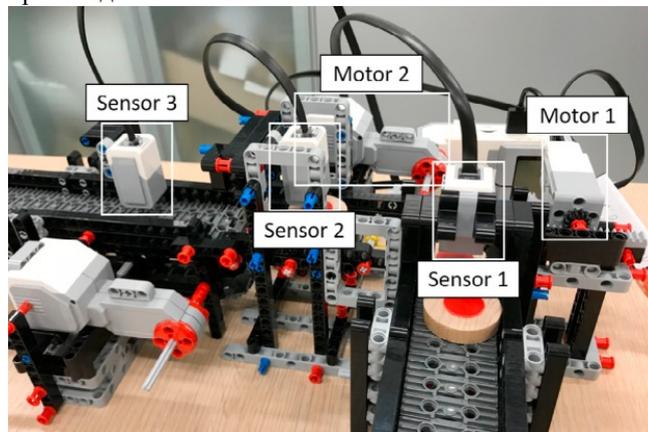


Рис. 11. Базовые элементы настройки на LEGO для производственной системы [35].

VI ФАБРИКИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

Выше в описании работ двух фабрик образования

уже говорилось о работах с железными дорогами. Стелленбосский университет участвовал в последней конференции по фабрикам образования и публикация [36] дает возможность сообщить некоторые детали.

Атрибуты производственной среды LF (фабрик образований) определяют продукт, производимый в LF, и также атрибуты производственной среды, так продукт, произведенный на реальном заводе, определяет производственную среду этого завода [36]. Тем не менее, он должен быть также продуктом, произведенным на фабрике обучения [36]. Это исследование [36] подтверждает использование тележки железнодорожного вагона в качестве продукта фабрики обучения, предложенной в [36], поскольку тележка сложная (состоит из нескольких частей) и, следовательно, более подходит для обучения студентов-механиков, электриков и инженеров-технологов. Тренировочная платформа в этом случае совместима с рабочим столом под управлением Windows. Важно отметить, что интерактивная платформа должна легко обновляться до VR, чтобы выполнять условия перспектив этого исследования [36].

Спецификация требований пользователя формировала фокус-группа, проведенная со студентами инженерных специальностей и преподавателями, которая определила следующие приоритетные направления обучения для выпускников, работающих на заводе-изготовителе без предшествующего опыта работы в отрасли:

- Спецификация материалов (BOM) и функциональность деталей: студенты инженерных специальностей знакомятся со сборкой тележки, что может улучшить запоминание спецификации за счет понимания функций каждой детали.
- Последовательность сборки: учащиеся должны понимать последовательность сборки и методы работы с ключевыми инструментами. Последовательность сборки определялась путем анализа покомпонентного изображения тележки

с рассмотрением ограничений связи, как показано на рисунках 12 и 13 ниже.

Анализ 3D-моделей из GrabCad [36] - это приложение обратного проектирования для определения последовательности сборки для реконструкции 3D-моделей на SolidWorks. На рисунках 12 и 13 показано, что боковые рамы являются базовыми деталями, на которые монтируются узлы болксера / транца, тягового двигателя и осей. Тонкие линии представляют другие девять частей так, чтобы они соединились с вышеупомянутыми основными частями узла, в результате чего в итоге получилось одиннадцать соединений.

Соединения представляют собой точки сборки, в которых осуществляется крепление, сварка и другие способы соединения с использованием вспомогательных инструментов, таких как динамометрический пистолет, показанный на рисунке 14 (d).

Соединение частей требует высокого уровня двигательных навыков, приобретенных в результате взаимодействия или манипуляции с материальными предметами как составными частями. Таким образом, развитие моторики в виртуальной среде все еще остается под вопросом, поэтому происходит использование модели навыков, правил и знаний (SRK), в определении объема предлагаемой платформы обучения.

Поведение, основанное на навыках, происходит, когда оператор бессознательно взаимодействует с окружающей средой и основанное на правилах поведение происходит, когда оператор полагается на конкретную информацию для выполнения задачи; наконец, основанный на знаниях случается тогда, когда оператор применяет логику и решает задачу методом проб и ошибок [36]. Основное внимание на этой платформе уделяется развитию знания и поведения, основанных на правилах, и рассматривает развитие поведения на основе навыков как будущую работу.

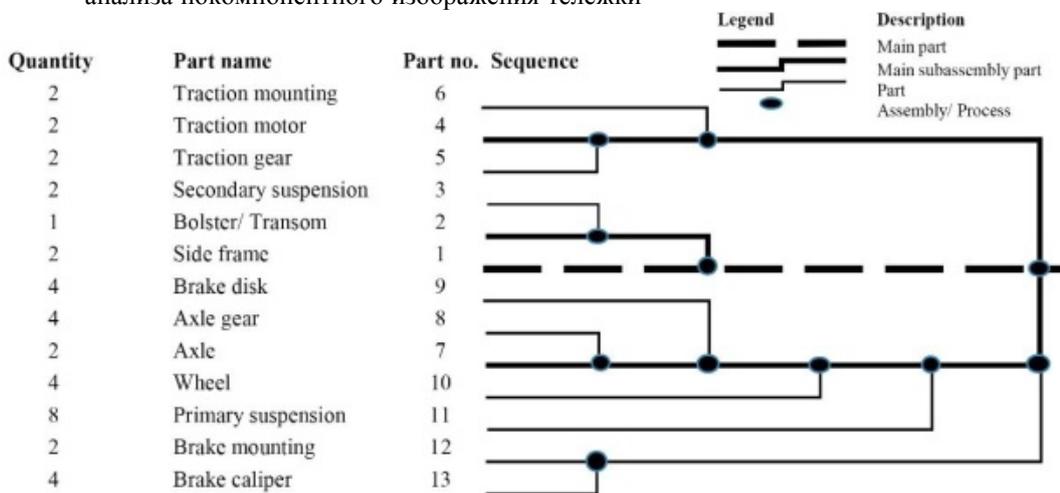


Рис. 12. Последовательность сборки [36]

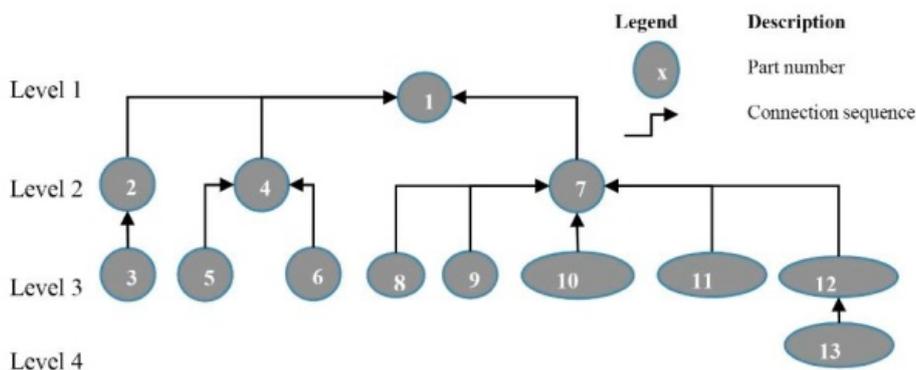


Рис. 13. Ограничение последовательности сборки связи [36].

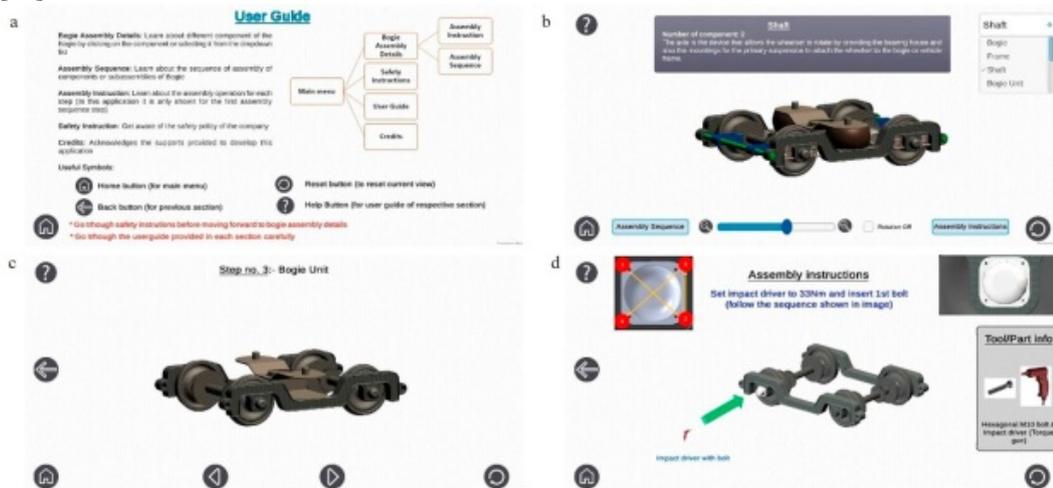


Рис. 14. (a) Руководство пользователя; (b) Детали сборки тележки; (c) последовательность сборки; (d) Инструкции по сборке [36].

VII. ФАБРИКИ ОБРАЗОВАНИЯ, СКЛАДЫ И ЛОГИСТИКА

Нам представлялось важным показать не совсем привычные изначальным представлениям применения фабрик образования, чтобы показать читателю возможные направления собственных размышлений в сторону возможностей этих фабрик. К таковым относится, как мы полагаем, логистика и складское дело.

В [37] справедливо отмечают, что автоматизация складских процессов, получило повышенную сложность из-за электронной коммерции и переход к безбумажным технологиям в складировании - одна из серьезных проблем, с которыми в настоящее время сталкивается логистическая отрасль. В связи с меняющимися рынками открылись возможности новых услуг и поэтому для сохранения конкурентоспособности жизненно необходимы инновационные услуги. Различные сервисные продукты предлагают поставщики систем внутренней логистики для оказания помощи клиентам, но отсутствие понимания услуг и связанных с ними затрат вызывает желание клиентов отказаться от принятия услуг. Следовательно, содержанию новых услуг необходимо обучать и информировать об обслуживании, а также необходимо создавать инновации, которые дают возможность повысить

удовлетворенность клиентов и способствовать дальнейшему развитию клиентов.

Спрос на практическое обучение и тренировки клиентов является ключом к решению предстоящих задач для складских помещений [37]. В статье [37] авторы заявили, что намерены разработать фабрику обучения для услуг, которые обещают 1) клиентам лучшую работу своих складов при правильном использовании услуг; 2) инновационные возможности для поставщика услуг; и 3) дальнейшие исследования возможностей работы между промышленностью и академическим сообществом. По этой причине на первом этапе исследованы [37] существующие фабрики образования и услуги интралогистической компании. На основе этого были разработаны концепции фабрики сервисного обучения. На третьем этапе была выбрана концепция, детализирована и составлено содержание обучения. На основе этой концепции был построен прототип такой фабрики LEAD Технологического университета Граца и протестирован [37].

VIII ФАБРИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ 5G, AI И IOT

В настоящее время передовые технологии индустрии 4.0, такие как технологии Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (AI или ИИ) быстро развиваются, принося новые возможности и потенциал транспорту и промышленности.

Ожидается, что технология 5G значительно расширит сегодняшнюю область Интернета вещей и станет все

более доступной в качестве основного драйвера роста приложений Интернета вещей в промышленности [38] и на транспорте [39, 40].

Технология AI также демонстрирует свои несравненные преимущества как аналитический метод для точного и быстрого анализа огромных массивов данных в отрасли промышленного и транспортного применения [41]. Благодаря внедрению 5G и искусственного интеллекта компании могут использовать стратегии на основе данных для оптимизации своей производительности путем сбора и анализа данных на протяжении всего жизненного цикла продукта [38, 41]. Следовательно, что еще более важно, производственным предприятиям можно применять технологии 5G и AI для поддержки планирования производства, конкурентоспособности и добавления их коммерческой выгоды [38,41].

Производство, как предмет инноваций, не может эффективно рассматриваться только в своем классе [41]. Следовательно, необходимо интегрировать реальную отраслевую практику с производственным образованием и обучением для перехода от и паттернов имитационного обучения на реальные и продуктивные [41]. Тем не менее, производственное обучение и тренировки в настоящее время не идут в ногу ни с прогрессом в производственных технологиях, ни с требованиями рынка труда [41]. К тому же, отсутствие междисциплинарных методов обучения затрудняет ученикам решение сложных и комплексных задач оперативно и эффективно [41]. Чтобы удовлетворить эти потребности, современная учебная среда готова сделать обучение и тренировки в обрабатывающей промышленности намного лучше на фабрике обучения AMTC, как сказано в [41].

Расширенные занятия по 5G и обучение технологиям искусственного интеллекта может быть реализовано на фабрике обучения AMTC для развития качественных производственных талантов. Таким образом, студенты могут испытать реальное состояние производства и практически справиться с заданной отраслевой задачей, что помогает им накапливать технологический опыт производства и овладевать ключевыми компетенциями и навыками [41].

В статье [41] представлена программа фабрики обучения, реализованная на фабрике обучения AMTC,

которая позволяет студентам:

практически испытать сцены приложений 5G и AI и обсудить, что 5G и AI значат для производственных предприятий.

За счет использования этих новых технологических приложений студенты могут получить междисциплинарные знания. и навыки, а также мультидисциплинарный взгляд на способность эффективно решать инженерные задачи [41].

Дизайн фабрики обучения AMTC представлен с трех аспектов [41]: концептуальный дизайн, учебная среда и фазы обучения. Как обучать студентов, показано в концептуальном дизайне так, чтобы все участники имели базовое понимание того, что они могут испытать в тренировочном процессе. Инфраструктура AMTC включена в учебную среду, чтобы помочь участникам узнать больше об оборудовании, которое они могут использовать. Также, учебные курсы, составляющие основную часть проектирования фабрики обучения, представлены в виде этапов обучения [41].

В эпоху 5G определены три основных сценария приложений, и это улучшенная мобильная широкополосная связь (eMBB), сверхнадежная связь с малой задержкой (uRLLC) и массовая связь машинного типа (mMTC) соответственно. ИИ может применяться к машинному зрению, например, для мониторинга качества продукции и интеллектуальных позиционирований в цехе. Однако студенту сложно овладеть этими двумя технологиями. Поэтому предлагается минимальный набор, чтобы представить студентам конкретный случай, связанный с этими двумя технологиями. Кроме того, принцип ABCD определен для иллюстрации того, что мы имеем в минимальном наборе и ролевой игре [41].

Предложенный в [41] подход объясняет, как реализовать программу фабрики обучения более интересным способом. Минимальный набор, включая приложения 5G и AI, базируется на основных элементах фабрики образования, минимальный набор предназначен для моделирования производственного предприятия во всех отношениях целиком. Облачный сервер можно заменить на локальный, если сама компания хочет хранить данные локально для обеспечения безопасности данных или экономии расходов на облачный сервер.

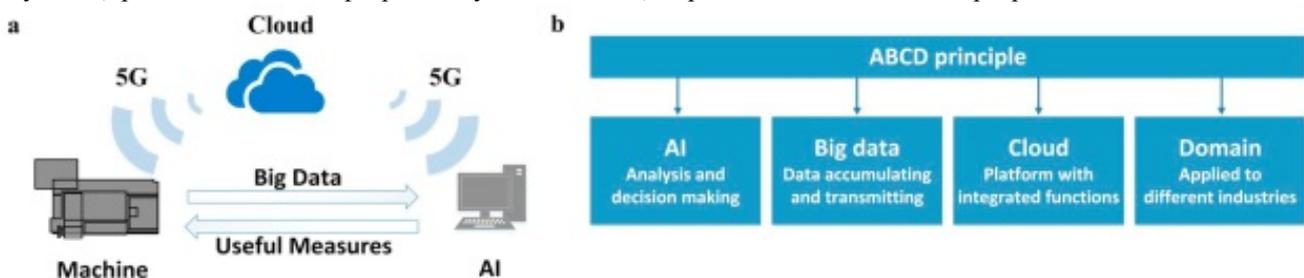


Рис. 15. (а) Конструкция минимального набора; (б) Принцип ABCD [41].

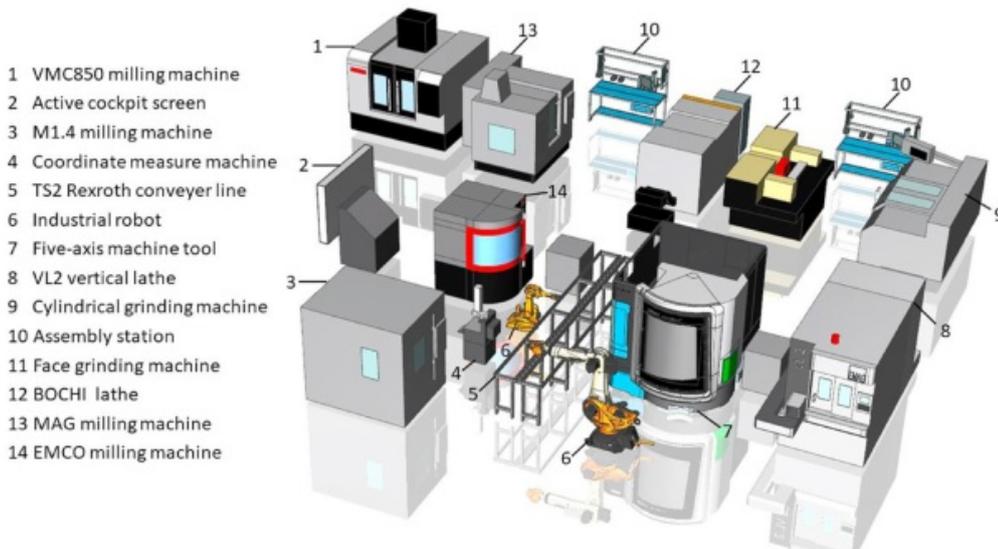


Рис. 16. Тренировочная среда в АМТС [41].

Рисунок 15 показывает (а) конструкцию минимального набора; (б) принцип ABCD, а рисунок 16 - тренировочную среду в АМТС.

IX СОВМЕСТНЫЕ КУРСЫ НА ФАБРИКАХ ОБРАЗОВАНИЯ

Проблемы экономической эффективности фабрик образования не могут и не должны решаться только за счет применения дешевых компонент. Во многих случаях это просто невозможно. Поэтому должны рассматриваться различные варианты совместных курсов и иных представлений о фабриках образования, как об общем ресурсе.

Совместный курс «Цифровизация в разработке и производстве» был проведен в трех фабриках обучения: Дармштадского технического университета (TUDa), кафедры производственных систем (LPS) в Рурском Университет Бохума (RUB) и в бизнес-школе ESB (ESB) [42]. Хотя у этих фабрик обучения есть общие темы, например в области производственно-технических и информационных систем помощи, содержание совместного курса было структурировано в соответствии с процессом создания продукта, чтобы минимизировать

дублирование содержания курса (см. рисунок 17). Целевой группой этого курса были аспиранты из различных инженерных и промышленных предприятий проходящие инженерные программы трех университетов. Основные запланированные результаты обучения заключались в улучшении теоретических и практических знаний в области цифровизации при разработке и производстве продукции.

Поэтому адресованное содержание курса в основном было структурировано в виде короткой теоретической лекции, обсуждения со студентами и групповой работы, а также практических упражнениях на фабриках образования. Для групповой работы и работы с упражнениями, группы были разделены таким образом, чтобы в группы были включены студенты из разных университетов, чтобы способствовать сотрудничеству и обмену знаниями между университетами и в то же время для достижения цели улучшения социальных навыков студентов, которые они могли получить, работая в междисциплинарных командах. Оценка результатов курса была проведена в соответствии с правилами обучения и экзаменов сотрудничающих университетов и включала оценку групповых и практических заданий, а также письменный экзамен [42].

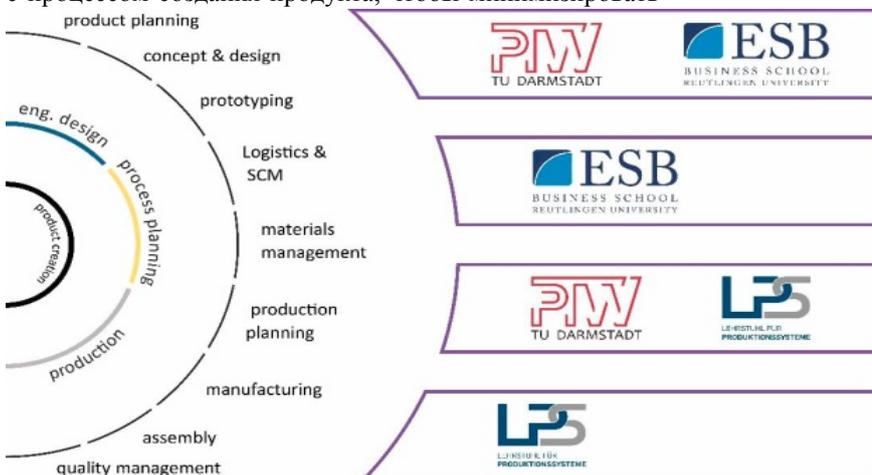


Рис. 17. Структура курса после процесса создания продукта [42]

Х ВЫВОДЫ

В настоящее время проводится множество исследований, направленных на определение навыков, которым должен обладать инженер [43]. Общение и командная работа - одни из наиболее часто встречающихся проблем, связанных с инженерными знаниями. Однако их применение не просто из-за отсутствия образовательных подходов, которые способствуют тому, чтобы развивать знания, основанные на опыте. Фабрики обучения или Learning Factories (LF) показали свою эффективность для развития теоретических и практических знаний в реальной производственной среде.

Мы утверждаем, что надлежащий процесс трансформации, базирующийся на трех столпах (дидактический, интегративный и инженерный) для разработки LF может облегчить путь к новым производственным и транспортным тенденциям, таким, как промышленность 4.0 и современные транспортные системы в академическом контексте. Это усиливает процесс обучения инженеров, и это применимо, как в мире, так и в России.

Мы начинали эту статью цитатой из докторской диссертации и хотели бы ее завершить также цитатой из другой докторской с очень символическим названием: «План для внедрения Индустрии 4.0 на фабриках обучения» [44]:

«Глобализация и нехватка ресурсов резко повысили интенсивность конкурентоспособного производства, вынуждая компании оправдывать более высокие ожидания с меньшим количеством персонала и минимальным использованием ресурсов. Эта ситуация положила начало новой промышленной революции - Industrie 4.0. Эта новая революция, аналогичная придуманным фразам, таким как умные фабрики и Интернет вещей, уступила место экспоненциальному прогрессу в технологиях. Внедрение этих технологий теоретически должно позволить фирмам снизить негативное влияние своей деятельности на тройную прибыль и повысить эффективность. Однако хотя реализация этих технологий обеспечивает кажущиеся и логические улучшения; как их реализовать, с помощью чего и где все еще остается неясным и может привести к полной их отмене из-за отсутствия знаний».

Чтобы такого не произошло, нам представляется, что должно прийти осознанное понимание необходимости изменений в российском высшем образовании, как условия успехов внедрения цифровых технологий в промышленности и на транспорте. Одно из возможных направлений такой трансформации мы представили в этой статье на суд наших читателей.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Curriculum Guidelines for Key Enabling Technologies (KETs) and Advanced Manufacturing Technologies (AMT) EU 2019 <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4dcaeee3-29c2-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-87225354>
- [2] Loina Prifti , Professional Qualification in “Industrie 4.0”- Building a Competency Model and Competency-Based Curriculum,

- Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität Mün-chen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigten Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN Fakultät für Informatik 2019 <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1447234/672502.pdf>.
- [3] Добрынин А. П. и др. Цифровая экономика-различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 1.
 - [4] Kupriyanovskij V. P., Namiot D. E., Sinjavog S. A. Cyber-physical systems as a base for digital economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. S 2.
 - [5] Kupriyanovsky V. et al. Internet of Things in industrial plants //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 12. – С. 69-78.
 - [6] Kupriyanovsky V. et al. Skills in the digital economy and the challenges of the education system //International journal of open information technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С. 19-25.
 - [7] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy—the design and production //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С. 50-70.
 - [8] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy—the ecosystem and life cycle //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 1. – С. 34-49.
 - [9] Namiot D. et al. Smart Cities and education in digital economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 56-71.
 - [10] Kupriyanovsky V. et al. Web of Things and Internet of Things in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 38-45.
 - [11] Куприяновский В. П. и др. Правительство, промышленность, логистика, инновации и интеллектуальная мобильность в цифровой экономике //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – №. 1.
 - [12] Kupriyanovsky V. et al. On mobile production based on a shared economy, digital technologies, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 8. – С. 47-69.
 - [13] Куприяновский В. П. и др. Цифровая железная дорога-ertms, bim, GIS, PLM и цифровые двойники //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – №. 3.
 - [14] Kupriyanovsky V. et al. On development of transport and logistics industries in the European Union: open BIM, Internet of Things and cyber-physical systems //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 2. – С. 54-100.
 - [15] Sokolov I. et al. Robots, autonomous robotic systems, artificial intelligence and the transformation of the market of transport and logistics services in the digitalization of the economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 4. – С. 92-108.
 - [16] Kuznetsov V., Russu J., Kupriyanovsky V. On the use of virtual and augmented reality //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 75-84.
 - [17] Kupriyanovsky V. et al. On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 9. – С. 73-81.
 - [18] Namiot D., Sneps-Snepp M. On software standards for smart cities: API or DPI //Proceedings of the 2014 ITU kaleidoscope academic conference: Living in a converged world-Impossible without standards?. – IEEE, 2014. – С. 169-174.
 - [19] Klimov A. et al. To the issue of reverse-engineering-the way from paper to digital ontological rules for educational technology //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 9. – С. 82-91.
 - [20] Климов, А.А. Транспортное образование в условиях технологической трансформации отрасли: учеб. пособие для студ. образ. Организаций высшего образования и слушателей программ доп. проф. образования / Климов А.А., Заречкин Е.Ю., Куприяновский В.П. – М. : Лакуэр Принт, 2019
 - [21] Klimov A. et al. On digital technologies, skills, engineering education for transport and education technologies //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 10. – С. 98-127.
 - [22] Kupriyanovsky V. et al. On the issue of ontological availability of digital educational resources and their standardization in EdTech

- //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 10. – С. 91-97.
- [23] Климов А. А., Заречкин Е. Ю., Куприяновский В. П. Влияние цифровизации на систему профессионального образования //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 2.
- [24] Климов А. А., Заречкин Е. Ю., Куприяновский В. П. Об особенностях использования тренажеров при реализации образовательных программ (на примере подготовки специалистов для транспорта) //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 2.
- [25] Климов А. А., Заречкин Е. Ю., Куприяновский В. П. О цифровой экосистеме современного университета //Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 4.
- [26] Kupriyanovsky V. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 3. – С. 55-74.
- [27] Klimov A. et al. On smart technologies in ports and shipping as linked digital twins for shore and ship in a multimodal environment //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 3. – С. 75-91.
- [28] Learning Factory [https://en.wikipedia.org/wiki/Learning_Factory#:~:text=Learning%20Factories%20are%20designed%20on,product%2C%20and%20the%20employees\).](https://en.wikipedia.org/wiki/Learning_Factory#:~:text=Learning%20Factories%20are%20designed%20on,product%2C%20and%20the%20employees).)
- [29] International Association of Learning Factories <https://ialf-online.net/>
- [30] Procedia Manufacturing <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-manufacturing/vol/45/suppl/C>
- [31] Ferrario A. Design, development and applications of a learning factory at the university of applied sciences and arts of southern switzerland. – 2020.
- [32] MirrorLabs <https://mirrorlabs-ide.wixsite.com/mirrorlabs>
- [33] BIM GAME <https://bimgame.eu>
- [34] Dallasega P. et al. BIM, Augmented and Virtual Reality empowering Lean Construction Management: a project simulation game //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 49-54.
- [35] Lugaesi G., Frigerio N., Matta A. A New Learning Factory Experience Exploiting LEGO For Teaching Manufacturing Systems Integration //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 271-276.
- [36] Nelson S. X. et al. Development of a 3D Interactive Training Platform for Assembly of Bogie Unit in the Railcar Learning Factory //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 386-391.
- [37] Sadaj E. A., Hulla M., Ramsauer C. Design Approach for a Learning Factory to train Services //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 60-65.
- [38] 5G-SMART <https://cordis.europa.eu/project/id/857008>
<https://5gsmart.eu/>
- [39] 5G! Drones <https://cordis.europa.eu/project/id/857031>
<https://5gdrones.eu/>
- [40] 5GCAR <https://cordis.europa.eu/project/id/761510> <https://5gcar.eu/>
- [41] Zhang W. et al. 5G and AI Technology Application in the AMTC Learning Factory //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 66-71.
- [42] Enke J. et al. Cooperation between Learning Factories: Approach and Example //Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 45. – С. 222-227.
- [43] КОБЗЕВ С. А. БЕРЕЖЛИВАЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СИСТЕМА ТРАНСПОРТНОЙ КОМПАНИИ //Железнодорожный транспорт. – 2020. – №. 9. – С. 4-13.
- [44] Du Plessis C. J. A framework for implementing Industrie 4.0 in learning factories: дис. – Stellenbosch: Stellenbosch University, 2017.

Learning Factories for Industry and Transportation in the Digital Twins Era

Oleg Pokusaev, Vasily Kupriyanovsky, Alexey Korzun, Alexander Klimov, Mikhail Jabitsky, Dmitry Namiot, Alexander Semochkin

Abstract— Study programs in higher education systems need to be more flexible and adapt to the evolving skills and training needs of the engineering industries. Changes in skill needs are increasingly required due to the ongoing digitalization of the industry, as well as the increasing adoption of new technologies. Curricula in higher education institutions need to adapt to the digital age, for example, by ensuring that engineering graduates understand the value of big data, the efficiency gained from robotization and automation, etc. The provision of engineering courses in HEIs should become more adaptable to incorporate digital technologies. Vocational education and training systems need to be adapted to meet the rapidly changing nature of skill needs in engineering industries in general and in manufacturing-oriented engineering firms in particular. Digitalization and digital skills should be the main characteristics of engineering training programs. The seemingly simple educational process, which for centuries consisted of lectures, seminars, got into a situation of the need for new solutions not only in terms of lectures, but also in how to organize practical seminars, as well as the preparation of graduate theses and master's theses.

Keywords— education, digital twin.

REFERENCES

- [1] Curriculum Guidelines for Key Enabling Technologies (KETs) and Advanced Manufacturing Technologies (AMT) EU 2019 <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4dcaeee3-29c2-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-87225354>
- [2] Loina Prifti , Professional Qualification in “Industrie 4.0”- Building a Competency Model and Competency-Based Curriculum, Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigten Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN Fakultät für Informatik 2019 <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1447234/672502.pdf>.
- [3] Dobrynin A. P. i dr. Cifrovaja jekonomika-razlichnye puti k jeffektivnomu primeneniju tehnologij (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA i drugie) //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 1.
- [4] Kuprijanovskij V. P., Namiot D. E., Sinjagov S. A. Cyber-physical systems as a base for digital economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. S 2.
- [5] Kupriyanovsky V. et al. Internet of Things in industrial plants //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 12. – S. 69-78.
- [6] Kupriyanovsky V. et al. Skills in the digital economy and the challenges of the education system //International journal of open information technologies. – 2017. – T. 5. – #. 1. – S. 19-25.
- [7] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy—the design and production //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 1. – S. 50-70.
- [8] Kupriyanovsky V. et al. Industries transformation in the digital economy—the ecosystem and life cycle //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 1. – S. 34-49.
- [9] Namiot D. et al. Smart Cities and education in digital economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 3. – S. 56-71.
- [10] Kupriyanovsky V. et al. Web of Things and Internet of Things in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 5. – S. 38-45.
- [11] Kuprijanovskij V. P. i dr. Pravitel'stvo, promyshlennost', logistika, innovacii i intellektual'naja mobil'nost' v cifrovoj jekonomike //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2017. – T. 13. – #. 1.
- [12] Kupriyanovsky V. et al. On mobile production based on a shared economy, digital technologies, and logistics //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 8. – S. 47-69.
- [13] Kuprijanovskij V. P. i dr. Cifrovaja zheleznaja dorogartms, bim, GIS, PLM i cifrovyje dvojniki //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2017. – T. 13. – #. 3.
- [14] Kupriyanovsky V. et al. On development of transport and logistics industries in the European Union: open BIM, Internet of Things and cyber-physical systems //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 2. – S. 54-100.
- [15] Sokolov I. et al. Robots, autonomous robotic systems, artificial intelligence and the transformation of the market of transport and logistics services in the digitalization of the economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 4. – S. 92-108.
- [16] Kuznetsov V., Russu J., Kupriyanovsky V. On the use of virtual and augmented reality //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 4. – S. 75-84.
- [17] Kupriyanovsky V. et al. On the new IoT generation-ETSI ontology standards and specifications //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 9. – S. 73-81.

- [18] Namiot D., Sneps-Sneppe M. On software standards for smart cities: API or DPI //Proceedings of the 2014 ITU kaleidoscope academic conference: Living in a converged world-Impossible without standards?. – IEEE, 2014. – S. 169-174.
- [19] Klimov A. et al. To the issue of reverse-engineering-the way from paper to digital ontological rules for educational technology //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 9. – S. 82-91.
- [20] Klimov, A.A. Transportnoe obrazovanie v usloviyah tehnologicheskoy transformacii otrasli: ucheb. posobie dlja stud. obraz. Organizacij vysshego obrazovanija i slushatelej programm dop. prof. obrazovanija / Klimov A.A., Zarechkin E.Ju., Kuprijanovskij V.P. – M. : Lakuje Print, 2019
- [21] Klimov A. et al. On digital technologies, skills, engineering education for transport and education technologies //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 10. – S. 98-127.
- [22] Kuprijanovsky V. et al. On the issue of ontological availability of digital educational resources and their standardization in EdTech //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – T. 7. – #. 10. – S. 91-97.
- [23] Klimov A. A., Zarechkin E. Ju., Kuprijanovskij V. P. Vlijanie cifrovizacii na sistemu professional'nogo obrazovanija //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2019. – T. 15. – #. 2.
- [24] Klimov A. A., Zarechkin E. Ju., Kuprijanovskij V. P. Ob osobennostjah ispol'zovanija trenazherov pri realizacii obrazovatel'nyh programm (na primere podgotovki specialistov dlja transporta) //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2019. – T. 15. – #. 2.
- [25] Klimov A. A., Zarechkin E. Ju., Kuprijanovskij V. P. O cifrovoj jekosisteme sovremennogo universiteta //Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. – 2019. – T. 15. – #. 4.
- [26] Kuprijanovsky V. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 3. – S. 55-74.
- [27] Klimov A. et al. On smart technologies in ports and shipping as linked digital twins for shore and ship in a multimodal environment //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 3. – S. 75-91.
- [28] Learning Factory https://en.wikipedia.org/wiki/Learning_Factory#:~:text=Learning%20Factories%20are%20designed%20on,product%20%20and%20the%20employees.
- [29] International Association of Learning Factories <https://ialf-online.net/>
- [30] Procedia Manufacturing <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-manufacturing/vol/45/suppl/C>
- [31] Ferrario A. Design, development and applications of a learning factory at the university of applied sciences and arts of southern switzerland. – 2020.
- [32] MirrorLabs <https://mirrorlabs-ide.wixsite.com/mirrorlabs>
- [33] BIM GAME <https://bimgame.eu>
- [34] Dallasega P. et al. BIM, Augmented and Virtual Reality empowering Lean Construction Management: a project simulation game //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 49-54.
- [35] Lugaresi G., Frigerio N., Matta A. A New Learning Factory Experience Exploiting LEGO For Teaching Manufacturing Systems Integration //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 271-276.
- [36] Nelson S. X. et al. Development of a 3D Interactive Training Platform for Assembly of Bogie Unit in the Railcar Learning Factory //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 386-391.
- [37] Sadaj E. A., Hulla M., Ramsauer C. Design Approach for a Learning Factory to train Services //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 60-65.
- [38] 5G-SMART <https://cordis.europa.eu/project/id/857008> <https://5gsmart.eu/>
- [39] 5G! Drones <https://cordis.europa.eu/project/id/857031> <https://5gdrones.eu/>
- [40] 5GCAR <https://cordis.europa.eu/project/id/761510> <https://5gcar.eu/>
- [41] Zhang W. et al. 5G and AI Technology Application in the AMTC Learning Factory //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 66-71.
- [42] Enke J. et al. Cooperation between Learning Factories: Approach and Example //Procedia Manufacturing. – 2020. – T. 45. – S. 222-227.
- [43] KOBZEV S. A. BEREZH LIVA JA KIBERFIZICHESKAJA PROIZVODSTVENNAJA SISTEMA TRANSPORTNOJ KOMPANII //Zheleznodorozhnyj transport. – 2020. – #. 9. – S. 4-13.
- [44] Du Plessis C. J. A framework for implementing Industrie 4.0 in learning factories: dis. – Stellenbosch: Stellenbosch University, 2017.