

# Онтологии кибер-физических систем национального цифрового двойника Великобритании и ВМ на примерах умных городов, железных дорог и других проектов

В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, А.А. Климов, А.П. Добрынин, А.В. Корзун, М.Г. Жабицкий,  
Н.Ю. Выходов, А.А. Лысогорский

**Аннотация**— Тема цифровых двойников привлекает сегодня огромное внимание как промышленности и транспорта, так и академических кругов. Цифровой двойник, являясь виртуальным представлением физического актива, позволяет описывать поведение актива в течение его жизненного цикла на основе двусторонней автоматической связи. Связывая реальное (физическое) представление и киберпространство, эта технология обеспечивает ряд преимуществ, в частности, сокращение затрат и времени на стадии проектирования, своевременное обслуживание продукта в течение жизненного цикла, прогнозирование отказов и возможность управления знаниями для оптимизации рабочих процессов организации на уровне производства и предприятия. Сейчас их часто понимают в более слабом смысле, как цифровые приближения для вещей, для которых они являются двойниками. Полноценные цифровые двойники - это не просто представления фабричных прототипов вещей. Они стремятся быть действенными симуляциями реальных экземпляров этих вещей в их реальных условиях, отражающими полную эволюцию их жизненного цикла, то есть работать в режимах практически реального времени. Таким образом, можно говорить о целом спектре решений в рамках понятий цифровых двойников от самых «легких» до самых «тяжелых». Последние могут уже иметь размерность города или страны. Именно о национальных цифровых двойниках и идет речь в данной статье.

**Ключевые слова**—ВМ, киберфизические системы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В процессе трансформации бизнесов и структур на основе широкого понимания информации, как нового

актива развития, цифровой двойник привлекает сегодня огромное внимание как промышленности и транспорта, так и академических кругов. Цифровой двойник, являясь виртуальным представлением физического актива, позволяет описывать поведение актива в течение его жизненного цикла на основе двусторонней автоматической связи. Связывая реальное и киберпространство, эта технология обеспечивает ряд преимуществ, в частности, сокращение затрат и времени на стадии проектирования, своевременное обслуживание продукта в течение жизненного цикла, прогнозирование отказов и возможность управления знаниями для оптимизации рабочих процессов организации на уровне производства и предприятия. Есть уже факт того, что новые кибер-физические решения невозможно протестировать на требования регуляторов и, в первую очередь, по безопасности старыми физическими методами на полигонах или в испытательных лабораториях, и в этом случае технология цифрового двойника становится незаменимой.

Цифровые двойники могут быть модной фразой в повседневной жизни, но они впервые появились задолго до нынешнего ажиотажа как узкоспециализированный инструмент для аэрокосмической инженерии или управления жизненным циклом продукта: в этих пределах они воспринимались как полноценные реплики численного моделирования какого-то физического устройства. Сейчас их часто понимают в более слабом смысле, как цифровые приближения для вещей, которым они «двойники».

Полноценные цифровые двойники - это не просто созданные в САПР или CGI-подобные представления фабричных прототипов вещей: они стремятся быть действенными симуляциями реальных экземпляров этих вещей в их реальных условиях, отражающими их полную эволюцию жизненного цикла, то есть работать в режимах практически реального времени. В своих более легких воплощениях цифровые двойники довольствуются тем, что представляют собой своего рода «универсальный цифровой магазин», предоставляя унифицированные и контекстуализированные высокоуровневые интерфейсы для цифровых приложений, которые должны всеми возможными

Статья получена 20 января 2021.

В.П.Куприяновский - РУТ (МИИТ) (email: v.kupriyanovsky@rut.digital)

Д.Е.Намиот - МГУ имени М.В. Ломоносова (e-mail: dnamiot@gmail.com)

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

А.П.Добрынин - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: andrey.p.dobrynin@gmail.com)

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

М.Г. Жабицкий - Высшая инженеринговая школа НИЯУ МИФ (email: jabitsky@mail.ru)

Н.Ю.Выходов - РУТ (МИИТ) (email:n.vyhodov@rut.digital)

А.А.Лысогорский - РУТ (МИИТ) (email: a.lysogorskii@rut.digital)

способами взаимодействовать с физическими объектами, система или системами систем (SoS). Они могут отказаться от зеркального отображения и мультифизического моделирования, такого как у тяжеловесных промышленных цифровых двойников, но они должны, что очень важно, но сохранить некоторые из своих конкретных и исторических характеристик представления. Таким образом, можно говорить о целом спектре решений в рамках понятий цифровых двойников от самых «легких» до самых «тяжелых». Последние могут уже иметь размерность города или страны. Это не является новым явлением, так как практика цифровых съемок целиком государств и предоставление их в цифровых ГИС моделях для общественных нужд довольно давняя. Так, например, США делает себе такое «селфи» раз в два года, но сегодня разнообразие, количество и качество информации в цифровых двойниках позволяет говорить о совсем другом возможном экономическом эффекте, чем раньше, конечно, при привлечении таких технологий, как BIM, AI, IOT, ML, CPS (кибер-физические системы), онтологии, блокчейн и другие. Но, несомненно, так как в основе такого развития находится все более семантически богатая информация, то ключевыми понятиями являются данные, их модели и онтологии.

Мы попробовали подобрать открытые российские публикации [1-29], которые в своем развитии показывают некоторую динамику развития мировых технологий приближения к цифровому двойнику, но они, скорее, дают только качественную картину происходящего во времени и понимание, что многое, что не называлось раньше цифровым двойником, сегодня уже стало бы так называться. Так, многие страны уже рассматривают технологии цифрового двойника как стратегическое направление своего экономического и технического развития, создавая планы строительства национальных цифровых двойников. Пока более или менее четкие контуры таких планов есть только у Великобритании и, возможно, у Финляндии [30], и, видимо, возможности более четких количественных оценок можно будет сделать несколько позже. Но странности в случае с публикацией [30] стоит изложить. Она касается применения военных истребителей, хоть компания – заказчик называется: «Бизнес Финляндии». Она, как заказчик, спонсировала значительное число диссертаций на тему цифрового двойника, которые оказались закрытыми для публики на длительные сроки. Последующие работы под эгидой компании «Бизнес Финляндии» не упоминают цифрового двойника и имеют другой формат и посвящены в 2021 году: «новому космическому бизнесу Финляндии» [31] и «Смешанной реальности из Финляндии» [32], то есть технологиям двойного назначения. Однако удалось разыскать еще одну работу в финских университетах, связанную с этой компанией и посвященную цифровому двойнику [33], и ее содержание также свидетельствует о возможности подготовке к программе национального цифрового двойника.

Являясь важным источником технической

информации [33], патенты часто используются для бизнес-аналитики, особенно для оценки конкуренции технологий, анализа рынка и конкурентов и выявления тенденций в области технологий. В работе [33] используется подход патентного ландшафта для обеспечения бизнес-аналитики цифровых двойников. В рамках исследовательского проекта DigiBuzz, финансируемого Business Finland, эта работа направлена на определение текущего состояния технологии цифровых двойников с точки зрения патентов и предположение о том, какое влияние она может оказать на возможности для бизнеса.

Для полного представления потенциального рынка для изобретений, связанных с цифровым двойником, в работе [33], было оценено распределение полных семейств INPADOC по странам. Безусловным лидером являются США, на долю которых приходится 43,85% патентных заявок. Остальные - Китай (17,13%), ВО (12,42%), Европейский регион (6,04%), Австралия (4,84%), Япония (2,48%), Бразилия (2,28%), Канада (2,28%), Германия (2,01%). Остальные страны имеют долю менее 2%. В целом, 0% компаний подают заявки в более чем 4 странах. Последнее означает, что патентные данные не показывают растущий потенциал рынка цифровых двойников во всем мире.

Лукавство цифр и данных, относящихся к состоянию темы национального цифрового двойника, авторы могут подтвердить личным опытом исследований диссертаций по этой теме. При декларируемом развитии в ЕС открытых исследований, значительное число диссертаций в Германии, Великобритании, Италии, Финляндии и других стран являются закрытыми на достаточно длительные сроки. Они не попадают в широкий научный оборот, сведения о них можно найти только в университетских репозиториях, что косвенно подтверждает высказанную выше мысль о том, что ряд стран рассматривают цифровой двойник в ключе стратегического и военного развития.

## II. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ: ПУТЬ ОТ УСТРОЙСТВА ДО ГОРОДА

Для того чтобы представить читателю свое представление о том, что такое цифровые двойники, и как они стали превращаться в национальные проекты, мы решили вначале дать это виденье нашему читателю, пояснив его далее на разных примерах.



Рис. 1. Цифровой двойник города как снимок [34]

Цифровые двойники возникли из-за особых требований нескольких критически важных систем промышленного производства и автоматизации. Они нацелены на предоставление исчерпывающей и точной информационной / числовой копии некоторых

передовых устройств, чтобы оптимизировать их работу и обслуживание, особенно когда исходные физические характеристики недоступны для прямого мониторинга и физического осмотра, например, спутника. Концепция цифрового двойника, зародившаяся в аэрокосмической отрасли, развивалась и расширялась, чтобы объединить возможности дистанционного зондирования и срабатывания с помощью Интернета вещей. Стало уже традицией изображать цифрового двойника в виде образа некоторого цифрового снимка парящего над физическим объектом. На рисунке 1 мы приводим такой образ города.

Классически различают прототипы цифровых двойников (DTP) и экземпляры цифровых двойников (DPI). DTP может развиваться из цифрового чертежа или модели САПР для создания полной числовой копии физического продукта, используемой для моделирования и возможной точной настройки перед его производством или от модели ВМ до готового здания и обслуживания в полном жизненном цикле. Нам больше интересуют DPI как цифровые двойники реальных экземпляров физических продуктов, которые могут быть встроены в более крупные системы, составляющие их среду, и так что они могут развиваться параллельно с их уникальным физическим аналогом во времени и пространстве. В идеале любая информация, которую можно получить при осмотре реального продукта, должна быть получена от его двойника. Даже если они могут начинаться с DTP общего продукта, DPI однозначно идентифицируются как двойники одного экземпляра продукта и дифференцируются на основе накопленной истории случайных взаимодействий этого продукта с его средой и его пользователями. Таким образом, ключевой особенностью DPI является то, что они не являются статическими описаниями или представлениями и связаны со временем и пространством. Они должны развиваться на всех этапах жизненного цикла своего аналога, проектирования, производства, эксплуатации и утилизации. Они также должны, что очень важно, действовать таким образом, чтобы имитировать своего физического аналога, учитывая его среду и системы, с которыми он взаимодействует. Вариант «теста Тьюринга» [34] был предложен для оценки верности такого полноценного DPI: эта «имитационная игра» сводится к тому, чтобы двойник был неотличим от своего физического аналога при осмотре с использованием различных сенсорных модальностей, и обеспечивать в контролируемых условиях ответы на входные стимулы и наблюдения за мгновенным состоянием, которые также были бы неотличимы от ответов, исходящих от физического продукта, который он представляет.

В минимальном представлении цифрового двойника, лишённого всех более продвинутых атрибутов «настоящего» промышленного цифрового двойника, как было представлено ранее, его можно рассматривать как простого информационного посредника, хранящего ключевую информацию о физических объектах, которые он представляет, и служащий в качестве интерфейса для мониторинга / активации этой системы. Исходная фраза

о цифровом двойнике часто сохраняется, даже если соответствующая модель строго минимальна или даже не существует.

Это пониженное признание двойников устройств (DT) было неявно принято в мире IoT, где интерфейс IoT / WoT к подключенному устройству, предоставляемый платформой, даже низкоуровневой, часто рекламируется как (голый) цифровой двойник этого устройства [12,21,22]. Представляется что это немного неверно, когда этот интерфейс ничего не делает, кроме пересылки с устройства потока необработанных данных, которые могут быть даже зашифрованы! Более актуально, когда устройство не является простым датчиком и включает в себя как датчики, так и исполнительные механизмы (например, подключенный бытовой прибор). В этом случае такой двойник в стиле IoT может соответствовать тому, что позволяет приложение для смартфона для этого устройства, инкапсулируя, по крайней мере, простую модель, подобную машине состояний, обуславливающую потенциальные действия на текущем состоянии устройства. Однако, когда онтологические технологии и модели данных соединяются с IoT в цифровой двойник, то появляются возможности новых и крайне выгодных прорывных технологий.

Другой популярный термин нашего времени - «Умные города» [5-8], которые уже стали в динамике своего развития столицами «цифровой экономики», так как они возникли в развитии всех стран и появились связанные с ним понятия, которые в Европе все больше приобретает новое название - «экономика знаний». Слово «умный» в какой-то мере уже сегодня можно рассматривать как не самое удачное (города и раньше не были «глупыми»). Так возникло еще одно понятие для городов - «цифровой двойник» (цифровые близнецы) - отражающее суть сегодняшнего состояния технологий и новой онтологии как городов, так и экономики. Сегодня и завтра эти инновации во многом будут определять развитие Европы и мира. Эти концепции реализуются через технологии, которые имеют, в том числе, европейские корни и являются развивающейся опорой ЕС, но идеи ее создания такой платформы развития, во многом, зародились в Великобритании. Об этом мы будем говорить далее, и они базируются в университетах, промышленности и принципах открытости в текущих условиях, являясь локомотивом развития экономики знаний и соответствуют вызовам и проблемам нашего времени.

Человечество давно живет в городах, но веками города были местом централизации, силы и богатства, нежели местом жизни наций. В конце XX и начале XXI века ситуация резко изменилась, и ныне уже большая часть человечества (более 50%) переехала в города [5-8]. Эти показатели гораздо выше, если брать отдельные страны, и численность населения городов может быть 90% от населения некоторых стран. В России этот показатель уже давно перевалил за 70 процентов, и он, как и во всем мире, продолжает расти.

Наша планета меняется быстрее, чем когда-либо в

истории человечества. Потребовалось 200 тысяч лет назад эволюции, чтобы к 1800-м годам население достигло одного миллиарда; за 200 лет, прошедших с тех пор, мы увидели семикратный рост жителей планеты, к 2050 году увеличение численности населения до десяти млрд. человек. С таким ростом населения идет взрывная урбанизация: в 1800 году 3% населения мира жили в городских условиях, а к 2050 году уже 70% становятся городскими жителями. Известно, что мегаполисы были населены как населенные жители более 10 миллионов человек. В 1950 году был только один город-мегаполис (Нью-Йорк), а сегодня их число приближается к 50, как в промышленно развитых, так и в опасных странах. Самый большой рост мегаполисов сегодня происходит в Китае, а завтра - в Индии и Нигерии. Таким образом, в умных мегаполисах условия оказались идеальными для цифровой экономики, и сегодня ее большая по производимым объемам часть находится именно в этих городах.

Но в связи с такой взрывной урбанизацией, мы получили города с неадекватным жильем, с недостаточной инфраструктурой и услугами. Эти города уже не справляются с переполненными транспортными системами, плохим водоснабжением и санитарией, растущим загрязнением и усиливающими бедственными последствиями стихийных факторов. Появились серьезные вызовы для человечества - такие как резкое изменение климата и новые пандемии.

Все это означает лишь одно: мы быстро исчерпываем жилое пространство поверхности Земли, и это подогревает ненасытные аппетиты, чтобы использовать пространство либо под землей, либо в море, однако вовсе не решает кардинальных проблем городов-мегаполисов.

Таковы последствия столь стремительного переезда человечества в города и, как говорят, такой переезд подобен пожару. Этот процесс развития мегаполисы, в которых живут десятки миллионов человек. Помимо упомянутых заторов на дорогах, роста ранее мало заметных заболеваний, изменений в социальных сетях, есть и менее известные проблемы (например, возникновение в перенаселенных городах тепловых островов, температура которых на 10–12 градусов выше, нежели в окружающей среде).

Оказывается, что основная единица города – дом потребляет слишком много энергии (более 40 процентов от городского бюджета), служит источником загрязнения и крайне дорог в своем содержании. Конечно, в городе есть не только дома, но и дороги, тротуары, площади создавались для перемещений людей и грузов в городах, в соответствии с расчетом и к домам. После того, как производство автомобилей приобрело массовый характер, и они стали вездесущи, планировки городов в XX веке стали их применение, а мегаполисы начали преобразовывать города в среде обитания для машин. В начале XXI века стало очевидно, что такая автомобильная планировка больших городов увеличивает загрязнение в них и, в соответствии с указанием, является всплеска многих заболеваний. Асфальт, заливающий городские пространства - далеко

не идеальный экологический материал. Затраты на здравоохранение в странах с подобным ускорением возникло резко, и стало ясно, что властям и гражданам нужна новая парадигма развития.

Так возникла новая концепция «живых городов» или городов, как места для жизни людей, а вовсе не для автомобилей или индустрий. Новая парадигма подразумевала использование всеми общественного транспорта, введение жестких требований на топливо, экологически правильных материалов для строительства, переработки отходов мусора в рамках циклического производства, всемерное озеленение, замену, где это возможно, сплошного асфальта на брусчатку, чтобы дать возможность проникнуть в почву и хотя бы в некоторой мере восстановить природный порядок в городах. Зеленые насаждения оказались первым уровнем защиты горожан от загрязнений, пыли и шума. Разумное применение деревьев, газонов начало происходить на улицах, набережных и, конечно, в парках.

Дома, как основная единица города, также должны быть изменены. Они должны уменьшить потребление энергии и уменьшить выбросы. Добиться этого удалось путем превращения обычного жилого дома в «умный, энергосберегающий». То есть от простых задач оптимального управления энергопотреблением (т.е. выключить свет, или минимизировать отопление), эта концепция перешла в активную фазу: сам дом стал устройством энергии за счет преобразования солнечного света в электричество и использование энергии земных недр - стоковая или метрополитена - через тепловые насосы. Появилась возможность накапливать энергию от непостоянных возобновляемых ресурсов. Так начала изменяться базовая единица «умного города» - жилой дом, превращаясь, как система управления, в цифровой двойник – единицу цифрового двойника города. Такой реагирующий на разные изменения, дом не может работать, если не будет иметь цифровую систему управления, которая уже управляет не человеком, а принимает решения самостоятельно: что-то включить или выключить, даже когда обитателей нет дома.

Оптимальность и экономичность домов в Европе стала одним из основных столпов политики стран цифровой экономики. Сегодня европейское здание отвечает за выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу на 36% и на 55% электроэнергии. В Европе решили, что нужна сбалансированная система не только пассивного энергосбережения в жилых домах. Директивы ЕС использует инфокоммуникационных и интеллектуальных технологий для эффективной работы системы эксплуатации и внедрения систем управления зданиями - как альтернативу прежним физическим действиям без обратной. К примеру, интеллектуальные технологии продвигаются через требования к установке систем автоматизации и управления зданиями и устройствами, которые регулируют температуру на уровне помещения. Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии экономики знаний имеют большой потенциал для снижения энергопотребления зданиях до 25-30% от текущих уровней или как

декларируют нормативы в Европе, почти до нулевого потребления энергии. Есть уже большие в Европе здания, которые вообще не потребляют энергию, и их количество растет в рамках развития «умных цифровых двойников городов». От домов с почти нулевым потреблением энергии начался переход к таким же районам и городам. Заметим, что потребление энергии в городах жизненном цикле потребления энергии является самой большой статьёй экономики, и почти нулевое потребление энергии в городах является наглядным успехом «экономики умных цифровых двойников городов». Принципы следования природе и соответствия ей фактически определяют построение цифрового двойника и систем входящих в него, так как это необходимо для нормального устойчивого развития и именно это определяет во многом вектор его успешности.

Конечно, жилой дом - это огромная часть экономической модели города, но его развитие и существование погружено также в городскую среду. Так, по образу и подобию «умного дома» и сам город становится «умным» за счет использования режима цифровых технологий, которые стали работать в режимах близких к реальному времени, с целью сокращения потребления энергии на общие нужды города. Как и в доме, в городе тоже нужно выключать освещение, когда светло, не поливать улицы, когда идет дождь, беречь тепло и т.п. Стоит сказать, что инфраструктура городов уже сегодня представляет самый большой актив человечества. Развитие этой огромной инфраструктуры продолжается быстрыми темпами. Соответственно, развивается и система стандартов «умных городов», в том числе уже и в России [35-39]. Но даже самые богатые страны не могут сделать более одного процента физических изменений в физической инфраструктуре своих города в год. Чтобы двигаться вперед, мир, перешел к быстрому развитию цифровых систем управления или «цифровых устройств», которые базируются на двойных устройствах интернета вещей (IoT), являющихся, по сути, сенсорами с мобильной связью. Такое устройство позволяет «рапортовать» в информационных системах и получать обратно управляющие команды, выполняющиеся специальным исполнительным IoT-актуратором, производящим соответствующие действия (например, включить телевизор, отопление или освещение). Стандарты Интернета вещей также приняты в России и по большей части вступили в силу [40-45].

Количество адресов IoT в давно уже превысило количество адресов людей, сами устройства начали образовывать между собой новый тип локальных сетей - краевые сети (в такой сети электрическая розетка может стать центром сети цифрового управления домом и даже частью цифрового двойника и об этом далее.)

Инфраструктуры - то есть города, дороги, энергетика, водное хозяйство, аэродромы и т.п. - были и будут использоваться в экономике и в реальной жизни и работе людей. Затраты на их содержание фактически составляет львиную долю бюджетов как стран, так и городов. Сегодня совершенно немыслимо их развитие

без учета цифровых трансформаций и самых подробных и точных стандартов. Следуя им, которые также становятся «умными» или «цифровыми» - по образу и подобию «умного» дома или города, увеличивающей долю цифровой экономики, которая во многих странах уже измеряется десятками процентов от ВВП.

Внедрение таких инноваций трансформирует городской уклад жизни невероятно быстрыми темпами и дает огромные преимущества жителям городов. Однако это сопровождается новыми цифровыми угрозами и опасностями.

«Умный город» (или Smart Cities) - это набор технологических инноваций и инициатив, с помощью использования датчиков и большей возможности подключения мобильной связи для увеличения сбора данных. Основная: «умный город» должен улучшить жизнь более эффективным использованием данных, позволяющих устойчивее управлять инфраструктурой и услугами, имея в виду парадигмы живого города и возможности цифровых двойников.

Когда говорят об «умных городах», то весьма справедливо имеют в виду крупные мегаполисы. Но и у меньших по размеру городов есть свои плюсы и конкурентные преимущества; принципы «умных городов» Также вне зависимости от размера.

Наука и техника вызывающими агентами сегодняшних изменений и роста. В цифровой экономике новые технологии нарушают работу бизнес-модели. Некоторые процессы настолько сложны, что вы не можете рисковать неудачей, экспериментируя с новым, можете выгодным подходом. Для понимания этого можно использовать старую аналогию - «невозможно поменять колеса в движущемся поезде». Новый дизайн может принести ряд преимуществ ценных бумаг, но для того, чтобы понять эти преимущества, в качестве модели можно использовать цифровой двойник. Более того, в очень многих случаях требуются натурные испытания инноваций по самым строгим правилам, но они могут получиться невероятно дорогими или просто невозможными. Тут также на помощь приходит цифровой двойник, с помощью его ускоряется внедрение новшеств в практику, и происходит резкий рост экологических, экономических и социальных показателей.

Цифровой двойник может быть установлен как постоянно меняющийся цифровой профиль города, используя исторические и наиболее актуальные данные о физическом объекте или процессе, что позволяет оптимизировать эффективность бизнеса без физического вмешательства в сложные процессы. Он основан на огромном объеме накопленных данных, полученных в ходе измерений целого ряда показателей объекта в реальном мире. Анализ накопленных данных позволяет получать точную информацию о производительности системы, а также приводить к выводам о необходимости изменений, как в производственном продукте, так и в сам процесс производства или управления «умным домом» и «умным городом». Таким образом, посредством четкой обратной связи и всё большего объективного учета реальной физической жизни через

цифровых двойников экономика «умного города» получает новое развитие и преимущества.

Цифровые двойники в совокупности с другими технологиями не случайно к «подрывным технологиям», т.е. к технологиям, изменяющим процедуры бизнеса и экономических представлений. Иллюстрации этого приведем некоторые примеры. Ведущий цифровой инструмент строительства и реконструкции домов, заводов и инфраструктур - «информационное моделирование» (так оно названо в изменениях к Градостроительному Кодексу РФ, в других странах оно называется - BIM) - позволяет, по опыту Великобритании, на 33% снизить стоимость строительства, на 50% уменьшить его время и, что очень важно для живых и умных городов, на 50% уменьшить вредные выбросы (строительство ответственно, примерно, за 40% всех вредных загрязнений и выбросов). Заметим, что именно BIM организует изменения в физических частях цифровых двойников, кроме сказанного выше, его ключевая роль в экономике знаний [3-5,7-11,17,22,24,25].

Для реализации концепции «умных городов», на их «информационное моделирование» и функционирование уже выпущены российские стандарты (они в части BIM уже вступили в силу, а на «умные города» вступят в силу с начала 2021 года [35-39]). Их воплощение непредставимо без решения транспортных проблем городов. Статистика показывает, что более 90% аварий на транспорте происходит по вине управления ими человеком. Это показывает, что человек как биологический вид близок к естественным пределам своих возможностей управления современным транспортом. Кроме того, устройства, которые предполагают наличие пилота или машиниста, увеличивают их стоимость. Сегодня мы уже видим начавшийся переход городов и стран к автономному транспорту, который выполняет свои функции без непосредственного человеческого участия.

Промышленные предприятия с ограниченным миром людей (горнорудные предприятия, лесное и сельское хозяйство, логистика и т.п.), постольку уже имеется и статистика. Например, для лесовозов в Швеции она показывает снижение стоимости производства грузовиков (кабины управления). С заменой бензинового двигателя на электрический стоимость снижается примерно вдвое. На открытых карьерах Палирба по добыче железной руды в Австралии уже десять лет использует карьерные самосвалы без водителей, а за последние годы к ним прибавились безлюдные бурильные установки, загрузчики взрывчатки и железнодорожные составы без машинистов. И каждое такое изменение только повышало конкурентоспособность предприятия.

Как мы говорили выше, сегодня самый большой материальный актив - это инфраструктура. С введением автономных транспортных средств (то есть без управления человеком) возможности ее также скачкообразно растут. Расчеты американских ученых показывают, что - при условии изъятия человека из системы управления автомобилем - скорость движения

увеличивается втрое, количество происшествий практически равно нулю (соответственно, и количество смертей и травм также будет малым), а скорость движения возрастет. Вредные выбросы также могут быть сведены к нулю при использовании водорода и электричества вместо ископаемого топлива.

Эти фантастические показатели достигаются за счет уменьшения расстояния между движущимися объектами в среде цифрового двойника. Важно, что это позволяет включить электронное переоборудование инфраструктур в цифровые двойники как естественное или инвазивное развитие без разрушения окружающей среды.

Для железных дорог, в Европе и Китае уже перешедших с аналоговых систем управления на европейскую цифровую систему ERTMS, статистика показывает возможности увеличения емкости примерно на 70%, при увеличении скорости и пунктуальности поездов. Цифровая система управления воздушными судами в аэропорту, согласно статистике, позволяет увеличить их емкость примерно на 60%. Не менее впечатляющие достигаются для морского и водного транспорта. Таковы макроэкономические показатели развития подходов к технологиям цифровых двойников, группа стандартов на цифровые двойники так же принята в России [55-59].

Для тех, кто использует транспорт (т.е. для нас с вами), само понятие вида транспорта, при переходе на цифровые системы управления и цифровые двойники, перестает существовать, и мы можем использовать совершенно новые услуги, сшивающие точно в срок старые транспортные услуги в единую цепь, известную сегодня как «мобильность как сервис». Для грузов такое соединение становится «физическим интернетом», внедрение которого в Европе завершается к 2030 году. «Физический интернет», например, решает проблему пустопорожнего пробега, который сегодня составляет 40% от всего объема перевозок, сводя его к нулю.

На значительное число составляющих этих технологий и на сами технологии сегодня в России выпущены Федеральные законы, Постановления Правительства и стандарты. Первоначальные стандарты «цифрового двойника», о котором говорят выше, уже опубликованы и вступают в действие в действие в январе 2021 года. Так что реальность достижений и выгод экономики знаний, доступная в других странах, становится возможной и обязательной к применению и в нашей стране.

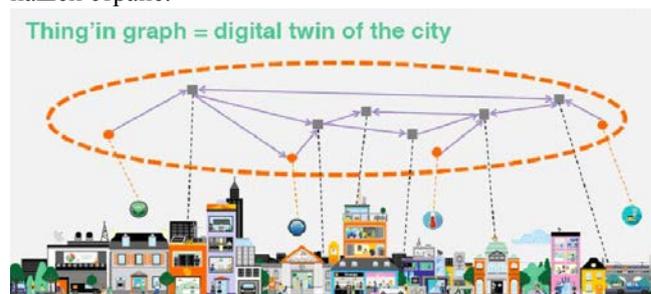


Рис. 2. Расширенный Интернет вещей или ТТ для умного города [34]

Сетевые устройства IoT, представленные текущими сетями и платформами IoT / WoT, являются лишь основным набором физических объектов, подлежащих «двойникованию». Описание физической среды становится на порядки богаче за счет связывания через эти первичные узлы всех видов не связанных напрямую «вещей», будь то мебель в здании, деревья в парке или водопроводные трубы в городе. Единственное требование состоит в том, чтобы эти вещи индивидуально контролировались подключенными к сети датчиками и / или, возможно, управлялись подключенными к сети исполнительными механизмами, которые, как объяснялось ранее, являются «сдвоенными» подключенными устройствами. Это то, что в [34] предложили назвать «фенотропным» или «стигмергическим» звеном, составляющим расширенный Интернет вещей, помимо подключенных устройств. И эти не связанные между собой вещи и устройства можно рассматривать как атомарные физические системы или физические системы черного ящика, представленные одним цифровым двойником, который фиксирует их интерфейсы, их свойства и, возможно, их состояние, как часть автономного программного обеспечения, которое поддерживает это цифровое представление. Следуя [34] мы предлагаем использовать фразу «Thing Twins» (сокращенно TT), чтобы уловить природу этих представителей вещей, которые фиксируются как «атомарные», что означает, что их составляющие подсистемы не представлены, в свою очередь, как полноценные двойники. Как это может выглядеть для города можно увидеть на рисунке 2.

Представленные ранее классические и расширенные точки зрения на IoT, сфокусированные на атомарных устройствах и «вещах», недостаточны для отражения соответствующей структуры системного уровня сред IoT, охватывающей все вложенные и взаимосвязанные подсистемы общей референтной системы, такие как, например, системы безопасности или HVAC в здании, системы распределения воды, освещения или управления дорожным движением в городе. Нам необходимо сопоставить каждую из этих систем с разными видами, которых мы предлагаем определить следуя [34] как «Системные двойники» (сокращенно ST).

Так же, как двойники устройств и двойники вещей, эти «двойники систем» не являются полноценными цифровыми двойниками (в первоначальном смысле слова) систем, которые они представляют. Они охватывают лишь некоторые ключевые структурные особенности этих систем, такие как взаимосвязи и свойства их компонентов, а также, что особенно важно, их собственные взаимоотношения с одноранговыми системами на верхнем уровне вложенности.

Этот уровень описания в целом соответствует понятию киберфизических систем (CPS), которые изначально были определены как эволюция традиционных (закрытых) промышленных систем управления в эпоху открытых сетей [1,2]. Они начали с классических промышленных систем, которые были не

только замкнутыми, но и на 100% спроектированы сверху вниз, при этом каждый компонент и подсистема точно подогнаны как часть общей тесно связанной системы, которую они составляют. Интеграция CPS с открытыми сетями и платформами, унаследованными от IoT, - это этап, на котором мы сейчас находимся, который также расширит узкий диапазон современного IoT, поскольку он начался с потребительских устройств и, в основном, сбора данных снизу вверх (с датчиков), в сторону большей интеграции с приводами и управления в реальном времени [1,2].

Системы двойников системы (SoST) или графы и онтологии [14-20], состоящие из вложенных «Системных двойников» и лежащих в их основе «Близнецов-вещей», можно рассматривать на их собственном уровне и масштабе как всеобъемлющего двойника «Системы систем». В отличие от цифрового двойника системы, производимой сверху вниз, он не может начать свою жизнь как единый образец общей схемы, потому что не существует, по определению, какой-либо такой схемы для системы систем. Система графа-двойника (онтология) систем должна развиваться постепенно и органично, снизу вверх, как агрегирование и взаимосвязь частичной информации от ее узлов «Двойников Вещей» и «Двойников систем».

Среды Интернета вещей (например, здания, промышленные предприятия, города) объединяют несколько источников данных (например, датчики) и пользователей данных (приложения IoT / CPS), для которых эта среда является как физическим якорем, так и общим знаменателем. Комплексная модель этой среды необходима для поддержки совместного использования, консолидации и обогащения этих данных и для предотвращения того, чтобы каждое из этих приложений оставалось индивидуально разработанным и вертикально интегрированным в своем собственном хранилище с использованием собственных эксклюзивных источников данных.

Эволюция CPS [1,2] в сторону «систем систем» столь же важна, как и предшествующая эволюция от закрытых систем управления к открытым CPS: переход от традиционных систем, проектируемых сверху вниз, к открытым, собранным снизу вверх и слабосвязанными «системами систем». В собственном смысле, системы систем, такие как города или большие здания, являются инженерным аналогом «сложных систем», которые возникли с 1980-х годов как далеко идущая трансдисциплинарная концепция из физических, биологических и социальных наук. Стандарты на CPS в России также приняты [73,74].

И здесь снова появляются идеи онтологии и графового представления. Графы и онтологии были в ходу с момента консолидации области «Сетевые науки» в е 1990-е годы, они стали базовой моделью для анализа и построения сложных систем. Они также должны стать центральной моделью для анализа и работы систем систем. Эти модели никоим образом не предназначены для репликации всей системы в виде цифрового двойника: они только фиксируют соответствующие взаимозависимости между подсистемами для поддержки

анализа потенциально непредвиденных возникающих явлений, которые могут возникнуть в результате взаимодействия систем, которые не были разработаны, чтобы действовать совместно.

Объединение «Thing Twins» (TT) и «System Twins» (ST) в многомасштабный онтологический граф показывает пример на Рисунке 3, демонстрируя, как узлы «TT», обозначающие отдельные физические объекты, то есть вещи и устройства (черные прямоугольники), фиксируются на графике вместе с их взаимными отношениями (черные ромбы) и их свойствами (черные овалы для предиката) / ключ свойствами, шестиугольник для целевого значения).

Подграфы общего TT (черного) графа, соответствующие релевантным подсистемам,

сопоставляются с узлами «ST» наложенного красного графа через специальное отношение «isNodeOfGraph» (красный ромб). Эта связь применяется ко всем узлам в соответствующем подграфе, но отображается только один раз, чтобы не загромождать диаграмму. Узлы ST сами попадают в графические взаимосвязи, такие как отношения, выражающие то, что система управления городским движением может налагать ограничения на систему управления светофорами, или включение этих (распределенных) систем в общий граф, охватывающий Умный город как system через отношение isSubGraphOf, что соответствует, например, российскому стандарту [35] и изначально разработанным представлениям [14].

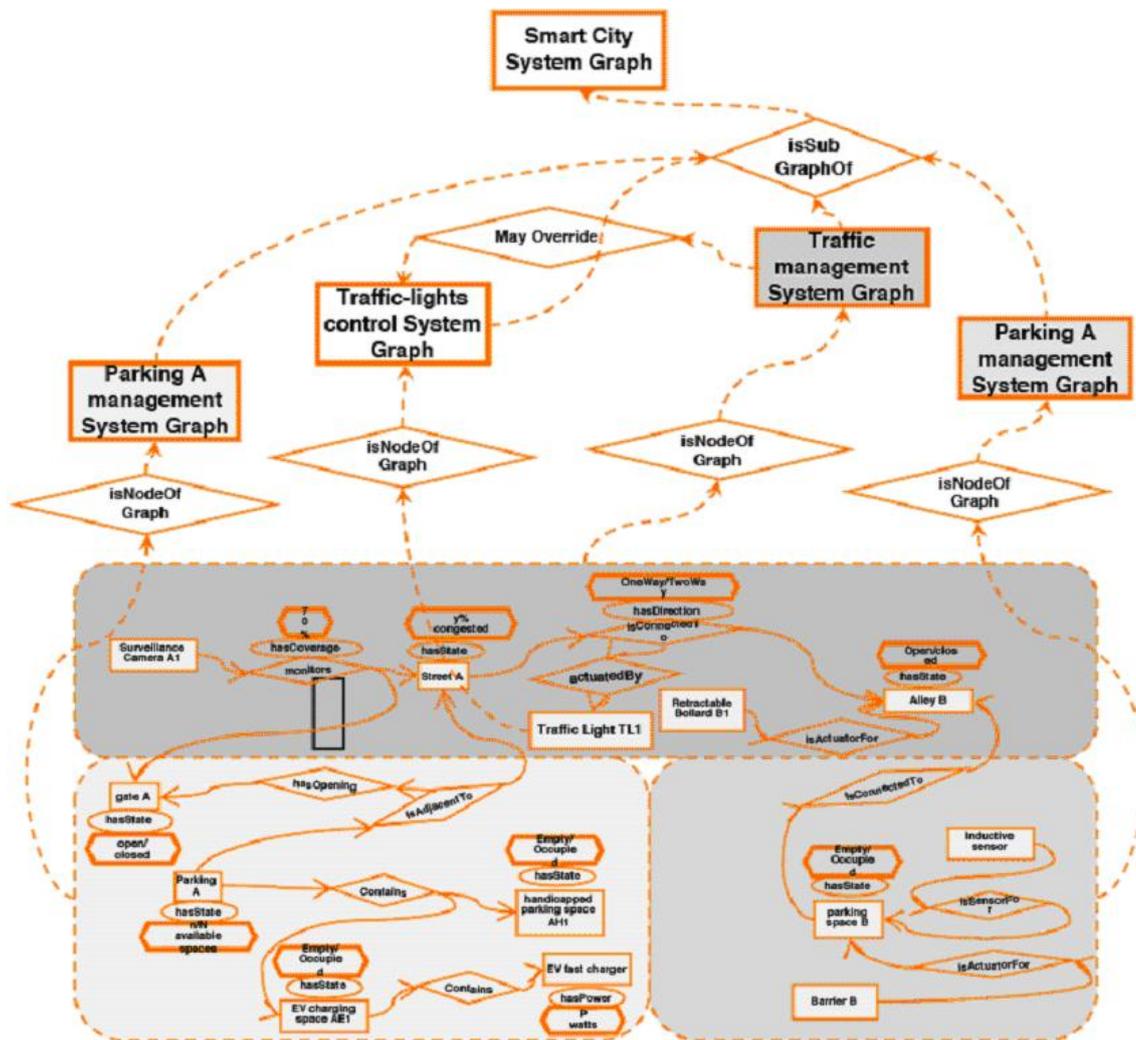


Рис. 3. Пример Smart City в виде онтологического графа [34]

Графовые модели выбора для захвата двойников системы представляют адекватную модель графа для представления сред IoT / WoT в целом как киберфизических систем. Системы должны иметь достаточный уровень выразительности, чтобы соответствовать структуре этих сред. Графы CPS имеют своего рода семантику на основе подобия, когда они предназначены для отражения структуры физической сети, такой как, например, транспортная сеть. Эта

семантика применяется к графам в целом и не сводится к семантике «на каждый ресурс», для описания которой предназначен RDF. Выбор, сделанный проектом ЕС Thing'in, одобренным группой ETSI CIM для модели данных управления информацией контекста NGSI-LD, заключается в том, что графы свойств являются лучшей существующей метамоделью для захвата этих графов CPS [34]. Графы свойств - это класс направленных, помеченных и атрибутированных мультиграфов, неофициально определяемых как модель общего знаменателя графовых баз данных. До определения метамодели NGSI-LD ETSI [14] им не хватало

стандартизованного формального основания, поскольку они возникли в результате использования специалистами по базам данных в качестве компромисса для сохранения знакомых примитивов «ключ-значение» или объектных примитивов в графе. Графы свойств позволяют, что очень важно, выделить в качестве отношений (и, таким образом, первоклассных граждан метамодели) те дуги, которые представляют фактические физические связи между физическими объектами, которые сами представлены в виде узлов. Простые свойства (соответствующие «свойствам типа данных» OWL) напрямую связаны как с сущностями, так и с отношениями, как атрибуты в объектно-ориентированной модели. Как ни парадоксально это может показаться, в графе свойств свойства обычно не представлены в виде дуг самого графа! Это сохраняет граф незагроможденным и «чистым», позволяя выделить наиболее важное: отношения как представления физических связей между сущностями, составляющими структурные основы системы. Это позволяет запускать теоретико-графовые алгоритмы, основанные на этой структуре: это могут быть чрезвычайно классические алгоритмы, такие как вычисление максимального потока или инструменты анализа сложности, такие как оценки средней длины пути или распределения степеней, или более сложные инструменты из теории спектральных графов. Темы, относящиеся к применению онтологий и графов для этих контекстов можно посмотреть в [14-22].

С развитием систем сбора данных, информационных технологий (ИТ) и сетевых технологий производство вступило в цифровую эпоху. На фоне цифровизации обрабатывающая промышленность также сталкивается с глобальными проблемами, связанными с быстрым развитием цифровых технологий. В этом контексте были инициированы передовые производственные стратегии, такие как Промышленный Интернет, Индустрия 4.0 и соответствующая инициатива в Китае. Общей целью этих стратегий является достижение интеллектуального производства [46], которое также

широко известно как умное производство (российские стандарты – [55-59]) или интеллектуальное производство, которое сегодня также развивается в умных городах. Интеллектуальное производство используется с 1980-х годов на стыке искусственного интеллекта (ИИ) и производства [46]. Однако по мере превращения ИИ в ИИ 2.0 интеллектуальные технологии, такие как Интернет вещей (IoT), облачные вычисления (CC), аналитика больших данных (BDA), киберфизические системы (CPS) цифровые двойники (DT), становятся все более популярными, занимая центральное место в интеллектуальном производстве нового поколения [46]. Производство переходит от интеллектуального производства, основанного на знаниях, к интеллектуальному производству, основанному на данных и знаниях, в котором термин «интеллектуальный» относится к созданию и использованию данных [46]. Таким образом, интеллектуальное производство можно рассматривать как новую версию умного производства, в которой подчеркивается использование передовых информационных и коммуникационных технологий и расширенной аналитики данных. Термин интеллектуальное производство относится к будущему состоянию производства, при котором передача и анализ данных в реальном времени на протяжении всего жизненного цикла продукта, наряду с моделированием и оптимизацией на основе моделей, создают интеллектуальные возможности для положительного воздействия на все аспекты производства. [46]. Киберфизическая интеграция является важной предпосылкой для интеллектуального производства, а также его основой. Как предпочтительные средства такой интеграции, CPS и DT привлекли пристальное внимание академических кругов, промышленности и правительства. Интеллектуальное производство можно считать специализацией известных технологий CPS и DT (рисунок 4).

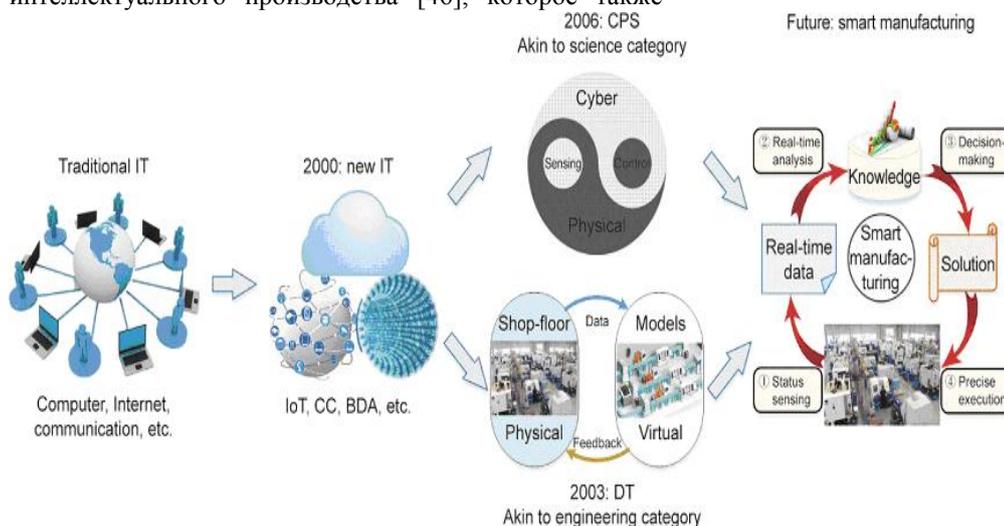


Рис. 4. Миграция CPS и DT к интеллектуальному производству [46]

### III НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ВЕЛИКОБРИТАНИИ

Программа национального цифрового двойника

(NDTr) реализуется Центром цифровой Британии (CDBB), партнерством Кембриджского университета и Департамента бизнеса, энергетики и промышленной стратегии Правительства. Запущенный казначейством Ее Величества в июле 2018 года, NDTr был создан для предоставления ключевых рекомендаций отчета Национальной комиссии по инфраструктуре за 2017 год «Данные для общественного блага» [47].

Высококачественные и безопасные данные могут улучшить построение инфраструктуры, управление ею, ее эксплуатацию и, в конечном итоге, вывод из эксплуатации, считают в этой программе. Поэтому крайне важно, чтобы эти данные собирались и эффективно использовались для обеспечения экономии для заинтересованных сторон и обеспечения социальных выгод для всех. Эта направленность отражена в задачах NDTr:

Создание национального цифрового двойника - экосистемы подключенных цифровых двойников для достижения лучших результатов в нашей искусственной среде;

Позволяет обеспечить структуру управления информацией - для обеспечения безопасного, устойчивого обмена данными и эффективного управления информацией;

Согласование целевой группы по цифровой платформе - для обеспечения координации и согласования между ключевыми игроками.

NDTr создал Целевую группу по цифровой платформе (DFTG) в качестве консультативной группы. DFTG состоит из руководителей высшего звена в отрасли, научных кругах и правительстве и возглавляется Марком Энзером, главным техническим директором Mott MacDonald. DFTG подотчетен правительству Соединенного Королевства через Стратегический консультативный совет CDBB. Последнее обеспечивает его прямую поддержку и координацию с властными структурами.

В Великобритании считают, что NDTr CDBB - ключевой шаг в цифровой трансформации инфраструктуры и строительства, базирующийся на более ранних программах BIM, умных городов и других направлениях развития цифровой экономики. При поддержке правительства он (NDTr) объединяет коллективные знания профессионалов в области строительства и различные мнения экспертов, чтобы создать основу, которая позволит другим продвигать изменения и принимать связанных цифровых двойников в своих собственных организациях. NDTr управляет Digital Twin Hub, совместным и поддерживающим веб-сообществом для тех, кто владеет или разрабатывает цифровых двойников в созданной среде.

NDTr работает с будущими пользователями и первыми пользователями цифровых двойников, чтобы разработать структуру управления информацией для подключения цифровых двойников, чтобы принести пользу всем. Создание рамок является неотъемлемой частью современной стратегии правительства Великобритании в области промышленности и строительства.

Отмечаются следующие преимущества национального цифрового двойника:

Национальный цифровой двойник предлагает лучшие результаты для всех заинтересованных сторон на фунт, потраченный в течение всей жизни в искусственной среде:

Польза для общества: прозрачное взаимодействие с заинтересованными сторонами. Лучшие результаты для конечных клиентов - общественности - налогоплательщиков / плательщиков счетов / плательщиков проезда / избирателей. Повышение удовлетворенности клиентов и повышение качества обслуживания за счет более производительной инфраструктуры и предоставляемых ею услуг.

Выгоды для экономики: повышение национальной производительности за счет более производительной и отказоустойчивой инфраструктуры, работающей как система. Улучшенное измерение результатов. Лучшие результаты на всем жизненном цикле. Повышенная информационная безопасность и, следовательно, физическая и кибербезопасность персонала.

Преимущества для бизнеса: новые рынки, новые услуги, новые бизнес-модели, новые участники. Повышение эффективности бизнеса за счет более производительной инфраструктуры. Оптимизированная эффективность доставки, приносящая пользу всей цепочке создания стоимости строительства - инвесторам, владельцам, управляющим активами, подрядчикам, консультантам, поставщикам. Снижение неопределенности и лучшее управление рисками.

Выгоды для окружающей среды: меньше разрушений и отходов. Больше повторного использования и большая эффективность использования ресурсов - ключевой фактор круговой экономики в искусственной среде.

Первоначальная деятельность в проекте NDTr была направлена на то, чтобы согласовать отрасль и правительство с единым определением и подходом к управлению информацией, чтобы участники могли открыто и безопасно обмениваться данными между будущими цифровыми двойниками. Это включает в себя:

Принципы Двойников (2018) [48] - это документ, в котором изложены предлагаемые принципы, которыми должен руководствоваться национальный цифровой двойник, и структура управления информацией, которая делает это возможным;

Эти принципы фактически являются моралью и совестью системы управления информацией и национального цифрового двойника. Чтобы эти две инициативы были и оставались на благо общества, им необходимы твердые основополагающие ценности, которыми они будут руководствоваться.

В этих ценностях закреплено представление о том, что все цифровые двойники должны иметь четкую цель, должны быть надежными и должны эффективно функционировать. Все Принципы Двойников вытекают из этого. Они намеренно просты, но их последствия далеко идущие и сложные. Они описывают намерение, но не зависят от решений, чтобы стимулировать

инновации и развитие с течением времени (Рисунок 5).

Принципы Двойников будут продолжать развиваться по мере развития национального цифрового двойника, и

мы стремимся вносить постоянный вклад в их развитие со всего сектора.



Рис. 5. Принципы Двойников, разработанные CDBB [48]

Перечислим материалы и события, ставшими по нашему мнению вехами в развитии NDTp:

1. Дорожная карта NDT 2020г. [49], план с приоритетами для пяти основных потоков, ответственных за предоставление структуры управления информацией.

2. Запуск Digital Twin Hub (2019 г.), интернет-сообщества для первых пользователей цифровых двойников, которые могут учиться через обмен и прогрессировать на практике (<https://digitaltwinhub.co.uk/>);

3. Путь к IMF (2020), технический документ и сводный документ о предлагаемом техническом ядре для системы управления информацией, существенно детализирует подходы к реализации цифрового двойника [50].

Так как создание цифровых двойников достаточно дорогой процесс, то IMF стремится создать строительные блоки, необходимые для обеспечения эффективного управления информацией в созданной среде на протяжении всего ее жизненного цикла. Он обеспечивает безопасную и надежную совместимость данных, что составляет основу национального цифрового двойника (NDT). Это ориентир для облегчения использования данных в соответствии с соображениями безопасности, правовыми, коммерческими, конфиденциальными и другими соответствующими проблемами. Подход, начатый в ЕС как построение базовых онтологических блоков для работы с информацией [18], применяется в IMF для получения лучших экономических результатов, как уже доказавший свою эффективность.

4. Два обзорных документа: «Обзор онтологий верхнего уровня» [51] и «Обзор отраслевых моделей

данных и библиотек справочных данных» [52] составляют основу для работы, описанной в работе «Пути к концепции управления информацией» (IMF) [49]. В обзорах выявляются требования и предлагаются онтологические варианты выбора модели фундаментальных данных (FDM). FDM, построенный на онтологии верхнего уровня, является ключевым компонентом IMF и основой для обеспечения согласованности данных по национальному цифровому двойнику.

Опросные документы являются первыми результатами проекта FDM Seed, финансируемого Construction Innovation Hub (CIH). Они сообщают о разработке FDM, который будет протестирован на платформе CIH и станет отправной точкой - «семенем» - для национального цифрового двойника. Публикация этих опросов - большой шаг вперед на пути к созданию структуры, обеспечивающей эффективное управление информацией в созданной среде.

После публикации на веб-сайтах CDBB и CIH опросы будут опубликованы в сети сообществ IMF Digital Twin Hub, где будут обсуждаться оценки и последствия опросов, а также дальнейшие шаги.

5. Следуя сообщению <https://digitaltwinhub.co.uk/forums/topic/351-digital-twins-standards-roadmap-published/> и [60], уже разработана дорожная карта создания стандартов, которые поддерживают инновации и появляющиеся технологии, помогая своим сообществам объединяться вокруг потребностей, приоритетов и подходов. Эта дорожная карта стандартов была разработана специально для поддержки последовательного внедрения и взаимодействия цифровых двойников для искусственной среды в Великобритании (рисунок 6).

При этом рекомендуется [60] разработать несколько стандартов разного типа по двум ключевым темам:

Структура цифрового двойника для искусственной среды: в этой теме учитывается текущая работа ИСО по

разработке структуры цифрового двойника для производства, чтобы подход на основе искусственной среды можно было сравнить и согласовать с подходом, применяемым в других секторах; и

Цифровая встроенная среда: эта тема определяет пробелы в существующем ландшафте стандартов для облегчения надежного, открытого и безопасного обмена информацией между организациями с помощью таких

механизмов, как цифровые двойники.

Затем пробелы в каждой из этих тем были преобразованы в общие концепции, чтобы определить их зависимости и установить критический путь их развития. Первая рекомендация - это гибкий стандарт, в котором изложены обзор и общие принципы, касающиеся цифровых двойников для искусственной среды.

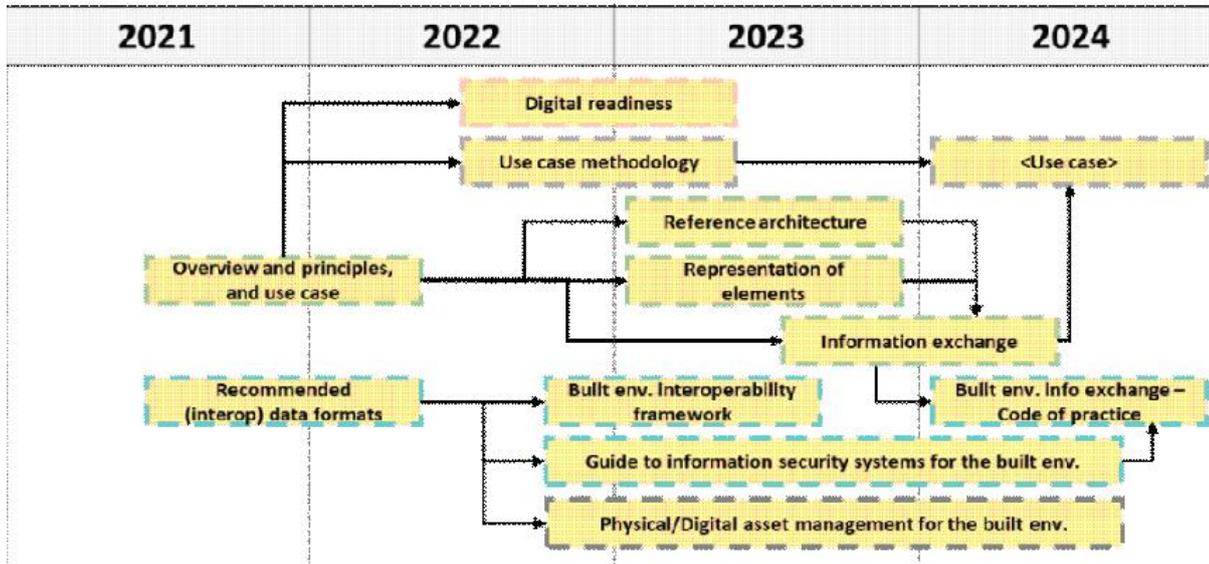


Рис. 6. Дорожная карта стандартизации для NDT [60]

Таким образом, эта дорожная карта (рисунок 6 и [60]) поддерживает как более широкую цифровую трансформацию застроенной среды, поддерживаемую такими организациями, как Совет по руководству в строительстве, Construction Innovation Hub и UK BIM Alliance, так и реализацию Национальной программы цифровых двойников CDBB.

#### IV Цифровой двойник умного города в NDTp

Так как практический весь раздел 2 настоящей статьи был намеренно посвящен идеологии цифрового двойника и его архитектуре на примере поэтапного объяснения построения цифрового двойника умного города то это существенно облегчает изложение темы того, как эта тема развивается в NDTp.

Цифровые двойники для умного города в идеологии NDTp основаны на множестве существующих технологий и инициатив. Их можно рассматривать как естественную эволюцию информационного моделирования зданий (BIM), которое уже начинает представлять построенную среду в цифровом виде. Датчики Интернета вещей (IoT) предоставляют важные данные, которые помогают превратить цифровые модели в динамичных и современных двойников. По мере того, как объем и сложность этих данных растет, аналитика и искусственный интеллект становятся все более важными для подключения и интерпретации этих данных, чтобы они могли улучшить процесс принятия решений, становящийся часто автоматическим.

Организации, которые проектируют, создают и поддерживают активы умных городов, могут протестировать идеи в двойнике, прежде чем что-либо

делать с реальным активом. Это экономит затраты и снижает риск того, что что-то пойдет не так в физическом мире. Такие вопросы, как «что, если мы удвоим частоту движения поездов на этом участке пути?» или «что, если мы модернизируем оборудование HVAC (отопление, вентиляция и кондиционирование) в одном из наших зданий?» можно сначала просмотреть цифровой модели.

Цифровые двойники умных городов в идеологии NDTp становятся еще более могущественными, когда их можно использовать для предсказания того, что произойдет дальше. Анализ в модели может указать, когда сигнальное оборудование может выйти из строя или когда двери в вагоне поезда необходимо обслуживать. Потенциальные выгоды распространяются на весь жизненный цикл физических активов в искусственной среде и включают:

- Лучшее решение о типе, масштабе и сроках необходимых активов (например, когда нам нужна новая электростанция или новый участок дороги)
- Более правильные решения о том, когда поддерживать или заменять активы
- Повышение безопасности и снижение других рисков (например, объединение цифровых двойников с виртуальной реальностью (VR) для виртуального обхода туннелей и туннельного оборудования)
- Повышение эффективности от проектирования до технического обслуживания, включая повышение производительности труда и сокращение потерь строительных материалов.
- Улучшение услуг, таких как коммунальные

услуги и транспорт, которые зависят от физической инфраструктуры

Приз мог быть весьма значительным. IDC подсчитала, что цифровые двойники могут обеспечить инновации и повышение производительности до 25% для компаний G2000 к 2021 году. Связь и иерархия DT между различными уровнями приведена на рисунке 7

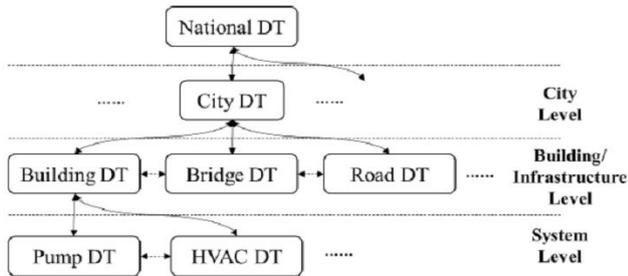


Рис. 7. Связь и иерархия DT между различными уровнями [53]

Одна из самых серьезных проблем при создании цифровых двойников - сложность самой задачи умных городов. Комплексный цифровой двойник, охватывающий всю созданную среду, должен включать в себя миллионы отдельных активов и множество

связанных данных. Например, если строительный бизнес создает цифрового двойника одного здания, он все равно должен быть доступен субподрядчикам, производителям устройств IoT и менеджерам объектов - все они будут использовать двойник по-разному и должны подключать его ко все более широким наборам данных. Поэтому, очень интересный пилот цифрового двойника умных городов в идеологии NDT разворачивается в непосредственной близости от центра национального двойника Великобритании, то есть в Кембридже [53].

В [53] заявлено, что такой цифровой двойник (DT) относится к цифровой копии физических активов, процессов и систем. DT объединяют искусственный интеллект, машинное обучение и аналитику данных для создания живых цифровых имитационных моделей, которые могут обучаться и обновляться из множества источников, а также представлять и прогнозировать текущие и будущие условия физических аналогов. В соответствии с онтологическими принципами построения систем были собраны заинтересованные стороны в пилотном проекте «Цифровой двойник Западного Кембриджа» (рисунок 8)

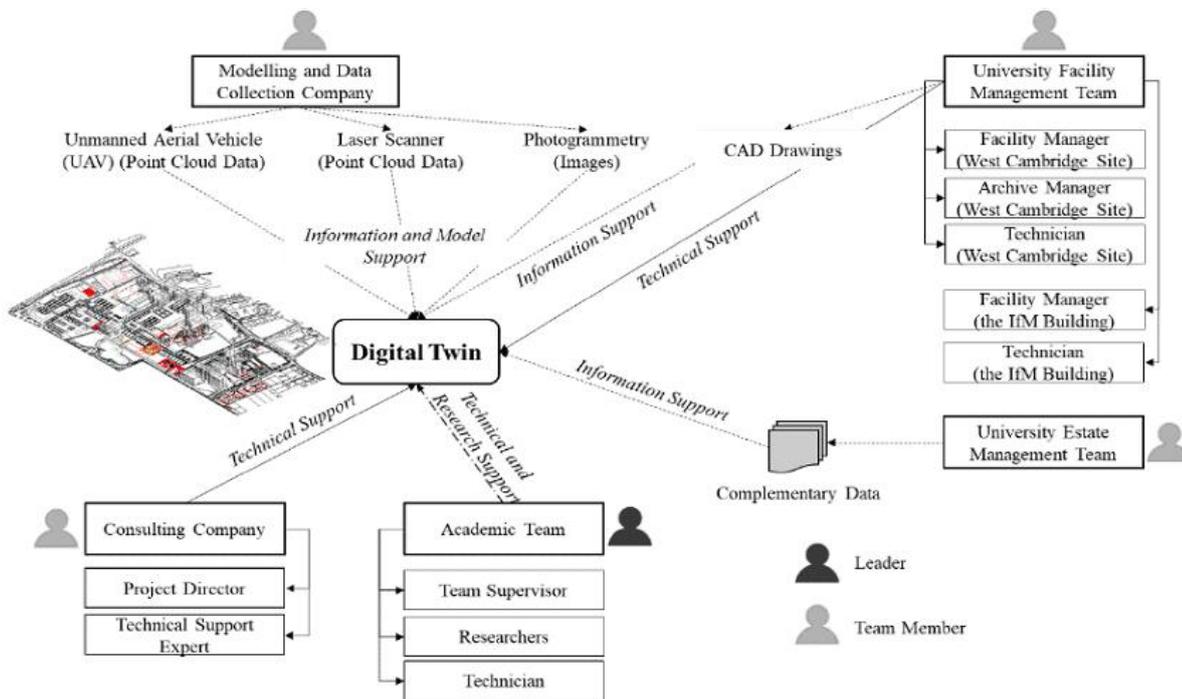


Рис. 8. Заинтересованные стороны в пилотном проекте «Цифровой двойник Западного Кембриджа» [53]

Однако текущая деятельность, связанная с DT Западного Кембриджа, все еще находится на начальной стадии в отношении зданий и других объектов инфраструктуры с архитектурной и инженерной / строительной точки зрения. Меньше внимания уделяется этапу эксплуатации и технического обслуживания (O&M), который является самым

продолжительным периодом жизненного цикла актива. Систематическая и ясная архитектура, подтвержденная практическими примерами использования для построения DT, станет главным шагом для эффективной эксплуатации и обслуживания зданий и городов. Согласно текущему исследованию многоуровневых архитектур, в этой статье [53] представлена системная архитектура для DT, специально разработанная как на уровне зданий, так и на уровне города (рисунок 9).

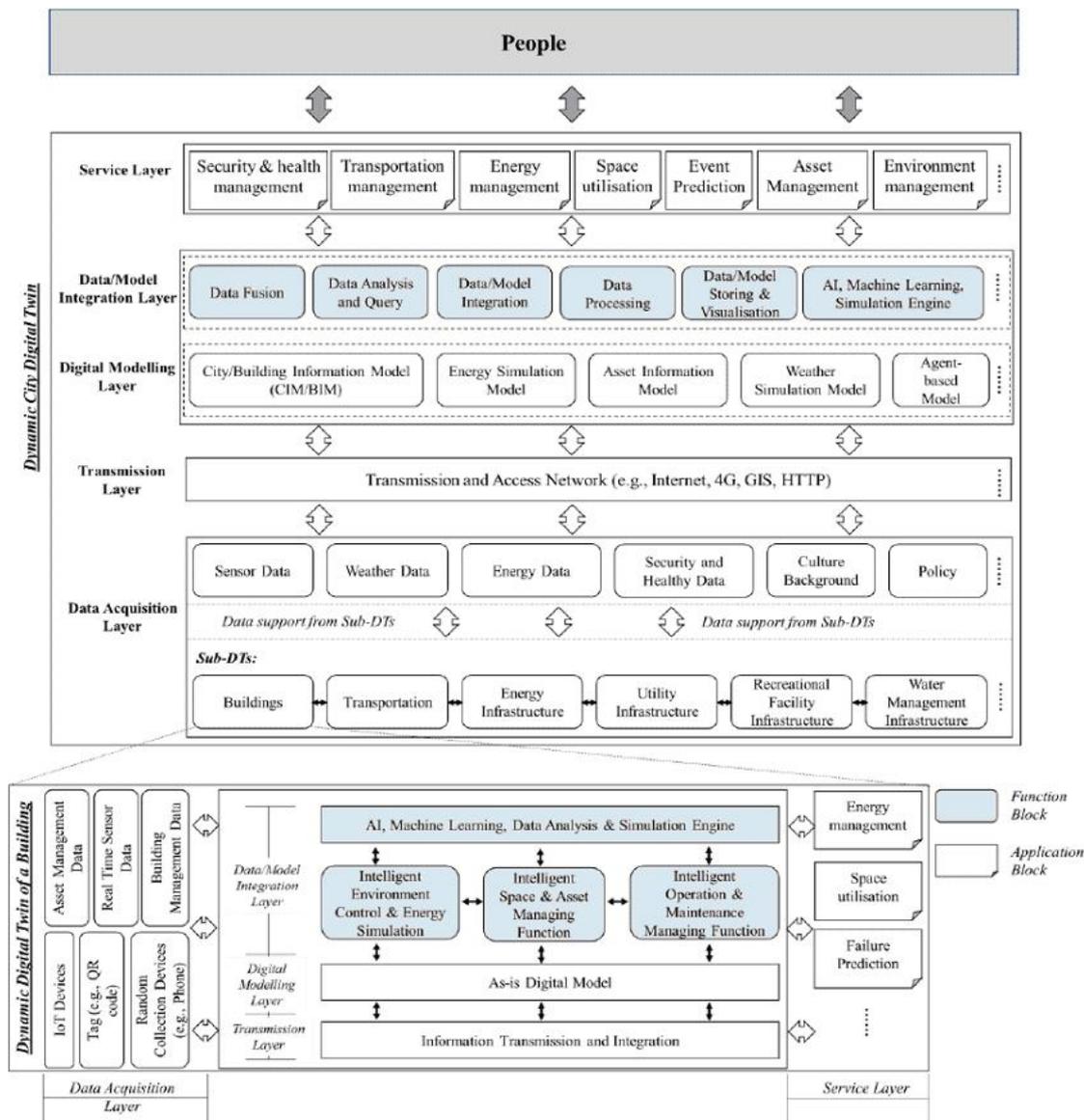


Рис. 9. Системная архитектура развития DT на уровне города и здания [53]

На основе этой архитектуры был разработан DT-демонстратор сайта Западного Кембриджа Кембриджского университета в Великобритании, который объединяет разнородные источники данных, поддерживает эффективные запросы и анализ данных, поддерживает процессы принятия решений в управлении эксплуатацией и техобслуживанием, а также устраняет пробелы между человеческими отношениями со зданиями / городами. Этот документ направлен на прохождение всего процесса разработки DT на уровне зданий и городов с технической точки зрения и обмен

извлеченными уроками и проблемами, связанными с разработкой DT в реальной практике. Благодаря разработке этого демонстратора DT, результаты обеспечивают четкую дорожную карту и представляют конкретные исследовательские усилия DT для практикующих специалистов по управлению активами, политиков и исследователей с целью содействия внедрению и развитию DT на уровне зданий и городов. На рисунках 10-16 мы приводим материалы, иллюстрирующие развитие этого важного проекта, которые одновременно могут служить как иллюстрациями для 2 и 4 части этой статьи, так и для дополнительного информирования читателя.

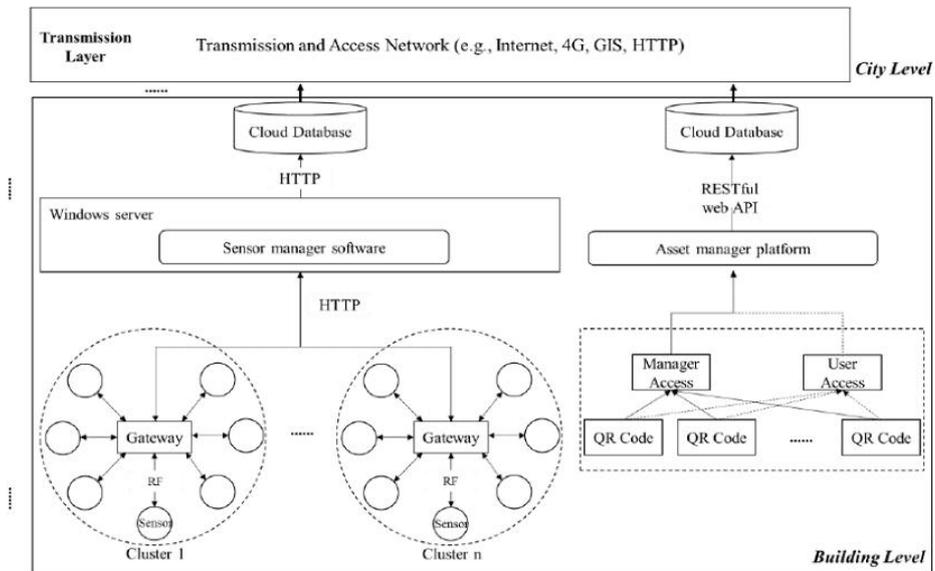


Рис. 10. Схема WSN для сбора и передачи данных от активов [53]

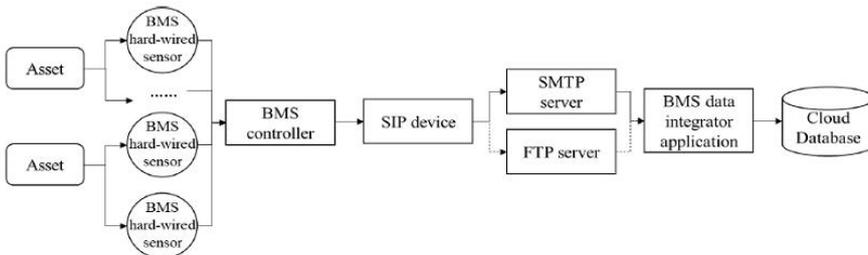


Рис. 11. Схема процесса передачи данных проводных датчиков [53]



Рис. 12. Развитие слоя цифрового моделирования городского DT на площадке West Cambridge [53]

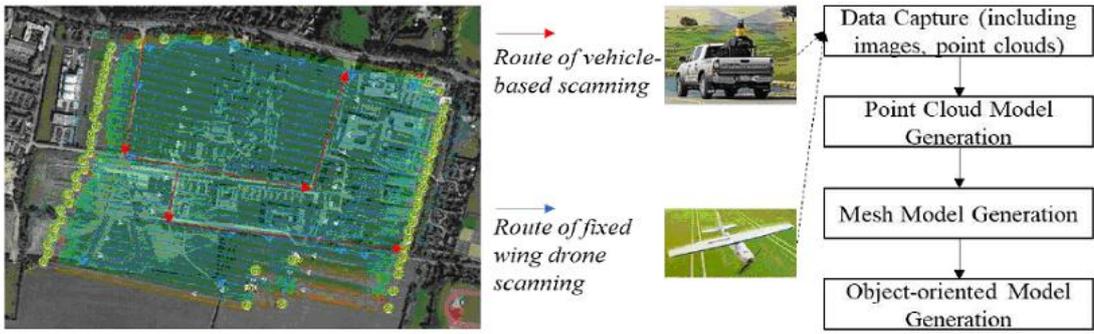


Рис. 13. Процесс и план создания цифровой модели для участка в западном Кембридже с использованием дронов с неподвижным крылом и сканирования с помощью транспортных средств [53]

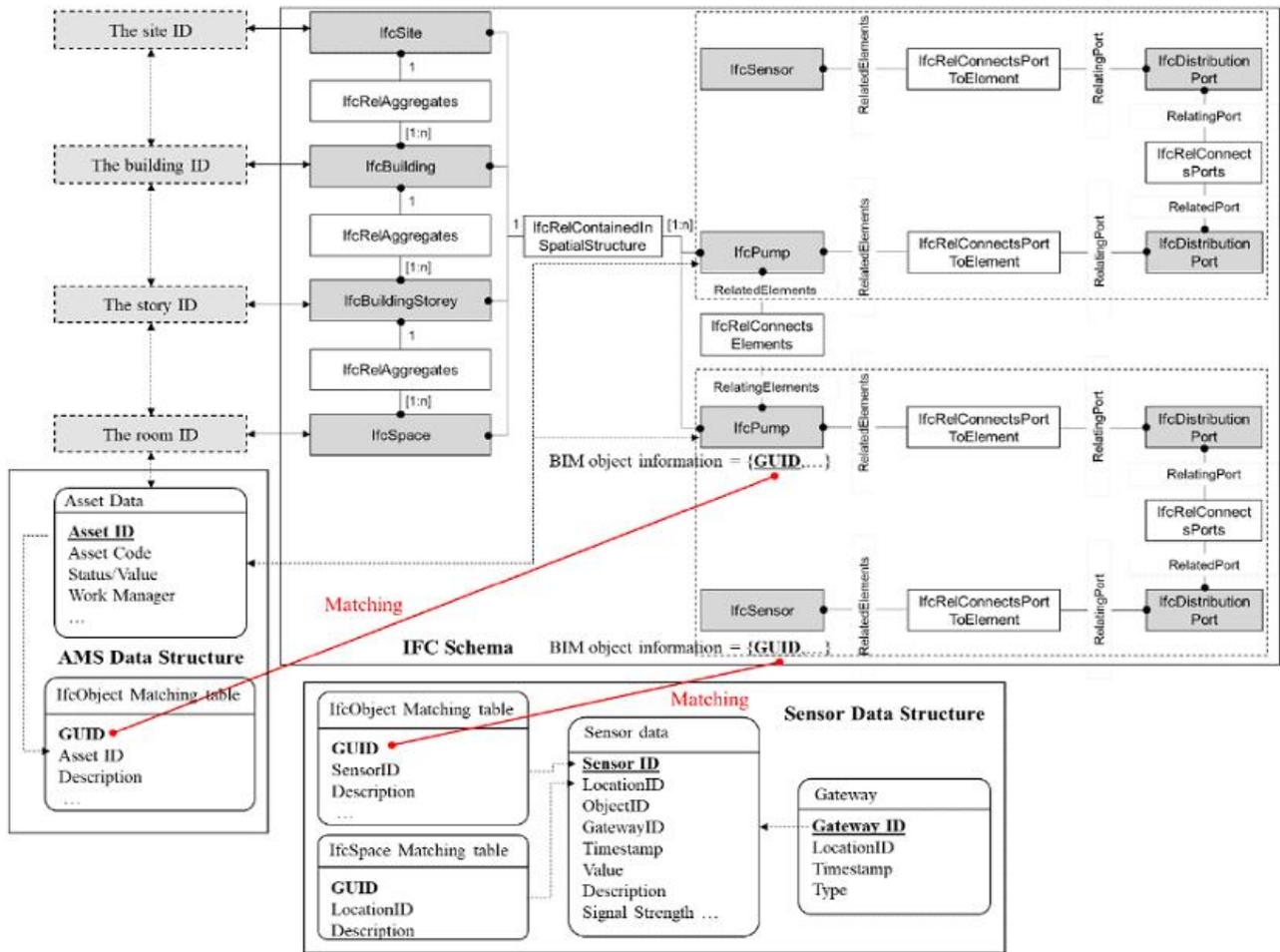


Рис. 14. Сопоставление схемы IFC с другими ресурсами данных (на примере AMS) [53]

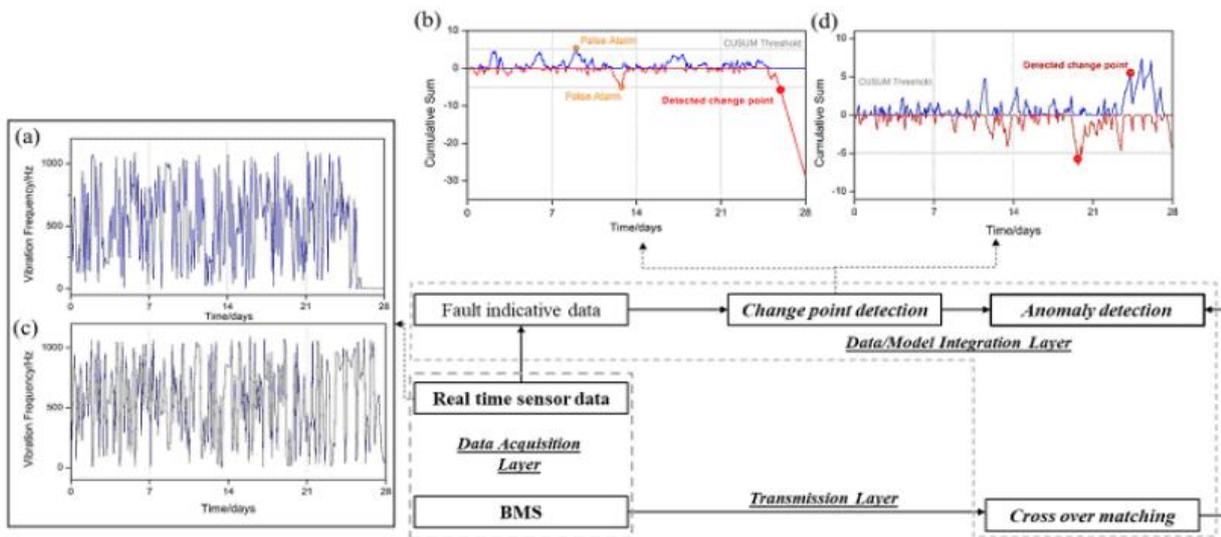


Рис. 15. Обнаружение неисправности насоса, реализованное на уровне обслуживания DT [53]



Рис. 16. Услуги (сервисы) цифрового двойника [53]

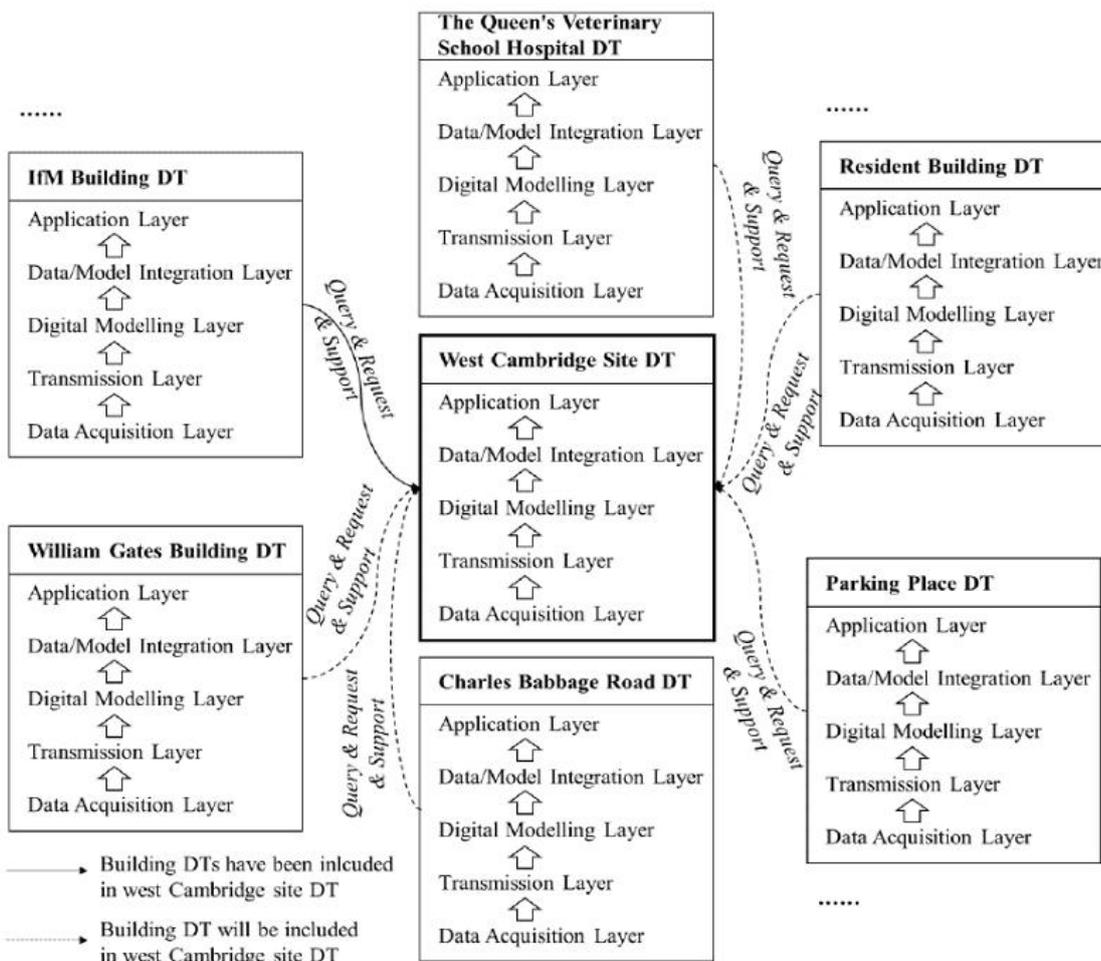


Рис. 17. Управление данными между городскими DT и суб-DT [53]

#### У БРИТАНСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ИННОВАЦИЙ CATAPULT И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ПРОГРАММЕ NDTp

В программе Национального цифрового двойника (NDTp) Великобритании также активно участвует система британского ускорителя инноваций Catapult и в частности в пилотировании блоков цифровых двойников городов и других частей.

Вся система Catapult сегодня – это 9 отдельно работающих сообществ. Из одной Catapult в другую очень легко перебраться в интернете - они работают под одним интернет "зонтиком". С тематикой тоже интересно - так есть большая Catapult по промышленности и небольшой промышленный раздел в цифровой Catapult.

Наибольшее число материалов по цифровым двойникам мы нашли вот в этом пространстве - Connected Places Catapult - британский ускоритель инноваций для городов, транспорта и других мест (Connected Places Catapult <https://cp.catapult.org.uk/>). Connected Places Catapult очень серьезно занимается темой "Инновации как услуга" Вот что сказано на их сайте :

"В Connected Places Catapult мы предоставляем

беспристрастные «инновации как услугу» для предприятий, занимающихся мобильностью и созданием окружающей среды, поставщиков инфраструктуры и государственных учреждений, чтобы ускорить постепенное улучшение образа жизни, работы и путешествий людей, а также коммерциализацией передовых исследований

Мы подключаем предприятия и руководителей государственного сектора к передовым исследованиям. Мы помогаем разрабатывать, внедрять и коммерциализировать новейшие технологии и инновации для существующих рынков, а также создавать спрос и развивать новые рынки в Великобритании и во всем мире. В дополнение ко многим проектам, над которыми мы работаем с нашими партнерами, мы проводим демонстрации технологий и ускоряем внедрение инноваций для малых и средних предприятий, чтобы помочь масштабировать новые решения, которые стимулируют рост бизнеса, одновременно способствуя экономическому росту и лучшему и более экологичному будущему для всех".

В этой CP Catapult считают, что цифровые двойники обещают значительное повышение эффективности сложных систем, но их правильное внедрение требует больших затрат. Сектор также страдает от ажиотажа, что затрудняет определение наилучших возможностей для развертывания цифровых двойников.

Чтобы помочь обосновать экономическое обоснование инвестиций в цифровых двойников, мы выделили шестнадцать высокоуровневых тем сценариев использования, в которых цифровые двойники могут оказать значительное положительное влияние на дизайн и работу Connected Places, начиная от управления транспортными средствами в реальном времени и заканчивая улучшением проектирование воздушных транспортных средств будущего с динамической балансировкой нагрузки сети. Эти варианты использования охватывают все аспекты Connected Places, включая мобильность, искусственную среду, общественные места и инфраструктуру.

Основная работа CP Catapultна сегодня в части цифровых двойников - это документ [54] (Примеры использования цифровых двойников на месте Декабрь 2020 г.).

Конкретная, материальная форма, которую примут эти темы вариантов использования, будет несколько отличаться в зависимости от организации (в зависимости от типа и сектора, а также от цифровой зрелости организации). Тем не менее, в CP Catapult определили общие ценностные предложения, карту решения и требования к данным для каждой темы варианта использования. Последнее показывает, что многие варианты использования ограничены отсутствием открытых (или совместно используемых)

данных: увеличение доступности данных, вероятно, будет относительно быстрой победой для развертывания цифровых двойников [54].

Учитывая, что многие организации могут быть заинтересованы в нескольких вариантах использования, CP Catapult предлагает [54] структуру оценки для определения приоритетности вариантов использования по их важности и достижимости (рисунок 18). Структура включает 12 критериев, которые оценивают сам вариант использования (например, согласован ли он со стратегической точки зрения, может ли он быть финансово устойчивым, доступны ли требуемые данные, обеспечивает ли он поддержку принятия решений в нужные сроки и повышает ли эффективность?) И шесть критериев, которые сосредоточены на необходимом цифровом двойнике для реализации каждого варианта использования (например, может ли он принимать данные в режиме реального времени, можно ли его масштабировать, можно ли постепенно расширять его функции и возможности?). Несмотря на то, что эта структура была разработана с учетом целей и задач Catapult, она должна быть в равной степени применима во всем секторе (хотя и с взвешиванием критериев и потенциально возможными пороговыми значениями, адаптированными для отражения стратегии и миссии отдельных организаций) [54].

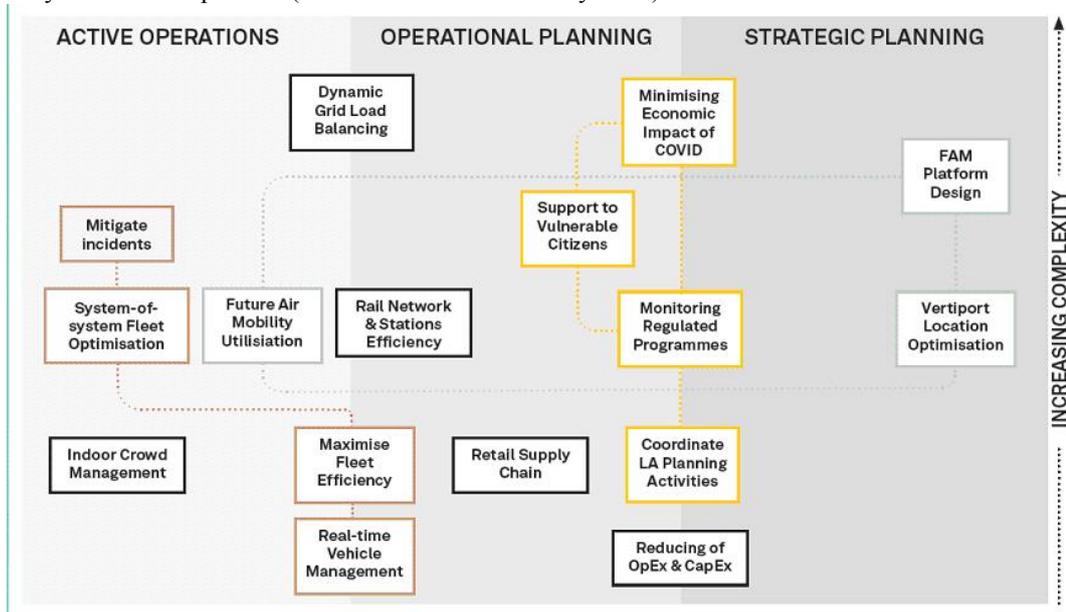


Рис. 18. Структура оценки для определения приоритетности вариантов использования цифровых двойников по их важности и достижимости [54]

Для нашего читателя мы приводим краткие описания и схемы некоторых выделенных в [54] проектов цифровых двойников, которые могут иметь быстрый успех и вероятно уже поэтому будут полезны нашим читателям. Конечно, мы взяли только часть описаний этих блоков, попытавшись, тем не менее, сделать их представительными. Вот описания этих блоков.

1. НАЗВАНИЕ: Управление транспортными средствами в реальном времени (Рисунок 19)

Описание: Большинство операторов транспортных средств имеют фиксированный график технического обслуживания, который увеличивает эксплуатационные расходы. Цифровой двойник, использующий данные в реальном времени, собранные с датчиков данные (например, на тормозных колодках или трансмиссии) позволяют операторам динамически планировать техническое обслуживание, снижая затраты на плановое обслуживание и проводить снижение рисков внеплановых простоев. Собранные данные могут быть

переданы OEM-производителям для информирования о разработке новых продуктов (например, улучшенные тормозные колодки), а тень цифрового двойника может предложить безопасную среду для тестирования новых

продуктов и функций (например, выяснить, какое поведение подрывает технические улучшения).

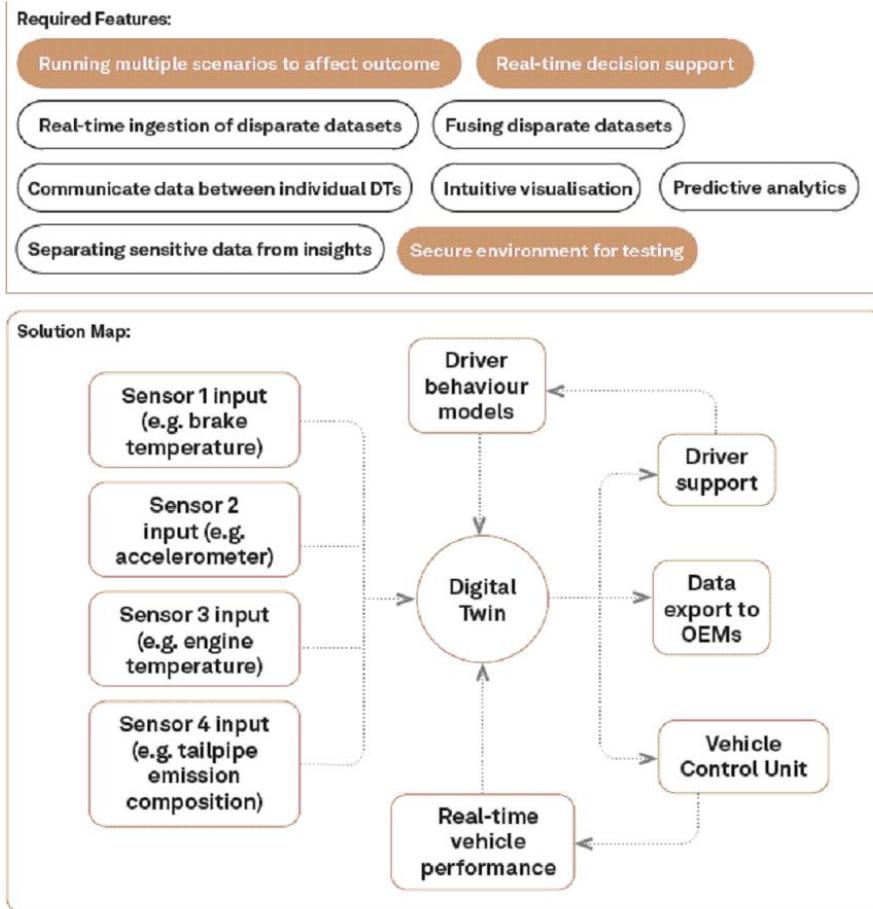


Рис. 19. Схема цифрового двойника « Управление транспортными средствами в реальном времени» [54]

2. НАЗВАНИЕ: Максимизировать эффективность автопарка для оператора автопарка или инфраструктуры (Рисунок 20)

*Описание:* Большое количество автомобилей, будь то из одного корпоративного автопарка или из несколько флотов, часто неэффективно используют доступное

пространство (дороги или парковки). Пока автомобили ждут, пока не появится место, они вносят свой вклад в загрязнение и не приносят дохода своим владельцам. Digital Twins предлагают возможность координировать маршруты и время для всех транспортных средств, чтобы уменьшить (или, как минимум, преднамеренно распределить) время простоя, чтобы получить максимальную отдачу из заданного набора активов и инфраструктуры.

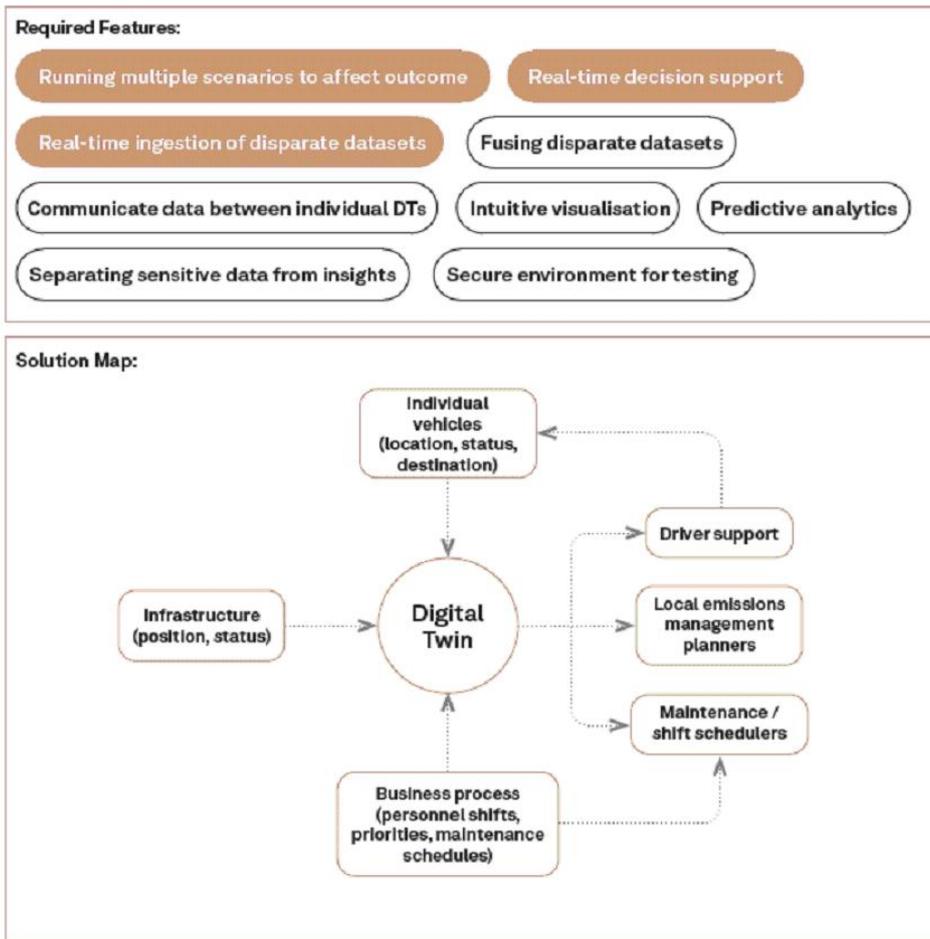


Рис. 20. Схема цифрового двойника «Максимизировать эффективность автопарка для оператора автопарка или инфраструктуры» [54]

3. НАЗВАНИЕ: Оптимизация системы систем (например, нескольких парков) (Рисунок 21)

Описание: Когда несколько организаций взаимодействуют в одном месте (например, логистика операторов в городе), оптимизируя эффективность

внутри каждой организации, что оставляет более широкую систему неоптимальной (из-за упущенной синергии или дублированные усилия). Цифровой двойник, объединяющий цифровых двойников отдельных организаций, позволят оптимизировать их всех, либо, предлагая улучшения для всех организаций или облегчая компромисс там, где одна организация соглашается на снижение эффективности в поддержку общего улучшения.

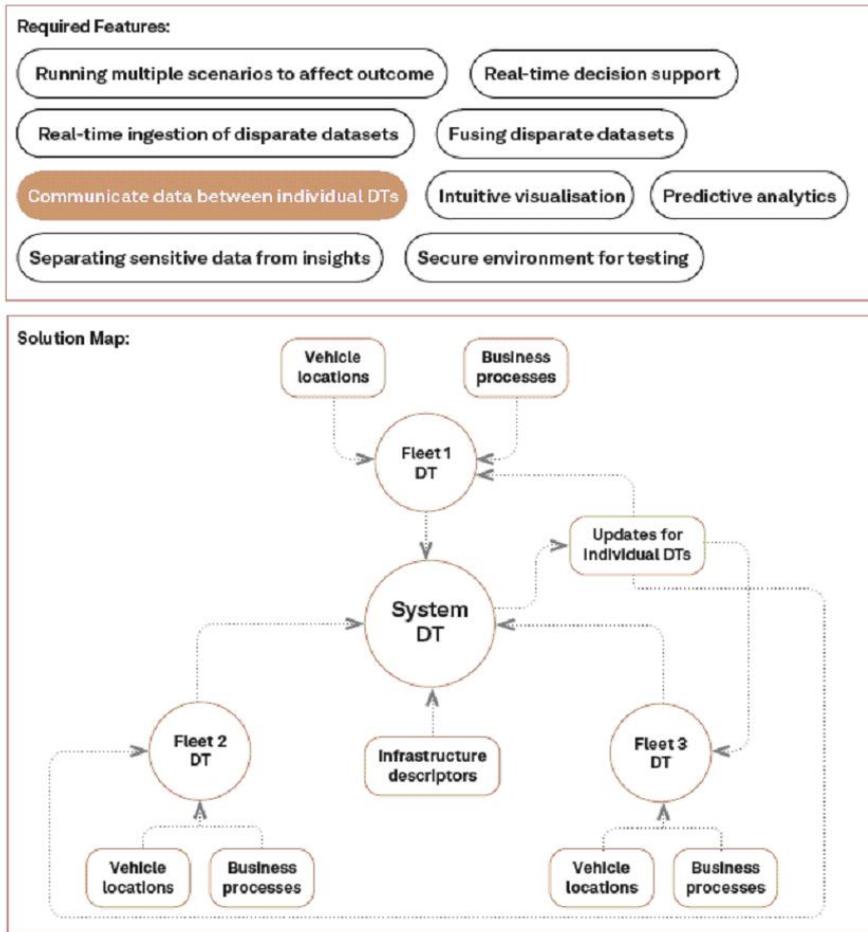


Рис. 21. Схема цифрового двойника «Оптимизация системы систем (например, нескольких парков)» [54]

4. НАЗВАНИЕ: Максимальное использование транспортных средств с воздушной подвижностью в будущем (FAM) (Рисунок 22)

Описание: Авиамобильность будущего (электрическая, автономная авиация) доступна только на коммерческой основе и жизнеспособна, если транспортные средства

используются чрезвычайно интенсивно: работает почти непрерывно и только при полной загрузке пассажиров / груза. Цифровой двойник позволит оптимизировать маршрутизацию транспортных средств в режиме реального времени и планирование времени простоя (для обслуживания или зарядки), чтобы использование постоянно оптимизировалось; это может включать частое обновление цен и стимулы для увеличения охвата целевыми потребителями.

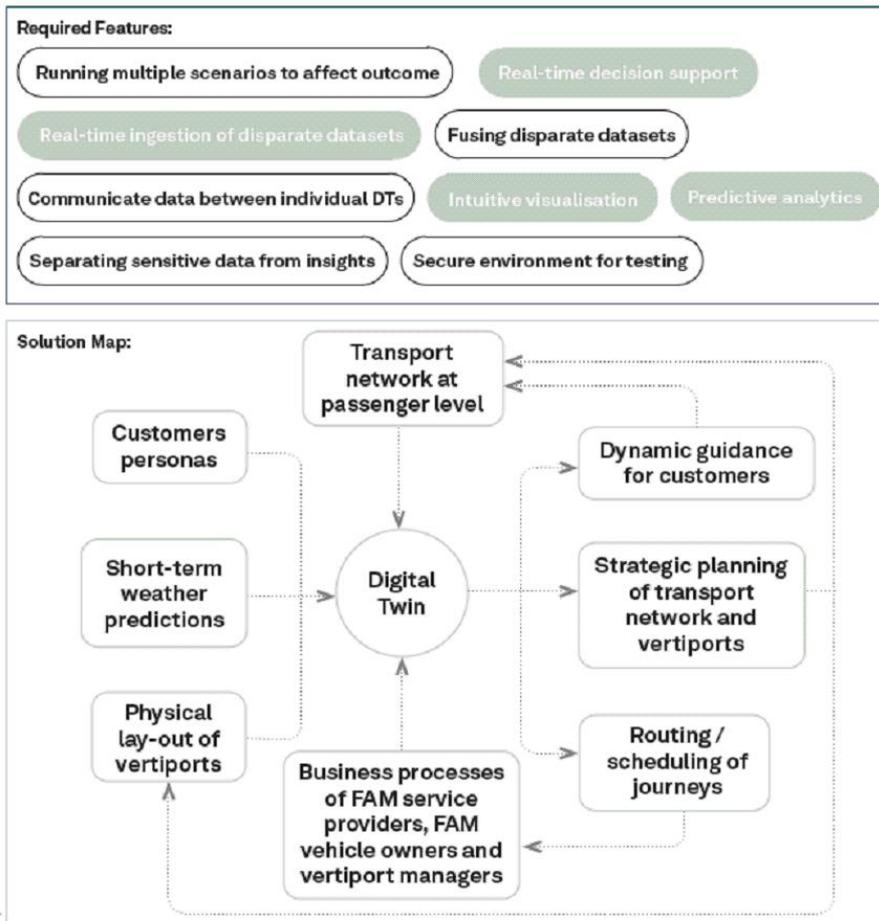


Рис. 22. Схема цифрового двойника «Максимальное использование транспортных средств с воздушной подвижностью в будущем» [54]

5. **НАЗВАНИЕ:** Улучшенная конструкция транспортного средства FAM и ее соответствие бизнес-модели (Рисунок 23).  
**Описание:** На операционную и бизнес-модель службы FAM напрямую влияют: конструкция транспортного средства, указывающая его дальность полета, скорость и

грузоподъемность; время простоя для обслуживания, загрузки и подзарядки; и, в конечном итоге, эксплуатационные расходы.

Цифровой двойник, который соединяет детали самого транспортного средства, его компонентов и материалы с транспортной системой и ожидаемой сервисной бизнес-моделью предлагает раннее тестирование и повторение конструкции транспортного средства, чтобы соответствовать требованиям бизнес-модели.

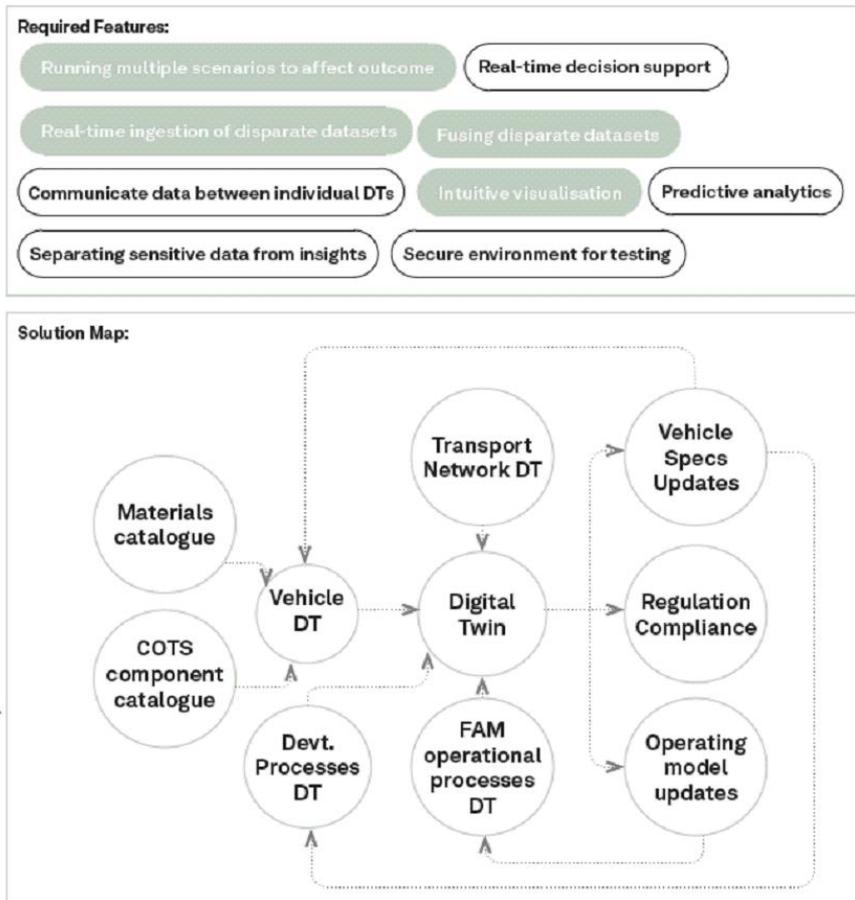


Рис. 23. Схема цифрового двойника «Улучшенная конструкция транспортного средства FAM и ее соответствие бизнес-модели» [54]

6. НАЗВАНИЕ: Оптимизировать расположение вертипортов (Рисунок 24).

Описание: Цифровые двойники открывают возможности для будущих провайдеров воздушной мобильности использовать данные для оптимизации расположения будущих портов авиамобильности

(вертипорты) на системном уровне, путем интеграции данных вокруг объектов инфраструктуры (и, следовательно, потенциальных мест), погодных условий, классификации воздушного пространства и пассажирского спроса и предложения (на основе данных о существующем спросе и предложении, а также прогнозируемой сегментации пассажиров), поставщики услуг FAM могут планировать вертипорты на системной основе, а не на индивидуальном выборе сайтов.

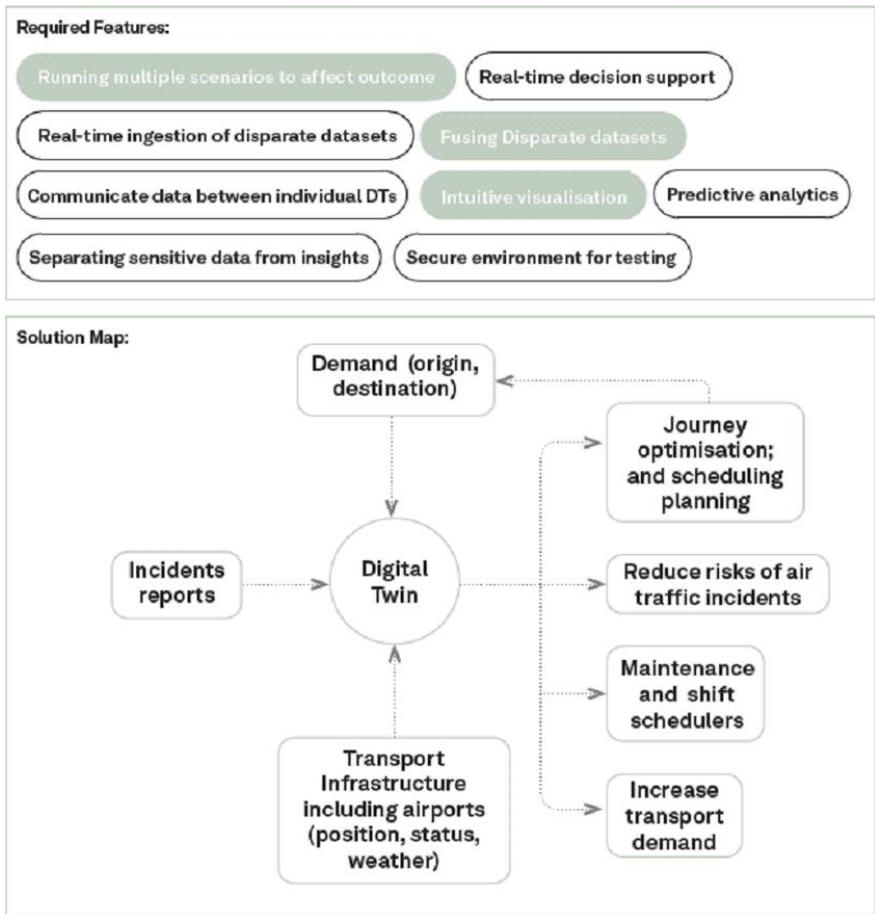


Рис. 24. Схема цифрового двойника «Оптимизировать расположение вертипортов» [54]

7. НАЗВАНИЕ: Отслеживание прогресса по регулируемой программе (например, жилищное строительство) (Рисунок 25)

Описание: Регулируемые программы (например, жилищное строительство, инфраструктура и т. д.) часто включают несколько компаний и подрядчиков, работающих с разной степенью детализации проекта. Координация и информирование о ходе строительства

становится проблемой. Внедрение решения цифрового двойника обеспечит прозрачность и истинное (на месте) продвижение проекта на детальном уровне со своевременным указанием на потенциальные опасности или риски, которые могут возникнуть в результате хода строительства. Этот подробный вид можно построить и объединить с районным или национальным DT для информирования о производительности в отношении местных и национальных планов.

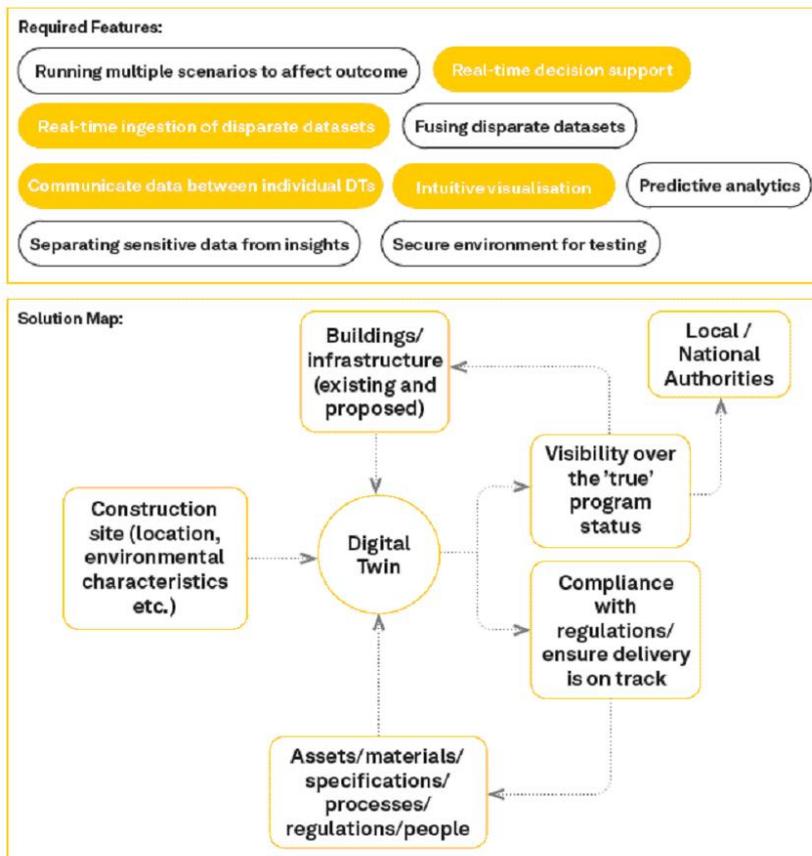


Рис. 25. Схема цифрового двойника. Отслеживание прогресса по регулируемой программе (например, жилищное строительство) [54]

8. **НАЗВАНИЕ:** Повышение эффективности железнодорожной сети и станций (Рисунок 26).

**Описание:** Число пассажиров железнодорожного транспорта в последние годы значительно увеличилось. Великобритания подвергает существующую железнодорожную систему растущей нагрузке на пропускную способность. Железнодорожная сеть

Великобритании уже работает на полную мощность, поэтому новые и инновационные пути необходимо рассмотреть для дальнейшего повышения эффективности.

Цифровой двойник предлагает возможность революционизировать существующие операции железнодорожной сети и станций, так как он может моделировать, прогнозировать и оптимизировать способность сети в режиме реального времени реагировать на смену пассажирского туристического спроса.

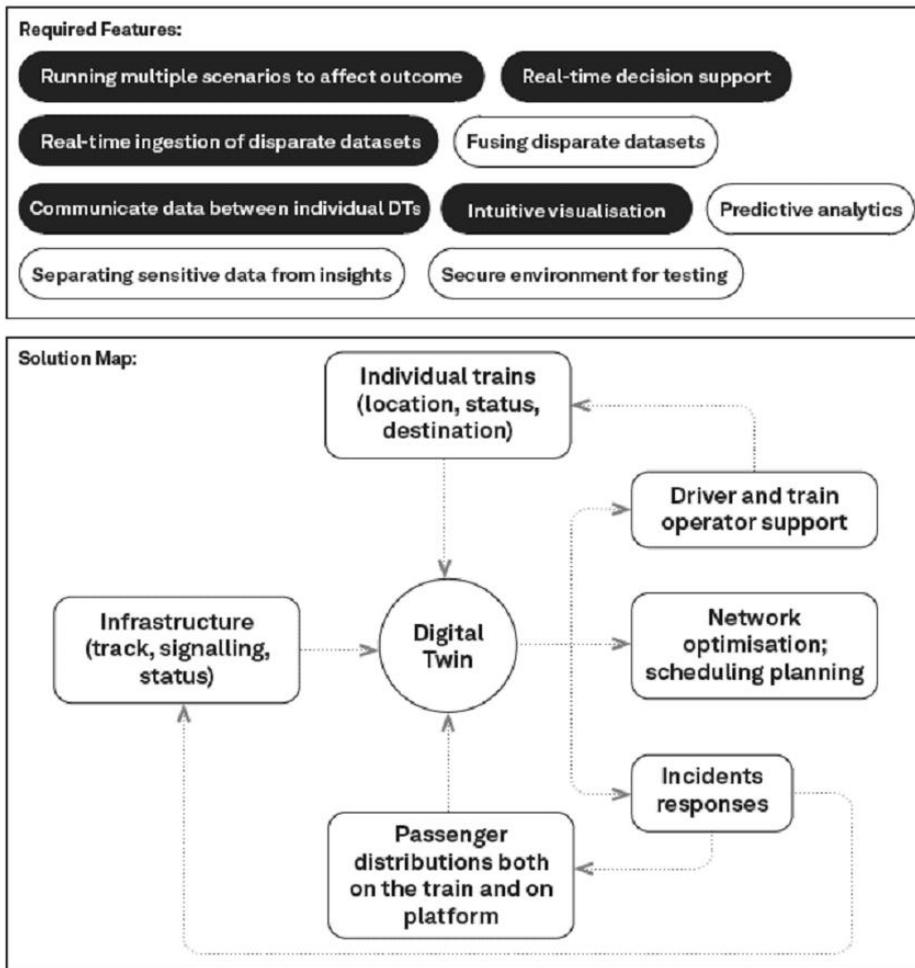


Рис. 26. Схема цифрового двойника «Повышение эффективности железнодорожной сети и станций» [54]

9. НАЗВАНИЕ: Управление толпой в закрытых помещениях (Рисунок 27)

*Описание:* Большие закрытые помещения (например, торговые центры, вокзалы, заведения гостеприимства) часто сталкиваются с неравномерным распределением толпы, что приводит к локализации «Перегруженности», снижающей эффективность помещения и комфорт пользователей; и представляет опасность для здоровья и безопасности. DT, основанный на существующих

картах, моделировании толпы и поведенческих моделях предлагают операторам площадок возможность управлять толпой, активно направляя людей к (или через) определенные части пространства: например, некоторых пассажиров можно «оставить» в кофейнях, в то время как других отправляют в поезда раньше, чтобы уменьшить скопление людей у билетных барьеров.

Тот же DT может также информировать (повторно) проектные решения путем моделирования толпы и ее поведения в новом пространстве.

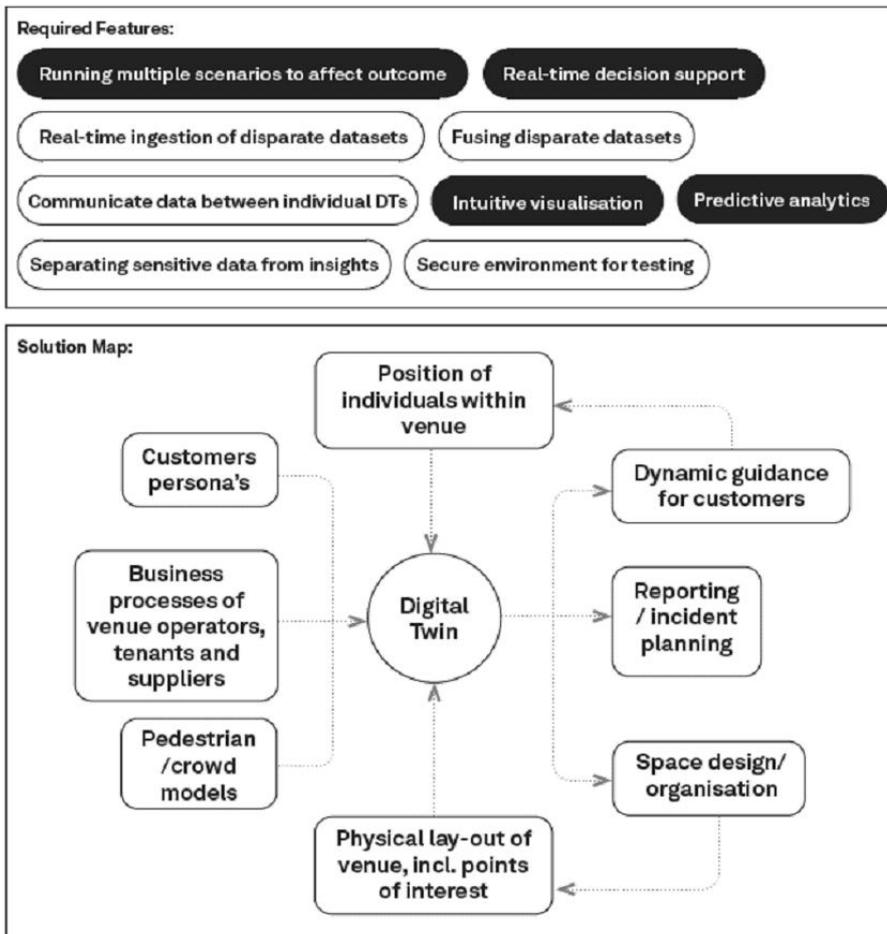


Рис. 27. Схема цифрового двойника «Управление толпой в закрытых помещениях» [54]

мощности» или для модернизации существующих подстанций, что может быть очень дорого.

10. НАЗВАНИЕ: динамическая балансировка нагрузки сети (включая электромобили) (Рисунок 28).

*Описание:* Продолжающаяся электрификация во многих секторах это возрастающая проблема в поиске лучшего способа использования существующей сетевой инфраструктуры, без необходимости содержать дорогую и сильно загрязняющую среду электростанции «пиковой

Цифровой двойник сетевой грид-системы с динамической балансировкой нагрузки дает возможность резко снизить пиковый спрос за счет смещения несущественных зарядок в непииковые периоды, с возможностью того, что система может работать как электрический накопитель, чтобы еще лучше сбалансировать пиковые требования.

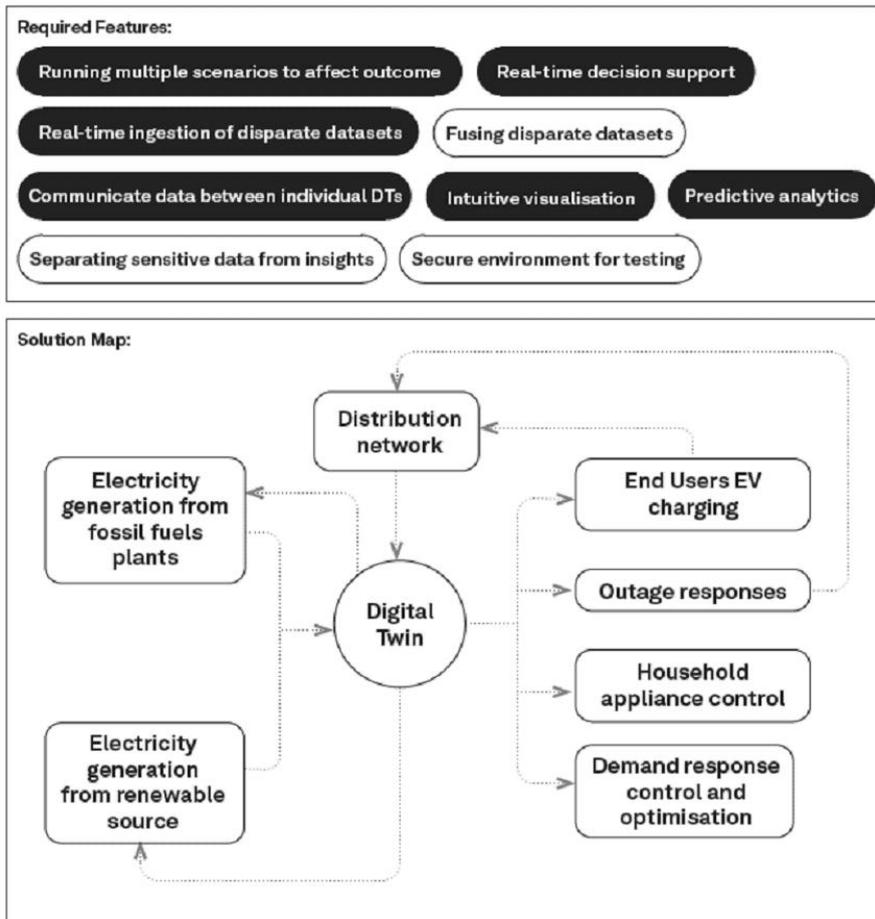


Рис. 28. Схема цифрового двойника «Динамическая балансировка нагрузки сети (включая электромобили)» [54]

Еще один проект, на который бы хотели бы обратить внимание, развивается в Connected Places Catapult отдельно [61]. Это проект «Умные порты: климатически устойчивые речные операции в Лондоне на основе сценария использования прогнозирующего цифрового двойника» [61].

Connected Places Catapult работает в этом проекте вместе с Royal HaskoningDHV и портами по всей Великобритании, выпуская серию сценариев использования интеллектуальных портов. Интеллектуальные порты - это ключевая тема, которая исследуется и разрабатывается во всем мире и может поддержать цифровизацию цепочек поставок и логистики, повысить отказоустойчивость, повысить эффективность и ускорить декарбонизацию [61].

Этот вариант использования технологии цифрового двойника был разработан совместно с администрацией лондонского порта с операциями, охватывающими 95 миль реки Темзы, от Теддингтона до Северного моря. Лондонский порт - второй по величине порт в Великобритании по тоннажу, состоит из более чем 70 независимых терминалов и в нем работает более 30 000 человек. Концепция Smart Ports находится в стадии изучения, помогая лондонскому порту поддерживать планы на будущее [61].

Изменение климата - одна из величайших проблем, с которыми столкнутся места в ближайшие десятилетия, когда наши прибрежные города и речные сообщества почувствуют давление. Последние прогнозы UKCP18 предсказывают повышение уровня моря в Лондоне как минимум на 0,3 м и до 1,15 м к 2100 году по сравнению со средними показателями 1981-2000 годов [61]. Река Темза является важной артерией для отдыха и грузовых перевозок, с ограничениями по глубине и осадке, на которые влияют погодные условия, приливы, эвакуация и защита от наводнений; поэтому понимание будущего поведения реки жизненно важно для планировщиков и операторов, чтобы обеспечить устойчивость. Этот вариант использования исследует потенциал разработки надежного и самообучающегося инструмента прогнозирования уровня реки для принятия оперативных решений и стратегического планирования, поглощающего все данные о влиянии реки, а затем извлекая их в имитационную модель климатического сценария - постоянно обучающегося цифрового двойника [61].

#### VI РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В ПРОГРАММЕ NDTp

Железнодорожный сектор представляет собой сложную сеть активов и систем, которые объединяются, чтобы позволить людям и товарам безопасно и своевременно передвигаться на различных скоростях и расстояниях. Для того чтобы сделать это реальностью нужно уметь работать с большими железнодорожными

данными (Рисунок 30). Определяющая технология для этого это современные формализованные онтологии в железнодорожном секторе (рисунок 29) .

Железнодорожное информационное моделирование на базе решений BIM это путь к модернизации железнодорожного транспорта в сторону цифровых двойников [ 63] ( рисунки 31 и 32) .По мере появления цифровых двойников на железной дороге они должны выходить за рамки отдельных активов и переходить в системы, частью которых они являются. Например,

цифровой двойник техобслуживания станции (отдельный актив) должен интегрироваться в цифровой двойник железнодорожной системы (система железнодорожного предприятия). Такая интеграция позволила бы владельцу тестировать сценарии, управлять и оптимизировать вмешательства с точки зрения обслуживания и введения новых основных средств. Цифровой двойник предприятия оптимизирует работу отдельных железнодорожных активов, а также системы в целом [64].

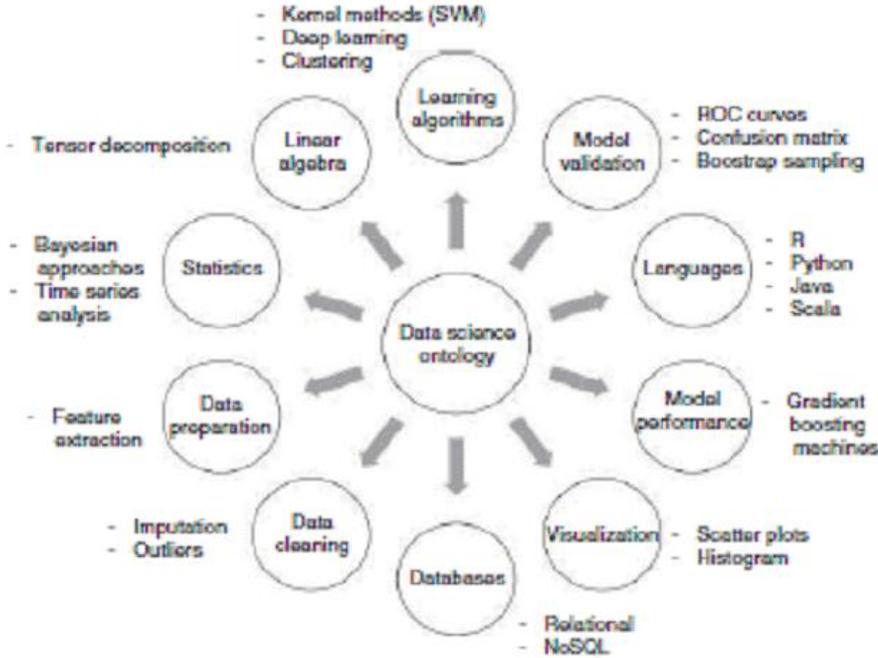


Рис. 29. Место онтологии науки о данных в железнодорожном секторе [62]

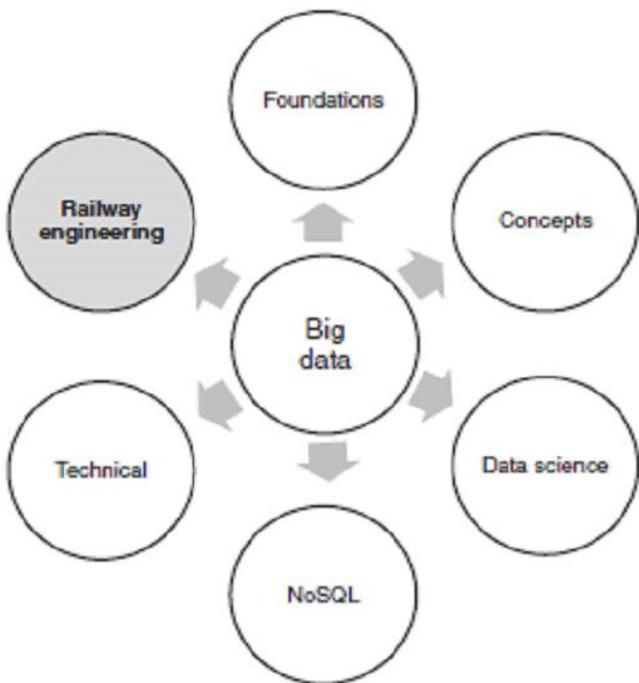


Рис. 30. Большие Железнодорожные данные [62]

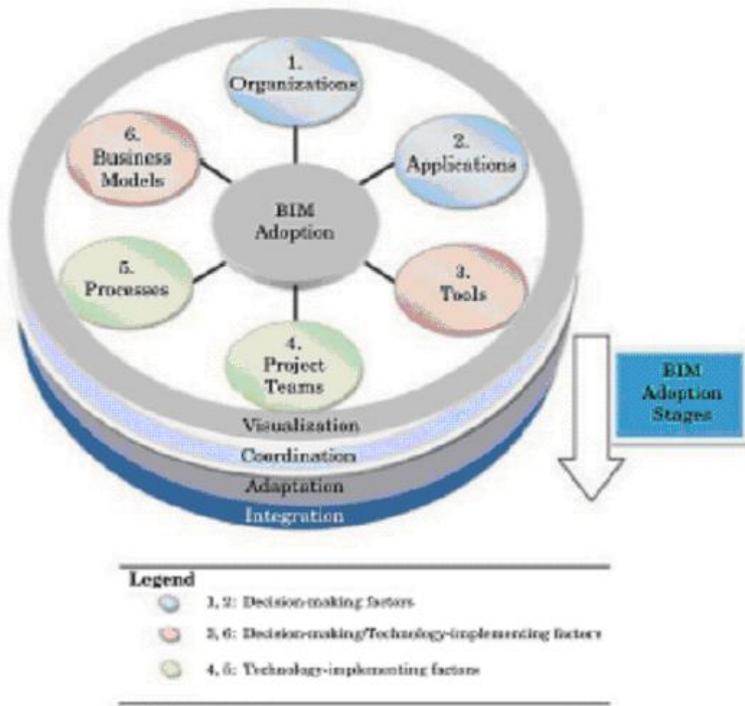


Рис. 31. Структура внедрения BIM для железных дорог [63]



Рис. 32. BIM в жизненном цикле инфраструктурного проекта железной дороги [63]

Цифровая революция открывает огромные возможности для создания единой сети цифровых двойников из отдельных активов и предприятий. Это будет способствовать цифровой зрелости железнодорожного сектора и признанию того, что железнодорожный сектор не изолирован от других. В частности, другие секторы, с которыми он

взаимодействует, включают дороги и аэропорты, энергосистему, телекоммуникационные сети, автостоянки и коммерческие здания [64]. Национальный цифровой двойник (с точки зрения железных дорог [64]) - экосистема подключенных цифровых двойников, которые безопасно и эффективно обмениваются данными, чтобы предоставлять более качественные услуги и продукты для всех заинтересованных сторон

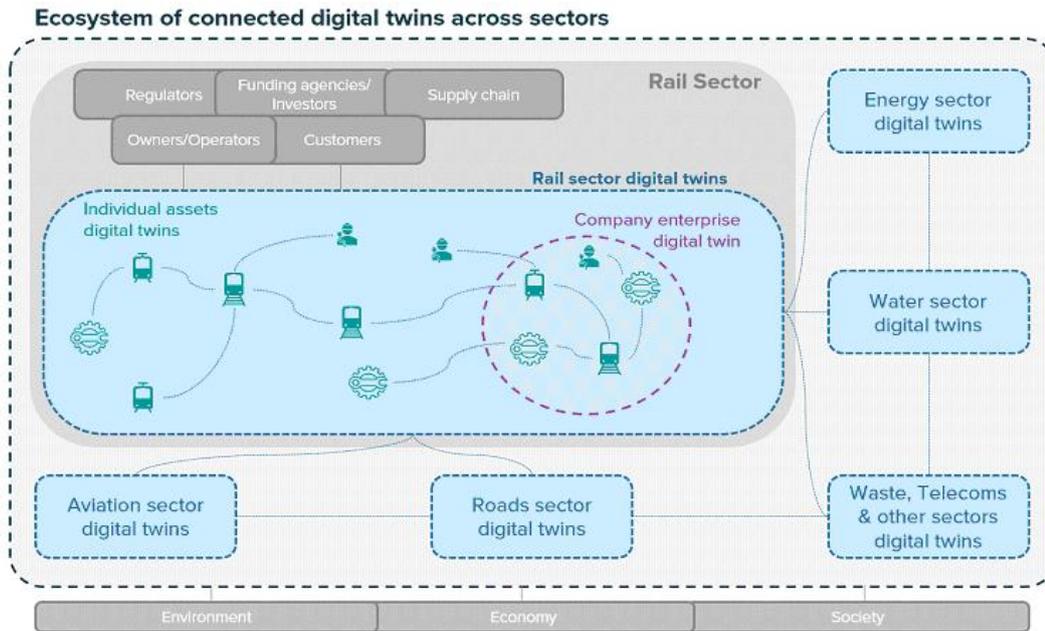


Рис. 33. Национальный цифровой двойник (с точки зрения железных дорог) - экосистема подключенных цифровых двойников, которые безопасно и эффективно обмениваются данными, чтобы предоставлять более качественные услуги и продукты для всех заинтересованных сторон [64]

Сеть взаимодействующих цифровых двойников сделает возможным физическое вмешательство в мультисистему и оптимизацию во всем секторе. Этот целостный мультисистемный подход способствует новой революции в оптимизации схем и планировании инфраструктуры, обеспечивая значительный прирост производительности в национальной экономике. Например, можно было бы оценить влияние новой железной дороги на все связанные системы инфраструктуры, чтобы заинтересованные стороны могли максимизировать желаемые результаты с учетом таких факторов, как загруженность дорог, экономический рост, мобильность и качество воздуха. Кроме того, сеть взаимодействующих цифровых двойников может иметь потенциал для уменьшения количества инцидентов и выявления финансовых рисков на основе здоровья и безопасности отдельных активов [64].

Отношения между цифровым двойником и его физическим двойником являются двусторонними и динамичными: данные поступают, а затем, при необходимости, принимаются меры. Загрузка нужного количества данных в нужное время необходима для обеспечения того, чтобы отдельный цифровой двойник служил своей цели. Некоторые цифровые двойники требуют обновления за миллисекунды (расположение высокоскоростных поездов), но другие могут нуждаться в обновлении только каждые несколько дней или месяцев (компоненты технического обслуживания с низким уровнем износа, такие как тормозные колодки) [64]. Следовательно, требуется информационная архитектура, позволяющая интегрировать цифровых двойников, работающих на разных уровнях (то есть с

различной степенью детализации в пространстве и времени). Это позволит осуществлять эффективный и безопасный обмен информацией без изменения предназначения отдельных цифровых двойников, считают в [64].

Рабочая группа экспертов по управлению информацией на железной дороге Великобритании при содействии программы неразрушающего контроля определила техническое ядро, позволяющее интегрировать цифровых двойников. Он известен как техническое ядро или Система управления информацией (IMF), которая состоит из [64]:

- Модель данных основания (верхняя онтология)
- Библиотеки справочных данных (объединение согласованных библиотек справочных данных)
- Архитектуры интеграции (для облегчения взаимодействия и связи цифровых двойников).

В качестве пилота и шага в направлении развития цифровых двойников железных дорог можно рассматривать цифровой двойник мониторинга состояния одного из участков HS1 [65]. nHS1 - это первая компания по эксплуатации ВСМ в Великобритании, которая владеет поездами Eurostar, представила цифровой двойник мониторинга состояния инфраструктуры [65].

Компания BRITAIN HS1 Ltd, которая владеет и управляет высокоскоростной линией HS1 между лондонским Сент-Панкрас и Ла-Маншем, представит в своей сети систему мониторинга состояния «цифрового двойника». Это система, которая позволит в реальном времени отслеживать производительность железнодорожных активов и быстро устранять неисправности, будет оборудована на лифтах, эскалаторах и траволаторах на международной станции Сент-Панкрас, а также на сигнальном оборудовании вдоль линии в 109 км. Датчики, установленные на объектах, улавливают и передают информацию о

неисправностях сервисным бригадам через частную сеть 5G, что позволяет быстро устранять неисправности [65].

Ожидается, что система сэкономит время и деньги по сравнению с традиционными методами технического обслуживания, а также позволит инженерам принимать более обоснованные решения, повышающие их собственную безопасность. Новая система также улучшит обмен информацией между локальными и удаленными группами обслуживания и улучшит подготовку нового обслуживающего персонала.

HS1 Ltd заявляет [65], что проект направлен на поддержку программы национального цифрового двойника британского правительства. Компания заявляет, что система может повысить производительность и сократить расходы на более чем 3000 железнодорожных станциях в более широкой британской сети.

Проект финансировался правительственным агентством Innovation UK. Он будет разрабатываться HS1 в партнерстве с менеджером инфраструктуры Network Rail High Speed (NR), специалистом по моделированию дополненной / виртуальной реальности Pauley Group, сетевой компанией 5G Athonet UK и Университетом Шеффилда. Центр перспективных производственных исследований (AMRC) [65].

Реализация проекта цифрового двойника HS1 выполнена в довольно понятном подходе, но на железной дороге Великобритании реализуются совсем новые по подходу проекты такого плана, существенно раздвигающие наши представления о возможностях этих технологий. Таков, например, цифровой двойник станции St-Pancras, работающий в реальном времени, и путешествие по созданию оптимизированной для эмоций железной дороги [66].

Он реализуется стартапом OpenSpace и показывает, как наука о движении людей претерпевает сдвиг парадигмы. Из скромных начинаний - опросов, проводимых вручную на станциях - моделирование толпы эволюционировало благодаря разработке первого цифрового двойника станции Сент-Панкрас, работающего в реальном времени. Это включало в себя намерение, настроение и созданную среду для более глубокого понимания потока людей и клиентского опыта [66].

В последние годы основной движущей силой инноваций на железнодорожном транспорте стал опыт работы с клиентами. Это изменение было давно пора. По мере развития нашего мышления и развития цифровых технологий у нас появляется возможность улучшить наше понимание клиентского опыта и соответственно спроектировать и эксплуатировать более совершенную железную дорогу. По сути, хорошее обслуживание клиентов - это то, что положительно влияет на эмоции каждого пассажира. Так, что они чувствуют себя более счастливыми от поездки по железнодорожной сети.

Стресс, паника и гнев часто вызваны такими обстоятельствами, как перенаселенность, недостаток информации или утретний кофе, выбитый у нас из рук

группой спешащих пассажиров. Хотя некоторым этот опыт может показаться тривиальным, он раскрывает глубокую правду для железнодорожной отрасли: эмоции - это главное [64].

Возникающие цифровые двойники реального времени, такие, как двойники на Сент-Панкрас, начинают процесс создания железной дороги, ориентированной на людей или «эмоционально-ориентированной». Это то место, где путешествия оптимизированы для счастья, спокойствия и удовлетворения, а также для уменьшения стресса, печали и гнева [64].

Станции - это эмоциональная точка железной дороги. Слишком долго основное внимание уделялось оптимизации неодушевленных бетонных зданий, соединенных рельсами и движущимися поездами, при этом забывая о людях - удивительно динамичных по ощущениям и местоположению. В конце концов, люди - причина существования физических активов [64].

В начале 2019 года OpenSpace [64] объединил передовые технологические компании, такие как High Speed 1, Govia Thameslink Railway, Network Rail - High Speed, Бирмингемский центр исследований и образования в области железнодорожного транспорта, чтобы продемонстрировать цифрового двойника, в центре которого находятся люди и их эмоции. У проекта было три отдельных направления: создание копии, воплощение ее в жизнь и поддержка операций.

Коалиция «построила копию», собрав разрозненные источники данных и инструменты для создания статической трехмерной виртуальной копии среды станции. Используя лазерное сканирование и глубокое обучение, команда автоматизировала создание информационной модели здания (BIM) Сент-Панкрас (рисунок 34). Такие объекты, как двери, огни и знаки, автоматически классифицировались и комментировались с помощью компьютерного зрения [66].



Рис. 34. Облако точек лазерного сканирования St Pancras 3D (слева) и автоматически созданная BIM-модель (справа) [66]

Затем авторы инноваций добавили в систему динамические и живые данные, чтобы воплотить ее в жизнь. Источники данных включали каналы, описывающие прибытие поездов, и недавно установленные стереокамеры, которые обнаруживали пассажиров в стратегически расположенных местах. Используя машинное обучение и движок моделирования пешеходов, в проекте создали точное представление о движении пассажиров по всей станции в реальном времени.

Набор инструментов визуализации данных - информационные панели и интерактивные среды -

предоставил владельцам станций доступ к данным о производительности станций с невиданным ранее покрытием, частотой и точностью. Информация была детальной и своевременной и включала такие показатели, как время в пути, скорость потока, комфорт пассажиров и использование эскалатора, которые постоянно сравнивались с базовыми показателями в реальном времени для каждой минуты работы [66]. Так создатели этого цифрового двойника выполнили принципы NDT в том, чтобы поставить людей в центр проектирования и эксплуатации искусственной среды.

Более того, с помощью гарнитур виртуальной реальности операторы в реальном времени могут ставить себя на место пассажиров. Например, те, кто приближается к людному месту, могут увидеть и почувствовать то, что чувствуют их клиенты. Это помогло улучшить оперативное реагирование, привлечь клиентов и улучшить взаимодействие с заинтересованными сторонами. Собранные данные также будут использоваться для улучшения конструкции станции в будущем.

Кроме того, операции цифрового двойника усилили с помощью алгоритмов, которые запускали предупреждения, когда производительность активов упала ниже определенного уровня или когда прогнозировалась перегрузка. Персонал может предпринять соответствующие действия, чтобы облегчить или смягчить ситуацию, например, остановив поток в определенных точках доступа.

С помощью виртуального обзора и вспомогательной аналитики, как утверждают в [66], можно рассчитать оптимальную позицию для ориентировочных указателей и рекламы на каждом пешеходном маршруте. Эти идеи

помогают повысить спокойствие и удовлетворенность клиентов за счет улучшенной навигации и впоследствии повысить коммерческую прибыль [66].

Платформа OpenSpace была разработана для определения расстояния между пассажирами в режиме реального времени с целью управления толпой. Недавно, после пандемии коронавируса и необходимости контролировать социальное дистанцирование, ей нашли новое приложение. В настоящее время такая информация может использоваться в качестве полезного индикатора соблюдения общественностью рекомендаций по дистанцированию в период COVID-19, особенно после поэтапной отмены мер изоляции.

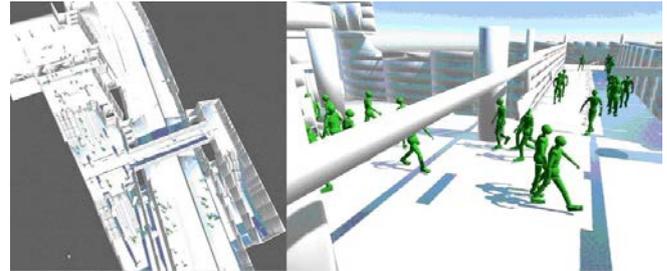


Рис. 35. Живое движение пассажиров на станции Сент-Панкрас, показанное на когнитивной платформе OpenSpace [66]

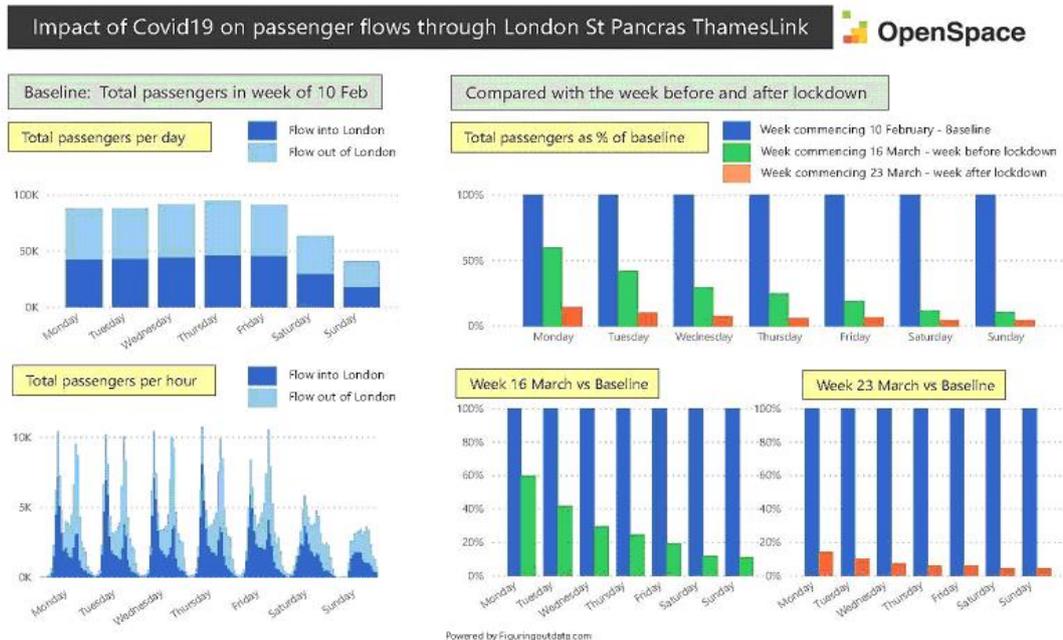


Рис. 36. График пассажирских потоков OpenSpace, полученные с учетом рекомендаций по дистанцированию в период COVID-19 в 2020 году [66]

С реализацией этого проекта появилась возможность еще больше раздвинуть применение цифрового

двойника, чтобы связать потоки людей по разным станциям, линиям и вагонам в растущей сети общесистемной оптимизации. Изучить эту миссию и расширить цифровой охват OpenSpace получил с помощью инициативы RSSB Data Sandbox ++ ([https://en.wikipedia.org/wiki/Rail\\_Safety\\_and\\_Standards\\_B](https://en.wikipedia.org/wiki/Rail_Safety_and_Standards_B)

oard)

В настоящее время уже опубликованы два отчета по этой работе:

1. Информирование путешественников-использование прогнозов в реальном времени для влияния на поведение пассажиров для улучшения управления нарушениями на железной дороге [67].
2. Техничко-экономическое обоснование концептуальной разработки цифрового двойника в реальном времени для уменьшения вариаций времени пребывания на маршруте Thameslink [68].

В этих отчетах описана одна из очень важных фаз разработки ТЭО для концептуальной разработки цифрового двойника в реальном времени для уменьшения вариаций времени пребывания на маршруте Thameslink для двух заинтересованных заказчиков, имеющих реальные финансовые потери при обслуживании пассажирского потока на конкретных двух железнодорожных линиях [67,68].

### VII ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы надеемся, что такой подход, как национальный цифровой двойник будет внимательно изучаться в России, тем более, что и сам термин, а также его технологические составляющие уже закреплены в российской стандартизации. На наш взгляд, его экономические, оборонные и технические возможности развития огромны. Полагаем что и другие страны Европы, Китай и США пойдут по этому пути. Об этом свидетельствует, например, огромное число программ ЕС цифровых двойников. На похожих с Великобританией темах развития цифровых двойников защищается множество диссертаций (вот некоторые из них – [69 -72]), и еще больше публикуется статей.

Огромное влияние на развитие национальных цифровых двойников окажут и общеевропейские проекты по их изучению и созданию, которые возможно приведут к появлению элементов общеевропейских цифровых двойников. Перечислим коротко некоторые:

1. IoTwins Распределенные цифровые двойники для промышленных МСП: платформа больших данных (Будущие фабрики и предприятия, управляемые цифровыми двойниками)

<https://cordis.europa.eu/project/id/857191>,  
<https://www.iotwins.eu/>

2. Ashvin Помощники по здоровому, безопасному и производительному виртуальному проектированию, эксплуатации и техническому обслуживанию строительства с использованием цифрового двойника  
<https://cordis.europa.eu/project/id/958161>,  
<http://www.ashvin.eu/>

3. Edge Twins НРС Вывод цифровых двойников на передний план для массовых приложений Индустрии 4.0  
<https://cordis.europa.eu/project/id/946009>,  
<https://edgetwins.eu/>

4. BIMprove Улучшение информационного моделирования зданий за счет отслеживания

строительных процессов в реальном времени  
<https://cordis.europa.eu/project/id/958450>,  
<https://www.bimprove-h2020.eu/>

5. Change2Twin Создавать и собирать предложения для поддержки малых и средних предприятий, которые станут чемпионами по цифровым двойникам  
<https://cordis.europa.eu/project/id/951956>,  
<https://www.change2twin.eu/digital-twin/>

6. COGITO Строительная фаза цифрового двойника  
<https://cordis.europa.eu/project/id/958310>

### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Сияглов С. А. Cyber-physical systems as a base for digital economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 18-25.
- [2] 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.
- [3] Куприяновский В. П., Сияглов С. А., Добрынин А. П. BIM-Цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть 1. Подходы и основные преимущества BIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 3– С. 1-8.
- [4] Куприяновский В. П., Сияглов С. А., Добрынин А. П. BIM-Цифровая экономика. Как достигли успеха? Практический подход к теоретической концепции. Часть 2. Цифровая экономика //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 3. – С. 9-20.
- [5] Куприяновский В. П. и др. Цифровая трансформация экономики, железных дорог и умных городов. Планы и опыт Великобритании //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 10. – С. 22-31.
- [6] Drozhzhinov V. et al. Smart Cities: models, tools, rankings, and standards //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 19-48.
- [7] Sokolov I. et al. Smart cities, infrastructure, and their anti-terrorist stability. The experience of integrating the US anti-terrorist standards and creating software for digital security //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 7. – С. 45-65.
- [8] Kupriyanovsky V. et al. Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IoT //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 10. – С. 55-86.
- [9] Куприяновский В. П. и др. Цифровая железная дорога-целостная информационная модель, как основа цифровой трансформации //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 10. – С. 32-42.
- [10] Kupriyanovsky V. et al. The new five-year plan for BIM-infrastructure and Smart Cities //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 8. – С. 20-35.
- [11] Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Сияглов С. А. Демистификация цифровой экономики //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 11. – С. 59-63.
- [12] 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.
- [13] Sinyagov S. et al. Building and Engineering Based on BIM Standards as the Basis for Transforming Infrastructures in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 46-79.
- [14] Kupriyanovsky V. et al. Semantics, metadata and ontologies in smart city applications-new BSI standards //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 6. – С. 94-108.
- [15] Kupriyanovsky V. et al. Formalized ontologies and services for high-speed and digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 6. – С. 69-86.
- [16] Волокитин Ю. И. и др. Проблемы цифровой экономики и формализованные онтологии //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 6. – С. 87-96.
- [17] Klimov A. et al. BIM and engineering formalized ontologies on the European digital railway in the EULYNX-data economy

- //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 8. – С. 38-65.
- [18] Kupriyanovsky V. et al. On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 8. – С. 66-78.
- [19] Pokusaev O. et al. On System of Systems ontologies in the national standards for UK digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 11. – С. 85-96.
- [20] Grinko O. et al. The ontologization of European Union data as a transition from a data economy to a knowledge economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 11. – С. 65-84.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 108-135.
- [25] Kupriyanovsky V. et al. BIM on the way to IFC5-alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 8. – С. 69-78.
- [26] Куприяновский В. П. и др. Технологии цифровых близнецов в транспортных коридорах для морских и водных путей в России //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 12. – С. 113-132.
- [27] Pokusaev O. et al. Learning Factories for Industry and Transportation in the Digital Twins Era //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 1. – С. 107-127.
- [28] Волокитин Ю. И. и др. Цифровые двойники знаний и онтологии для высшего технологического образования //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 1. – С. 128-144.
- [29] Namiot D. et al. Digital twins and discrete-event simulation systems //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 70-75.
- [30] Kari Tuukkanen, Jukka Erkkilä, DIGITAL TWIN FINLAND Project proposal for HX industrial participation PRE-STUDY, BUSINESS FINLAND Date: 18.12.2019 <https://www.businessfinland.fi/490eba/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/digitalization/hx-fighter-program/tp23366-digital-twin-finland-report-2019-12-18.pdf>
- [31] NEW SPACE ECONOMY, INNOVATION FUNDING, NETWORKS AND EXPORT SERVICES FOR FINNISH SPACE COMPANIES, BUSINESS FINLAND 2021 <https://www.businessfinland.fi/48fef4/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/digitalization/new-space-economy/nse-landscape-2021.pdf>
- [32] MIXED REALITY SPOLUTION FROM FINLAND, BUSINESS FINLAND 2021 <https://www.businessfinland.fi/49028e/globalassets/finnish-customers/news/2021/mixed-reality-solutions-from-finland-offering.pdf>
- [33] Akulenko, Elena Worldwide Digital Twins development : a patent landscape study, LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, School of Engineering Science Industrial Engineering and Management, 2020 [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161008/Master%27s%20Thesis\\_Akulenko.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161008/Master%27s%20Thesis_Akulenko.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [34] Beyond IoT: Digital Twins and Cyber-Physical Systems October 2019 <https://helloworldfuture.orange.com/en/physiques-beyond-iot-digital-twins-and-cyber-physical-systems/>
- [35] ПНСТ 441-2020 Информационные технологии. Умный город. Онтология верхнего уровня для показателей умного города Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [36] ПНСТ 443-2020 Информационные технологии. Умный город. Общие положения по интеграции и функционированию инфраструктур умных городов Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [37] ПНСТ 447-2020 Информационные технологии. Умный город. Типовая архитектура ИКТ умного города. Часть 3. Инженерные системы умного города Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [38] ПНСТ 440-2020 Информационные технологии. Умный город. Показатели ИКТ Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [39] ПНСТ 439-2020 Информационные технологии. Умный город. Совместимость данных Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [40] ПНСТ 418-2020 Информационные технологии. Интернет вещей. Структура системы интернета вещей реального времени ,Статус Принят, Дата введения 01.01.2021
- [41] ПНСТ 446-2020 Информационные технологии. Интернет вещей. Совместимость систем интернета вещей. Часть 2. Совместимость на транспортном уровне, Статус Принят, Дата введения 01.01.2021
- [42] ПНСТ 433-2020 Информационные технологии. Интернет вещей. Требования к платформе обмена данными для различных служб интернета вещей, Статус Принят ,Дата введения 01.01.2021
- [43] ПНСТ 420-2020 Информационные технологии. Интернет вещей промышленный. Типовая архитектура, Статус Принят, Дата введения 01.01.2021
- [44] ПНСТ 438-2020 Информационные технологии. Интернет вещей. Типовая архитектура, Статус Принят, Дата введения 01.01.2021
- [45] ГОСТ Р ИСО/МЭК 29161-2019 Информационные технологии. Структура данных. Уникальная идентификация для интернета вещей, Статус Действует, Дата введения 01.03.2020
- [46] Fei Tao, Qinglin Qi, Lihui Wang, A.Y.C. Nee. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4): 653-661. <https://www.engineering.org.cn/en/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- [47] Data for the public good, National Infrastructure Commission report, 2017, <https://nic.org.uk/app/uploads/Data-for-the-Public-Good-NIC-Report.pdf>
- [48] Gemini Principles, CDBB, 2018 <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf>
- [49] Hetherington, J., & West, M. (2020). The pathway towards an Information Management Framework - A 'Commons' for Digital Built Britain. doi.org/10.17863/CAM.52659, [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the\\_pathway\\_towards\\_an\\_imf.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the_pathway_towards_an_imf.pdf)
- [50] The approach to delivering a National Digital Twin for the United Kingdom Summary report, cdbb 2020 [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/approach\\_summaryreport\\_final.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/approach_summaryreport_final.pdf)
- [51] Partridge C, Mitchell A, Cook A, Leal D, Sullivan J and West M, CDBB, 2020 A Survey of Top-Level Ontologies - to inform the ontological choices for a Foundation Data Model DOI: <https://doi.org/10.17863/CAM.58311> [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/a\\_survey\\_of\\_top-level\\_ontologies\\_lowres.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/a_survey_of_top-level_ontologies_lowres.pdf)
- [52] David Leal, Al Cook, Chris Partridge, Jan Sullivan, Matthew West, CDBB, 2020, A Survey of Industry Data Models and Reference Data Libraries /To identify requirements for, and provide input to, a Foundation Data Model, [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/industry\\_data\\_models\\_and\\_reference\\_data\\_libraries\\_0.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/industry_data_models_and_reference_data_libraries_0.pdf)
- [53] Qiuchen Lu; Ajith Kumar Parlikad; Philip Woodall; Gishan Don Ranasinghe; Xiang Xie; Zhenglin Liang; Eirini Konstantinou; James Heaton; Jennifer Schooling Developing a Digital Twin at Building and City Levels: A Case Study of West 2 Cambridge Campus [https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085012/3/Lu\\_Developing%20a%20Digital%20Twin%20at%20Building%20and%20City%20Level\\_s\\_AAM.pdf](https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085012/3/Lu_Developing%20a%20Digital%20Twin%20at%20Building%20and%20City%20Level_s_AAM.pdf)
- [54] Place-based Digital Twins Use cases December 2020 Connected Places Catapult <https://cp.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/01/Place-based-Digital-Twins-Report-1-1.pdf>
- [55] ПНСТ 428-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Элементы визуализации цифровых двойников производства ,Дата публикации: 11.08.2020 Дата введения 01.01.2021
- [56] ПНСТ 429-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения, Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [57] ПНСТ 430-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура, Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [58] ПНСТ 431-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 3. Цифровое представление физических

- производственных элементов, Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [59] ПНСТ 432-2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 4. Обмен информацией ,Статус Принят Дата введения 01.01.20
- [60] Digital Twins for the Built Environment Standards Roadmap – 2021, Prepared by BSI for CDBB <https://digitaltwinhub.co.uk/files/file/59-digital-twins-for-the-built-environment-standards-roadmap-%E2%80%932021-long/>
- [61] Climate-Resilient River Operations in London by Predictive Digital Twin January 2020 Connected Places Catapult <https://cp.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/02/London.pdf>
- [62] Nii O. Attoh-Okine ,Big Data and Differential Privacy Analysis Strategies for Railway Track Engineering, This edition first published 2017, ©2017 John Wiley & Sons, Inc.
- [63] Mounir Bensalah, Abdelmajid Elouadi,Hassan Mharzi , Railway Information Modeling RIM The Track to Rail Modernization ,First published 2019 in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [64] The Rail Sector and the National Digital Twin ,Featured story 26 February 2020 <https://www.rssb.co.uk/what-we-do/insights-and-news/blogs/the-rail-sector-and-the-national-digital-twin>
- [65] HS1 to introduce digital twin condition monitoring, Jan 12, 2021, Written by Oliver Cuenca <https://www.railjournal.com/technology/hs1-to-introduce-digital-twin-condition-monitoring/>
- [66] A real-time digital twin of St-Pancras station, and the journey to create an emotion-optimised railway Featured story, 24 March 2020 <https://www.rssb.co.uk/what-we-do/insights-and-news/blogs/real-time-digital-twin-of-st-pancras-station-and-journey-to-create-an-emotion-optimised-railway>
- [67] Keeping Travellers Informed- Using real-time prediction to influence passenger behaviour to improve the management of disruption on the railway (COF-DSP-02) Data Sandbox+ RSSB 2021
- [68] A feasibility study towards the conceptual development of a real-time digital twin to reduce dwell time variations on the Thameslink route (COF-DSP-06) Data Sandbox+ , RSSB 2021
- [69] Riku Ala-Laurinaho, Sensor Data Transmission from a Physical Twin to a Digital Twin, Aalto University, P.O. BOX 11000, 00076 AALTO, [www.aalto.fi](http://www.aalto.fi), 2019, <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/37926>
- [70] J.F.A. (Jeffrey) Hokkeling BSc, Towards construction 4.0: An assessment on the potential of Digital Twins in the infrastructure sector, Department of Construction Management & Engineering University of Twente, 2020, [http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc\\_thesis\\_Jeffrey\\_Hokkeling.pdf](http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc_thesis_Jeffrey_Hokkeling.pdf)
- [71] André Malheiro, Data flow from BIM to Digital Twins, POLITECNICO DI MILANO, European Master in Building Information ii Modelling BIM A+, 2020, <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-AndreMalheiro-Dissertation.pdf>
- [72] Giovanni Coviello, BIM and BMS for the management of the building: the Manini Connect case for Digital Twin services, POLITECNICO DI MILANO, European Master in Building Information ii Modelling BIM A+, 2020, <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-GiovanniCoviello-Dissertation.pdf>
- [73] ПНСТ 416-2020 Система киберфизическая. Общие положения Статус Принят Дата введения 01.01.2021
- [74] ПНСТ 417-2020 Система киберфизическая. Термины и определения Статус Принят Дата введения 01.01.2021

# The ontologies of cyber-physical systems of the national digital twin of Great Britain and BIM on the examples of smart cities, railways, and other projects

Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, Alexander Klimov, Andrey Dobrynin, Alexey Korzun, Mikhail Zhabitskii, Nikolai Vykhodov, Alexander Lysogorsky

**Abstract**— The topic of digital twins is attracting a lot of attention from industry and transport as well as from academia today. The digital twin, being a virtual representation of a physical asset, allows describing the behavior of an asset during its life cycle based on two-way automatic communication. By linking real (physical) representation and cyberspace, this technology provides several benefits, including cost and time reduction during the design phase, timely product maintenance throughout the life cycle, predicting failures, and the ability to manage knowledge to optimize organizational workflows at the manufacturing and enterprise level. Now they are often understood in a weaker sense, as digital approximations for things for which they are twins. Full-fledged digital twins are not just representations of factory prototypes of things. They strive to be efficient simulations of real instances of these things in their real conditions, reflecting the full evolution of their life cycle, that is, to work in near real-time modes. Thus, we can talk about a whole spectrum of solutions within the framework of the concepts of digital twins, from the “lightest” to the “most difficult” ones. The latter may already have the dimension of a city or country. It is about national digital twins that we are talking about in this article.

**Keywords**—BIM, CPS.

## REFERENCES

- [1] Kupriyanovskij 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. – #. 2. – S. 18-25.
- [2] Kupriyanovskij 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.
- [3] Kupriyanovskij V. P., Sinjagov S. A., Dobrynin A. P. BIM-Cifrovaja jekonomika. Kak dostigli uspeha? Prakticheskij podhod k teoreticheskoj koncepcii. Chast' 1. Podhody i osnovnye preimushhestva BIM //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 3. – S. 1-8.
- [4] Kupriyanovskij V. P., Sinjagov S. A., Dobrynin A. P. BIM-Cifrovaja jekonomika. Kak dostigli uspeha? Prakticheskij podhod k teoreticheskoj koncepcii. Chast' 2. Cifrovaja jekonomika //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 3. – S. 9-20.
- [5] Kupriyanovskij V. P. i dr. Cifrovaja transformacija jekonomiki, zheleznyh dorog i umnyh gorodov. Plany i opyt Velikobritanii //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 10. – S. 22-31.
- [6] Drozhzhinov V. et al. Smart Cities: models, tools, rankings, and standards //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 3. – S. 19-48.
- [7] Sokolov I. et al. Smart cities, infrastructure, and their anti-terrorist stability. The experience of integrating the US anti-terrorism standards and creating software for digital security //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 7. – S. 45-65.
- [8] Kupriyanovskij V. et al. Smart infrastructure, physical and information assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IoT //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 10. – S. 55-86.
- [9] Kupriyanovskij V. P. i dr. Cifrovaja zheleznoj doroga-celostnaja informacionnaja model', kak osnova cifrovoj transformacii //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 10. – S. 32-42.
- [10] Kupriyanovskij V. et al. The new five-year plan for BIM-infrastructure and Smart Cities //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 8. – S. 20-35.
- [11] Kupriyanovskij V., Namiot D., Sinjagov S. Demystifying the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4. – #. 11. – S. 59-63.
- [12] Kupriyanovskij 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.
- [13] Sinjagov S. et al. Building and Engineering Based on BIM Standards as the Basis for Transforming Infrastructures in the Digital Economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 5. – S. 46-79.
- [14] Kupriyanovskij V. et al. Semantics, metadata and ontologies in smart city applications-new BSI standards //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 6. – S. 94-108.
- [15] Kupriyanovskij V. et al. Formalized ontologies and services for high-speed and digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 6. – S. 69-86.
- [16] Volokitin Ju. I. i dr. Problemy cifrovoj jekonomiki i formalizovannye ontologii //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 6. – S. 87-96.
- [17] Klimov A. et al. BIM and engineering formalized ontologies on the European digital railway in the EULYNX-data economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 8. – S. 38-65.
- [18] Kupriyanovskij V. et al. On the effects of formalized ontologies in the data economy-the EU experience //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 8. – S. 66-78.
- [19] Pokusaev O. et al. On System of Systems ontologies in the national standards for UK digital railways //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 11. – S. 85-96.
- [20] Grinko O. et al. The ontologization of European Union data as a transition from a data economy to a knowledge economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 11. – S. 65-84.
- [21] Kupriyanovskij 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.
- [22] Kupriyanovskij 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.
- [23] 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.

- [24] Pokusaev O. et al. BIM, Ontology and Asset Management Technologies on European Highways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 6. – S. 108-135.
- [25] Kupriyanovsky V. et al. BIM on the way to IFC5-alignment and development of IFC semantics and ontologies with UML and OWL for road and rail structures, bridges, tunnels, ports, and waterways //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 8. – S. 69-78.
- [26] Kuprijanovskij V. P. i dr. Tehnologii cifrovih bliznecov v transportnih koridorah dlja morskikh i vodnyh putej v Rossii //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – #. 12. – S. 113-132.
- [27] Pokusaev O. et al. Learning Factories for Industry and Transportation in the Digital Twins Era //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 1. – S. 107-127.
- [28] Volokitin Ju. I. i dr. Cifrovye dvojniki znaniy i ontologii dlja vysshego tehnologicheskogo obrazovaniya //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 1. – S. 128-144.
- [29] Namiot D. et al. Digital twins and discrete-event simulation systems //International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – #. 2. – S. 70-75.
- [30] Kari Tuukkanen, Jukka Erkkilä, DIGITAL TWIN FINLAND Project proposal for HX industrial participation PRE-STUDY, BUSINESS FINLAND Date: 18.12.2019 <https://www.businessfinland.fi/490eba/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/digitalization/hx-fighter-program/tp23366-digital-twin-finland-report-2019-12-18.pdf>
- [31] NEW SPACE ECONOMY, INNOVATION FUNDING, NETWORKS AND EXPORT SERVICES FOR FINNISH SPACE COMPANIES, BUSINESS FINLAND 2021 <https://www.businessfinland.fi/48fef4/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/digitalization/new-space-economy/nse-landscape-2021.pdf>
- [32] MIXED REALITY SPOLUTION FROM FINLAND, BUSINESS FINLAND 2021 <https://www.businessfinland.fi/49028e/globalassets/finnish-customers/news/2021/mixed-reality-solutions-from-finland-offering.pdf>
- [33] Akulenko, Elena Worldwide Digital Twins development : a patent landscape study, LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, School of Engineering Science Industrial Engineering and Management, 2020 [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161008/Master%27s%20Thesis\\_Akulenko.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161008/Master%27s%20Thesis_Akulenko.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [34] Beyond IoT: Digital Twins and Cyber-Physical Systems October 2019 <https://hellofuture.orange.com/en/physiques-beyond-iot-digital-twins-and-cyber-physical-systems/>
- [35] PNST 441-2020 Informacionnye tehnologii. Umnyj gorod. Ontologija verhnego urovnja dlja pokazatelej umnogo goroda Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [36] PNST 443-2020 Informacionnye tehnologii. Umnyj gorod. Obshhie polozheniya po integracii i funkcionirovaniyu infrastruktur umnyh gorodov Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [37] PNST 447-2020 Informacionnye tehnologii. Umnyj gorod. Tipovaja arhitektura IKT umnogo goroda. Chast' 3. Inzhenernye sistemy umnogo goroda Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [38] PNST 440-2020 Informacionnye tehnologii. Umnyj gorod. Pokazateli IKT Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [39] PNST 439-2020 Informacionnye tehnologii. Umnyj gorod. Sovmestimost' dannyh Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [40] PNST 418-2020 Informacionnye tehnologii. Internet veshhej. Struktura sistemy interneta veshhej real'nogo vremeni ,Status Prinjat, Data vvedeniya 01.01.2021
- [41] PNST 446-2020 Informacionnye tehnologii. Internet veshhej. Sovmestimost' sistem interneta veshhej. Chast' 2. Sovmestimost' na transportnom urovne, Status Prinjat, Data vvedeniya 01.01.2021
- [42] PNST 433-2020 Informacionnye tehnologii. Internet veshhej. Trebovaniya k platforme obmena dannyimi dlja razlichnyh sluzhb interneta veshhej, Status Prinjat ,Data vvedeniya 01.01.2021
- [43] PNST 420-2020 Informacionnye tehnologii. Internet veshhej promyshlennyj. Tipovaja arhitektura, Status Prinjat, Data vvedeniya 01.01.2021
- [44] PNST 438-2020 Informacionnye tehnologii. Internet veshhej. Tipovaja arhitektura, Status Prinjat, Data vvedeniya 01.01.2021
- [45] GOST R ISO/MJeK 29161-2019 Informacionnye tehnologii. Struktura dannyh. Unikal'naja identifikacija dlja interneta veshhej, Status Dejstvuet, Data vvedeniya 01.03.2020
- [46] Fei Tao, Qinglin Qi, Lihui Wang, A.Y.C. Nee. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4):653-661. <https://www.engineering.org.cn/en/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- [47] Data for the public good, National Infrastructure Commission report, 2017, <https://nic.org.uk/app/uploads/Data-for-the-Public-Good-NIC-Report.pdf>
- [48] Gemini Principles, CDBB, 2018 <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf> [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the\\_pathway\\_towards\\_an\\_imf.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the_pathway_towards_an_imf.pdf)
- [49] Hetherington, J., & West, M. (2020). The pathway towards an Information Management Framework - A 'Commons' for Digital Built Britain. doi.org/10.17863/CAM.52659, [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the\\_pathway\\_towards\\_an\\_imf.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/the_pathway_towards_an_imf.pdf)
- [50] The approach to delivering a National Digital Twin for the United Kingdom Summary report, cdbb 2020 [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/approach\\_summaryreport\\_final.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/approach_summaryreport_final.pdf)
- [51] Partridge C, Mitchell A, Cook A, Leal D, Sullivan J and West M, CDBB, 2020 A Survey of Top-Level Ontologies - to inform the ontological choices for a Foundation Data Model DOI: <https://doi.org/10.17863/CAM.58311> [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/a\\_survey\\_of\\_top-level\\_ontologies\\_lowres.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/a_survey_of_top-level_ontologies_lowres.pdf)
- [52] David Leal, Al Cook, Chris Partridge, Jan Sullivan, Matthew West, CDBB, 2020, A Survey of Industry Data Models and Reference Data Libraries /To identify requirements for, and provide input to, a Foundation Data Model, [https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/industry\\_data\\_models\\_and\\_reference\\_data\\_libraries\\_0.pdf](https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/industry_data_models_and_reference_data_libraries_0.pdf)
- [53] Qiuchen Lu; Ajith Kumar Parlikad; Philip Woodall; Gishan Don Ranasinghe; Xiang Xie; Zhenglin Liang; Eirini Konstantinou; James Heaton; Jennifer Schooling Developing a Digital Twin at Building and City Levels: A Case Study of West 2 Cambridge Campus [https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085012/3/Lu\\_Developing%20a%20Digital%20Twin%20at%20Building%20and%20City%20Levels\\_AAM.pdf](https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10085012/3/Lu_Developing%20a%20Digital%20Twin%20at%20Building%20and%20City%20Levels_AAM.pdf)
- [54] Place-based Digital Twins Use cases December 2020 Connected Places Catapult <https://cp.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/01/Place-based-Digital-Twins-Report-1-1.pdf>
- [55] PNST 428-2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. Jelementy vizualizacii cifrovih dvojnikov proizvodstva ,Data publikacii: 11.08.2020 Data vvedeniya 01.01.2021
- [56] PNST 429-2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. Chast' 1. Obshhie polozheniya, Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [57] PNST 430-2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. Chast' 2. Tipovaja arhitektura, Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [58] PNST 431-2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. Chast' 3. Cifrovoe predstavlenie fizicheskikh proizvodstvennyh jelementov, Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [59] PNST 432-2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. Chast' 4. Obmen informaciej ,Status Prinjat Data vvedeniya 01.01.2021
- [60] Digital Twins for the Built Environment Standards Roadmap – 2021, Prepared by BSI for CDBB <https://digitaltwinhub.co.uk/files/file/59-digital-twins-for-the-built-environment-standards-roadmap-%E2%80%932021-long/>
- [61] Climate-Resilient River Operations in London by Predictive Digital Twin January 2020 Connected Places Catapult <https://cp.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2021/02/London.pdf>
- [62] Nii O. Attoh-Okine ,Big Data and Differential Privacy Analysis Strategies for Railway Track Engineering, This edition first published 2017, ©2017 John Wiley & Sons, Inc.
- [63] Mounir Bensalah, Abdelmajid Elouadi, Hassan Mharzi, Railway Information Modeling RIM The Track to Rail Modernization ,First published 2019 in Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [64] The Rail Sector and the National Digital Twin ,Featured story 26 February 2020 <https://www.rssb.co.uk/what-we-do/insights-and-news/blogs/the-rail-sector-and-the-national-digital-twin>
- [65] HS1 to introduce digital twin condition monitoring, Jan 12, 2021, Written by Oliver Cuenca <https://www.railjournal.com/technology/hs1-to-introduce-digital-twin-condition-monitoring/>
- [66] A real-time digital twin of St-Pancras station, and the journey to create an emotion-optimised railway Featured story, 24 March 2020 <https://www.rssb.co.uk/what-we-do/insights-and-news/blogs/real-time->

digital-twin-of-st-pancras-station-and-journey-to-create-an-emotion-optimised-railway

[67] Keeping Travellers Informed- Using real-time prediction to influence passenger behaviour to improve the management of disruption on the railway (COF-DSP-02) Data Sandbox+ RSSB 2021

[68] A feasibility study towards the conceptual development of a real-time digital twin to reduce dwell time variations on the Thameslink route (COF-DSP-06) Data Sandbox+ , RSSB 2021

[69] Riku Ala-Laurinaho , Sensor Data Transmission from a Physical Twin to a Digital Twin, Aalto University, P.O. BOX 11000, 00076 AALTO,www.aalto.fi, 2019, <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/37926>

[70] J.F.A. (Jeffrey) Hokkeling BSc, Towards construction 4.0: An assessment on the potential of Digital Twins in the infrastructure sector,Department of Construction Management & Engineering University of Twente, 2020, [http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc\\_thesis\\_Jeffrey\\_Hokkeling.pdf](http://essay.utwente.nl/81929/1/MSc_thesis_Jeffrey_Hokkeling.pdf)

[71] André Malheiro, Data flow from BIM to Digital Twins, POLITECNICO DI MILANO,European Master in Building Information ii Modelling BIM A+, 2020, <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-AndreMalheiro-Dissertation.pdf>

[72] Giovanni Coviello, BIM and BMS for the management of the building: the Manini Connect case for Digital Twin services,POLITECNICO DI MILANO,European Master in Building Information ii Modelling BIM A+,2020, <https://bimaplus.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-GiovanniCoviello-Dissertation.pdf>

[73] PNST 416-2020 Sistema kiberfizicheskaja. Obshhie polozenija Status Prinjat Data vvedenija 01.01.2021

[74] PNST 417-2020 Sistema kiberfizicheskaja. Terminy i opredelenija Status Prinjat Data vvedenija 01.01.2021