

Технологический Форсайт и сбалансированное инновационное развитие с точки зрения сложных динамических систем

Клаус Майнцер

Профессор^{а,b}; президент^с, mainzer@tum.de

^а Мюнхенский технический университет (Technical University of Munich), Германия, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany

^б Исследовательский центр им. Карла-Фридриха фон Вайцзекера (Carl Friedrich von Weizsäcker Center) Тюбингенского университета им. Эберхарда Карлса (Eberhard Karls University Tübingen), Германия, Geschwister-Schöll-Platz, 72074 Tübingen, Germany

^с Европейская академия наук и искусств (European Academy of Sciences and Arts), Австрия, Sankt-Peter-Bezirk 10, 5020 Salzburg, Austria

Аннотация

Информационные и коммуникационные технологии, трансформируя большинство областей, развиваются по нелинейным закономерностям. Игнорирование нелинейных принципов сложных динамических систем блокирует разработку стратегий сбалансированного инновационного развития. Компании и государства лишаются возможности эффективно отвечать на «большие вызовы». Линейная логика не позволяет охватить одновременно широкий спектр критически важных областей в Форсайт-проектах, внедрять междисциплинарный подход к разработке инновационных стратегий, правильно оценивать риски и принимать взвешенные решения.

В статье предлагается решение — управление на основе киберфизических систем (КФС), которые работают по принципам динамической сложности и нелинейности. Они не просто интегрируют компьютерные вычисления с физическими действиями, но

встроены в повседневную реальность, являя собой нечто большее, чем совокупность интеллектуальных вычислительных устройств. КФС трансформируются в коллективные социальные системы и интегрируют информационные, энергетические и материальные потоки, адаптируются к физическим процессам.

КФС создают основу для устойчивой информационной инфраструктуры и, как следствие, предпосылки для наращивания инновационного потенциала компании, региона, страны. Они позволяют анализировать все этапы инновационного проекта одновременно с технической и организационной точек зрения, охватывать всевозможные социальные последствия и вызовы, фиксировать неожиданные перспективные направления. КФС обладают децентрализованной структурой, что позволяет с их помощью решать сложные задачи, управлять в реальном времени большими и сложными структурами, такими как электроэнергетика, транспорт, «умный город», здравоохранение и др.

Ключевые слова: социотехнологические системы; инновационные стратегии; Форсайт; сложные динамические системы; междисциплинарность; управление сложными структурами; киберфизические системы

Цитирование: Mainzer K. (2020) Technology Foresight and Sustainable Innovation Development in the Complex Dynamical Systems View. *Foresight and STI Governance*, vol. 14, no 4, pp. 10–19. DOI: 10.17323/2500-2597.2020.4.10.19

Technology Foresight and Sustainable Innovation Development in the Complex Dynamical Systems View

Klaus Mainzer

Professor^{a,b}; and President^c, mainzer@tum.de

^a Technical University of Munich, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany

^b Carl Friedrich von Weizsäcker Center, Eberhard Karls University Tübingen, Geschwister-Scholl-Platz, 72074 Tübingen, Germany

^c European Academy of Sciences and Arts, Sankt-Peter-Bezirk 10, 5020 Salzburg, Austria

Abstract

Information and communication technologies (ICT) which are transforming most areas develop non-linearly. Failure to take into account the nonlinear principles of complex dynamic systems hinders development of balanced innovation strategies. Companies and governments lose the ability to effectively respond to “grand challenges”. The linear approach does not allow covering a wide range of critical areas simultaneously in the scope of Foresight projects, prevents from applying an interdisciplinary approach to developing innovation strategies, correct risks assessment, and making informed decisions.

The paper proposes a solution: management based on “cyber-physical systems” (CPS) built on dynamic complexity and nonlinearity principles. Such systems not only integrate computing and physical action but are embedded in

everyday environment; they are more than the sum of multiple intelligent computing devices. CPS transforms into collective social systems, integrate information, energy, and material flows, and adapt to physical processes.

Cyber-physical systems can offer a sustainable information infrastructure which serves as a prerequisite for building up the innovation potential of a company, region, or country. They make it possible to analyse all stages of an innovation project from the technical and organisational points of view simultaneously, cover all possible social consequences and challenges, and identify unexpected promising developments. CPS have a decentralised structure which allows to solve complex problems and manage large and complex structures in real time, such as an energy grid, transport, smart city, healthcare, etc.

Keywords: socio-technical systems; innovation strategies; foresight; complex dynamic systems; inter-disciplinary approach; management of complex structures; cyber-physical systems

Citation: Mainzer K. (2020) Technology Foresight and Sustainable Innovation Development in the Complex Dynamical Systems View. *Foresight and STI Governance*, vol. 14, no 4, pp. 10–19. DOI: 10.17323/2500-2597.2020.4.10.19

В прошлом корпоративные стратегии исходили из предположения, что развитие цифровых технологий определяется экспоненциальными закономерностями. Это касается наращивания вычислительных мощностей, емкости систем хранения данных, снижения размера и стоимости устройств, повышения их эффективности и т. д. Считалось, что для достижения экономического успеха достаточным условием будет гибкая адаптация к подобной динамике.

Однако история показывает, что технологическое развитие никогда не подчинялось жестким закономерностям. Из возникающих инновационных импульсов зачастую «вырастали» непредвиденные направления. В середине прошлого века разработчики в сфере информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) фокусировались на создании мощных, но немногочисленных компьютеров (мэйнфреймов). Затем появились динамичные стартапы, стратегия которых заключалась в налаживании массового производства небольших персональных компьютеров, в итоге быстро распространившихся по всему миру¹. Появление интернета в его нынешней версии как основы глобальных коммуникаций также изначально не входило в планы военных инженеров, создававших сети связи для оперативного реагирования в случае ядерного удара. То же самое можно сказать о развитии технологий смартфонов и производящих их компаний. В настоящий момент по-прежнему отсутствуют представления, какие идеи для развития могут появиться в ближайшие десятилетия и какие из современных тенденций они могут подорвать. Научно-технологический прогресс имеет определенное сходство с биологической эволюцией [Nelson, Winter, 1982; Nelson, 2018]. В такой системе инновации играют роль мутаций, рынки осуществляют отбор, а социальные институты определяют развитие трендов аналогично тому, как экологическая обстановка задает условия эволюции. Тем не менее ее алгоритмы в течение миллионов лет оставались «слепыми», в то время как человек, осознающий ход технологического развития, способен целенаправленно контролировать тенденции и влиять на них, по крайней мере на коротких интервалах. В свою очередь образы будущего определяют цели и устремления людей и через осознание причинно-следственных связей — направления дальнейшего развития. Это можно назвать «нормативным эффектом реальности» (*normative force of the factual*) [Bezemek, 2019]. Другими словами, у любого представления о перспективах технологического развития могут появиться убежденные сторонники. Если в их числе окажутся руководители ведущих компаний и исследовательских центров, соответствующий тренд с высокой долей вероятности будет реализован. Таким образом, прогноз становится фактической реальностью — «само-

исполняющимся пророчеством» [King, 1973; Pop, 2015; Biggs, 2017].

История эволюции свидетельствует, что, несмотря на фундаментальные «детерминистические» законы, существуют возможности для воплощения разнообразных сценариев, однако лишь некоторые становятся реальностью. Соответственно сами законы природы предусматривают «открытость» будущего, и правильнее говорить не о каком-то конкретном «будущем» (*future*), а о «вариантах будущего» (*futures*) [Glenn, Gordon, 2009; Ringland, 2010; Godet, Roubelat, 1996; van der Heijden, 1996]. Изменения экономических, экологических и социальных условий, а также самого технологического ландшафта влияют на вектор его дальнейшего развития. При создании новых разработок следует применять подход, известный как технологический дизайн (*technological design*)².

Сценарное планирование и метод Дельфи в корпоративных стратегиях

Технологии работы с большими данными, основанные на алгоритмах, обеспечивают количественную составляющую оценки будущего, тогда как сценарное планирование и метод Дельфи отвечают за ее «качественный» аспект. В отличие от прогнозов, они не предназначены для точного «расчета» будущего, но дают представление о том, как могут развиваться события. Сценарные методы исходят из глубокого и всеохватного понимания событий и опираются на знания, опыт и интуицию экспертов, оценивающих возможные варианты будущего [Häder, 2002]. Сценарии описывают будущий контекст в виде гипотез, анализ которых позволяет выявлять причинно-следственные логические связи, возможные последствия и квалифицировать альтернативные варианты по степени их предпочтительности. Отправной точкой служит изучение настоящего и прошлого с опорой на эмпирические данные. Затем формируется базовый сценарий, предполагающий экстраполяцию в будущее (при допущении сохранения определенных ограничений). По мере формулирования предположений, что те или иные условия будут меняться, возникают альтернативные сценарии, которые по мере отдаления от текущего момента будут отличаться от базового варианта все существеннее. В текущем моменте образуется своего рода воронка, которая постепенно расширяется вокруг временной оси базового сценария. На ее периферии располагаются как положительные, так и отрицательные экстремальные сценарии.

Сказанное можно проследить на примере сценариев для энергетики. Большинство прогнозов исходят из того, что спрос на традиционные энергоносители сохранится в ближайшие десятилетия, а предметом оценки

¹ См., например: <https://newsroom.intel.com/editorials/pc-evolution-from-mainframe-to-perceptual-computing/#gs.gqgpqe>, дата обращения 26.09.2020.

² Технологический дизайн — подход, применяемый при создании большинства новейших технологий. Как и научное исследование, он строится на фактологической и доказательной базах, предполагает определенную последовательность шагов для решения проблем или ответа на вопрос. Этапы технологического дизайна включают: идентификацию проблемы, ее исследование, выработку возможных решений, выбор лучшего решения, создание модели, ее тестирование, совершенствование и повторное тестирование модели при необходимости, принятие итогового решения. Подробнее см., например, [Berg, 1998].

вариативных возможностей развития выступают альтернативные источники энергии. На этой основе оцениваются различные варианты дальнейших событий в зависимости от тех или иных политических решений.

Другой широко распространенный инструмент экспертной оценки возможной динамики событий — метод Дельфи [Glenn, Gordon, 2009; Häder, 2002]. В отличие от сценарного подхода, Дельфи предполагает сбор и итеративную обработку мнений большого числа экспертов с последующей выработкой определенного консолидированного представления о будущем. Дельфи используется ведомствами и исследовательскими центрами для обоснования решений об инвестициях в перспективные инновации. Знания, опыт, идеи и мнения экспертов проходят сквозь череду итераций. На выходе формируется единое согласованное видение будущего или набор реалистичных альтернативных его вариантов. Заказчики получают рекомендации по стратегии реализации проекта. Эффективность данного метода зависит от квалификации экспертов, их способности к междисциплинарному взаимодействию. Трудности обычно не возникают, если обсуждаются тенденции в рамках той или иной области. Однако они появляются, когда необходимо предпринять комплексную, междисциплинарную оценку сложной социотехнологической системы, такой как «умный город».

При строительстве инфраструктурных объектов, включая электростанции, аэропорты, транспортные развязки, системы безопасности, прежде всего опираются на мнения инженеров. Однако для оценки того, как новые объекты повлияют на качество жизни населения, насколько удобно ими пользоваться, необходимо подключать специалистов из других сфер, в частности социологов. Не менее важны прямой диалог с заинтересованной общественностью, ее вовлечение в принятие решений. Возникает сложный процесс оценки и коммуникаций, в ходе которого следует учитывать не только междисциплинарные знания, но также мнения и отношение людей. Это в свою очередь усложняет задачу оценки рисков и принятия взвешенных решений.

От социотехнологических систем к интеллектуальным инфраструктурам

Развитие цифровизации и технологий искусственного интеллекта радикально трансформирует социотехнологические системы [Mainzer, 2019]. Классические компьютерные системы характеризовались четким разделением физического и виртуального миров. Мехатронные системы контроля с многочисленными датчиками и приводами, которыми, например, оснащены современные автомобили и самолеты [Isermann, 2009], этой парадигме уже не соответствуют. Сканируя окружающую среду и обрабатывая полученную информацию, они сами могут оказывать ответное скоординированное влияние [Hawkins, Abdelzahr, 2005]. Перспективы развития мехатроники связываются с внедрением киберфизических систем (КФС), которые не просто интегрируют компьютерное управление с физическим действием, но

встроены в повседневную реальность. Примером могут служить интегрированные интеллектуальные системы электроснабжения [Lee, Seshia, 2016; NSF, 2008; Gaiimo et al., 2020]. КФС состоят из множества взаимосвязанных компонентов, самостоятельно координирующих работу для выполнения общей задачи. Благодаря сетевой интеграции КФС значительно превосходят изолированные мехатронные структуры, так как представляют собой нечто большее, чем совокупность массы интеллектуальных вычислительных устройств [Rajkumar et al., 2010].

Интеллектуальные функции отдельных подсистем распространяются на всю систему. Аналогично интернету КФС трансформируются в коллективные социальные системы, которые, помимо информационных потоков, интегрируют еще и энергетические, материальные и метаболические потоки, в частности мехатронные системы и организмы. Анализ «встроенных систем» и мехатроники положил начало комплексному изучению КФС [Wayne, 2008]. Встраивание информационных и коммуникационных систем в повседневную жизнь привело к появлению новых требований к производительности, таких как отказоустойчивость, надежность, отсутствие сбоев, безопасный доступ и возможность одновременного использования множественных систем в реальном времени. Однако в ходе внедрения соответствующих процессов управления и контроля стали проявляться очевидные проблемные зоны, от которых зависит экономическая и экологическая эффективность применяемых разработок. Например, это касается автоматических систем управления движением, призванных предотвращать заторы и оптимизировать траектории передвижения транспортных средств [Wedde et al., 2007]. Не менее сложной задачей оказалось обеспечение электромобилей питанием из альтернативных источников, в частности солнечных батарей или ветряных турбин. Аналогичная проблема характерна и для других возобновляемых энергоносителей, которые воспринимаются как надежный резервный вариант поставки энергии для сетей электроснабжения. Эти и подобные структуры неуклонно усложняются. Для обеспечения функционирования требуются высокоадаптивные системы управления и контроля, гибкая системная архитектура с возможностями расширения, масштабирования и своевременного ремонта. Попытка централизованного управления такими системами оказалась главным препятствием для реализации перечисленных требований. Необходимость обработки колоссальных объемов информации увеличивает время и затрудняет оперативное реагирование для принятия соответствующих мер. Так, крупные транспортные системы весьма динамичны. Поэтому, даже если сообщения о пробках передавать в центр управления движением каждые две минуты, их невозможно анализировать и учитывать достаточно быстро, чтобы адаптироваться к реальной дорожной ситуации. Как следствие, для отдельных транспортных средств создаются собственные навигационные системы, позволяющие им рассчитывать индивидуальные альтернативные маршруты. Однако если все устройства в системе применяют один и тот же статистический алгоритм, то в стремлении избежать пробок весь

транспорт направляется по одному и тому же маршруту, что только увеличивает хаос. Таким образом, в рамках КФС процессы управления и информационные потоки адаптируются к физическим процессам [European Commission 2006], аналогично живым организмам и популяциям в ходе эволюции. Программные архитектуры, созданные по принципу «сверху вниз», налагаемые на физические процессы «сверху», отмеченную проблему не решают. Эффективным средством видятся распределенные, многоуровневые системы контроля и управления по принципу «снизу вверх», программные процессы с высокой степенью автономности и диверсифицированные стратегии обучения персонала. Это демонстрируют интеллектуальные сети, которые помимо электроэнергии передают данные, чтобы обеспечить нормальное функционирование.

Формируются глобальные и транснациональные сетевые структуры (аналогично интернету), в состав которых входят как теплоэлектростанции, работающие на ископаемом топливе, так и установки, базирующиеся на возобновляемых источниках (фотоэлектрические преобразователи, ветряные электростанции) и биогазовых энергогенераторах. Кроме того, домохозяйства могут производить энергию для себя и других пользователей с помощью фотоэлектрических систем, биогазовых установок или топливных элементов [Al Dakheel et al., 2020]. Реализуется принцип «локальной активности»: энергия, произведенная бытовыми установками, поступает в сеть и используется в глобальных схемах распределения. Тем самым интеллектуальные электросети с интегрированными коммуникационными системами обеспечивают динамически регулируемое энергоснабжение [Wedde, Lehnhoff, 2007]. Это пример больших и сложных структур, работающих в режиме реального времени по принципам КФС. Большие электростанции накапливают резерв энергии, чтобы избежать проблемы в случае возникновения кратковременных пиков нагрузки или падения напряжения. Задача интеллектуальных систем в данном случае заключается в гибком перераспределении совокупного запаса накопленной энергии согласно потребностям пользователей. Ключевая проблема с переходом на возобновляемые источники заключается в большом количестве ограничений в вопросах функциональности, безопасности, надежности, своевременности подачи, отказоустойчивости и адаптируемости. Благодаря децентрализованной структуре, построенной по принципу «снизу вверх», КФС выглядят эффективным средством для преодоления этих ограничений. В итоге обеспечивается устойчивое функционирование усложняющихся систем снабжения. Главную роль играет организация потоков данных для контроля энергоснабжения, выполняющая своеобразную функцию нервной системы организма.

Сложные сети — пример динамических систем, которые моделируются с помощью математической теории сложных систем и синергетики [Mainzer, 2007]. Как

в природе, так и в технологической сфере формируются сложные динамические системы — сетевые структуры, в которых элементы взаимодействуют по локальным правилам: от клеточных автоматов³ до нейронных сетей и интернета. Локально активные элементы (нейроны, транзисторы и узлы) формируют усложненные сочетания и структуры, определяющие совокупную производительность всей системы. Это применимо и к жизнедеятельности организма, когнитивным функциям мозга, роевому интеллекту (*swarm intelligence*) [Lozito, Salvini, 2020] и организации технических инфраструктур, в частности энергетических систем. Для расчета показателей и характеристик подобных систем требуются знания из области математики сетей. Создание сетей начинается с цифровизации действующих инфраструктур, большинство которых создавались как обособленные целостные системы без какой-либо координации их взаимодействия. Примеры — транспорт, энергетика, здравоохранение, государственное управление и образование. В результате появления «интернета вещей» возникло пересечение функциональных направлений, таких как «умные»: дом, производство, город и регион. Интеллектуальная связка ранее самостоятельных «субъектов» открывает новые возможности для повышения эффективности и дальнейшего развития. Однако возникают и новые задачи интеграции технологических, экономических, правовых, нормативных, политических и социальных аспектов. Интеллектуальные сети и сервисы создаются путем объединения классических инфраструктур, которые обогащаются искусственным интеллектом (появляются автономно реализуемые, самоуправляемые функции и компоненты). Их «интеллектуальность» проявляется как «вертикально» — в пределах конкретного направления (например, здравоохранение или транспорт), так и «горизонтально», с синтезированием разных направлений [Sa, Corke, 2014; Alegre et al., 2014; Bassett et al., 2017].

Стратегическое планирование в контексте Индустрии 4.0

Повсеместное проникновение интернет-технологий в промышленное производство положило начало очередной стадии индустриализации — Индустрии 4.0 [Schwab, 2016]. Первую промышленную революцию (Индустрия 1.0) связывают с изобретением паровой машины. Вторая волна (Индустрия 2.0) характеризуется введением схемы конвейерного производства, впервые опробованной на заводе Генри Форда. Оно носит алгоритмический характер: продукт создается шаг за шагом в соответствии с фиксированной программой посредством разделения рабочих функций. В рамках Индустрии 3.0 в производственный процесс включаются промышленные роботы, которые, впрочем, остаются статичными, выполняя какую-либо конкретную операцию по заданной программе [Tantawi et al., 2019].

³ Клеточный автомат — дискретная модель, изучаемая в ряде естественнонаучных дисциплин, включая микромеханику. Основные направления ее использования — изучение алгоритмической разрешимости определенных задач и определение отправных точек для построения процедур их решения. Подробнее см., например, [Schiff, 2007].

В Индустрии 4.0 производственный процесс гибко регулируется взаимодействием между персоналом, оборудованием и транспортом. При этом ключевую роль играет работа с большими данными, включающими не только структурированные бизнес-показатели компаний, но и неструктурированную информацию из социальных сетей, сигналы, поступающие от датчиков, аудио- и видеоданные [Dean, 2014]⁴. В Индустрии 4.0 продукты могут изготавливаться индивидуально в заданное время с учетом любых нюансов предпочтений заказчика. Технология, производство и рынок интегрируются в социотехнологическую систему, которая гибко самоорганизуется и автоматически адаптируется к меняющимся условиям, — промышленную КФС [Acatech, 2011, 2012]. Данные, поступающие от машин и датчиков, отслеживаются, передаются, анализируются и интегрируются с текстовыми документами. Соответствующие технологии больших данных нацелены на ускорение бизнес-процессов и, как ожидается, обеспечат оперативное и эффективное принятие решений. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) объединяются в сети, обмениваются данными с деталями и компонентами через чипы RFID и самостоятельно выполняют измерения. Автоматизация касается и систем доставки. Появляется возможность использовать социальное познание при взаимодействии людей и машин. Снижается нагрузка на персонал, повышается производительность. Однако для установки и наладки подобных машин и оборудования требуются специалисты с обогащенными компетенциями. Помимо гибкого производства на заказ Индустрия 4.0 расширяет возможности децентрализованного индивидуального энергоснабжения. По всему спектру направлений, от промышленности до персонализированной медицины, наблюдается отход от массового стандартного производства в концепции Генри Форда.

В последние десятилетия вычислительные мощности удваиваются примерно каждые полтора года при одновременной миниатюризации устройств, повышении их доступности. Подобная тенденция наблюдается и в отношении количества датчиков, объема данных и т. п. Компании сталкиваются с необходимостью адаптировать корпоративную структуру для гибкого, интеллектуального решения проблем. Посредством ИКТ традиционное материальное (физическое) производство постепенно становится «виртуальным» и управляется приложениями и программными модулями. Беспилотные технологии проникают во все большее число сфер. Так, Google — яркий пример экспоненциально растущей ИТ-компании — создает автономные электромобили. Масштабные перспективы связываются с распространением технологии 3D-печати в автомобильной промышленности, что может радикально изменить ее облик, если доступные 3D-принтеры будут печатать детали и компоненты автомобилей. Многое будет зависеть от того, какие данные вводятся в 3D-принтеры, и тех, кто их вводит. ИТ-компании

преобразуют почти все сферы деятельности, но и им самим необходимо адаптироваться. Это прослеживается на примере компании Microsoft, которая продолжает производить программное обеспечение в стиле Индустрии 2.0 в расчете на массового потребителя со «стандартными» запросами. Энергетические компании все сильнее ориентируются на децентрализованный рынок и ищут оптимальные решения на основе изучения спроса. Возникают новые бизнес-модели, такие как «покупай и конструируй» (*buy and build*) [Francis et al., 2013; Bansraj et al., 2018]. Ставка на более глубокую детализацию и персонализацию потребностей — характерная черта «интеллектуальных» компаний, для которых повышение доверия потребителей имеет первоочередное значение. Но существует и определенный скептицизм в отношении «облачных технологий». Успешные средние предприятия предпочитают не переходить на подобную инфраструктуру из-за опасений промышленного шпионажа либо скептицизма в отношении неопределенных перспектив окупаемости значительных инвестиционных затрат, связанных с ее внедрением.

Устаревшие технологии безопасности — слабое место Индустрии 4.0. Требуется поиск новых решений, которые обеспечат безопасное хранение информации, исключение доступа к ней посторонних. Вопрос безопасности данных зависит и от персонала. Автоматизация процессов обеспечивается тем, что многочисленные датчики, камеры, фотоэлектрические сенсоры и другие устройства постоянно фиксируют колоссальное количество данных. Однако возникает вопрос о разграничении доступа к ним, местах и сроках их хранения, потенциальных пользователей. Ведутся и обширные дискуссии об эффектах автоматизации для рынков труда и социальных последствиях распространения искусственного интеллекта. Создание интеллектуальных фабрик направлено на повышение эффективности производства, ликвидацию рутинных и механических операций, как ручных, так и интеллектуальных. Подобный подход вовсе не нов — он практикуется в индустриализации с XIX в. И хотя потребность в определенных рабочих местах со временем отпадает, на их месте появляются новые. Особое значение придается обслуживанию клиентов, поскольку общение с ними и разработка бизнес-моделей требуют не только широкого спектра знаний в области бизнеса и управления, но и гибкости, опыта работы с людьми и знания психологии. Основная доля возникающих профессий связывается с мехатроникой и робототехникой. Следовательно, автоматизация на основе искусственного интеллекта ведет к снижению производственных затрат и тем самым способствует росту рынка труда для широкого круга компетентных работников. Это позволит странам с образованным и высококвалифицированным персоналом вернуть свои производства из регионов мира, характеризующихся низкой оплатой труда. В высокоавтоматизированной Германии уровень безработицы значительно ниже, чем в других европейских странах,

⁴ См. также: <https://www.oracle.com/big-data/what-is-big-data.html>, дата обращения 26.09.2020.

где безработица связана с отсутствием реформ на рынке занятости.

Распространенное предположение, что в будущем окажутся востребованными только высококвалифицированные инженеры с высшим образованием, а все остальное будут производить машины, не имеет оснований. Разработка инноваций останется актуальной для всех областей. В сфере разработки двигателей и проектирования производственных линий инженерам придется овладеть навыками машиностроения, электроники и ИКТ. Ранее эти дисциплины не входили в сферу их компетенции. Инженеры столкнутся с необходимостью работы в составе специализированных групп для решения сложных, комплексных задач Индустрии 4.0. Навыки междисциплинарного сотрудничества становятся обязательным требованием. Сохранится профессия «оператор токарного станка» в сфере металлообработки, но таким специалистам предстоит управлять объединенными в сеть станками с ЧПУ. Соответственно изменятся требования к их квалификации. Во многих областях жизненный цикл инноваций оказывается короче, чем продолжительность обучения персонала. Поэтому к разработке обучающих программ следует подходить с особой тщательностью, учитывая стремительное устаревание программного обеспечения и многих производственных инструментов. В будущем постоянное освоение работниками новых производственных процессов станет нормой.

Ответственный подход к созданию интеллектуальных инфраструктур

Важнейшим условием превращения социотехнологических систем в платформы для оказания разнообразных услуг видится интеграция компьютерных сетей в социальную инфраструктуру с учетом социальных, экономических и экологических факторов. Подобные системы должны составлять единую сеть (например, на основе интернета), быть устойчивыми к внешним условиям, адаптироваться и гибко реагировать на изменения [Jones et al., 2013; Behymer, Flach, 2016; van de Poel, 2020]. Такие варианты уже внедрены в офисах, домохозяйствах, социальных учреждениях, на транспорте. Интеллектуальные инфраструктуры, являясь сложными системами, объединяют разные технологические сферы [Geisberger, Broy, 2012]. Они управляются единым программным обеспечением (например, «умные»: дом, фабрика, больница или транспортная система) и предусматривают промежуточные программные инструменты для перевода команд пользователя на машинный язык. Интеллектуальные инфраструктурные объекты, такие как город или аэропорт, рассматриваются как виртуальные машины⁵. Интегрированный клиентский интерфейс обеспечивает прозрачное и понятное для пользователя взаимодействие с системой. На более глубоком уровне расположены определенные доменные архитектуры — транспортной системы, системы

здравоохранения, промышленного предприятия (те, что непосредственно выполняют работу и оказывают услуги пользователю). Подобную модель можно перенести на систему управления городом, охватывающую транспорт, здравоохранение, промышленные объекты, муниципальное энергоснабжение, мусоросжигательные заводы и др. Общее программное обеспечение гарантирует функциональную совместимость сервисов с конкретными пользовательскими приложениями. Создание информационных инфраструктур по принципам технологического дизайна предполагает междисциплинарное сотрудничество специалистов по техническим, естественным и гуманитарным дисциплинам (экономические науки, физика, машиностроение, электротехника, информатика, когнитивная психология, коммуникативные науки, социология и философия). Взаимодействие должно строиться на уникальных моделях, интегрирующих когнитивные, знаниевые, ментальные аспекты, подходы к решению проблем с использованием наработок в социологии и философии технологического развития. Комплексное проектирование и формирование информационных инфраструктур будут эффективно работать только с учетом различных аспектов человеческого фактора. Интегрированные гибридные системы, архитектуры распределенного цифрового управления, механизмы взаимодействия человека с технологиями, комплексные модели деятельности и социотехнологические сети создаются с помощью антропоцентричного (ориентированного на человека) инжиниринга [Voу, 2017].

Рассматриваемый подход предполагает пошаговую разработку эталонных архитектур, доменных моделей и прикладных платформ отдельных дисциплин. Они служат предпосылками для осознанного ситуационного и контекстного восприятия, интерпретации, интеграции процессов и, как следствие, эффективного использования и контроля соответствующих систем. Роль человеческого фактора в работе информационных инфраструктур предстоит исследовать на междисциплинарной основе, изучая широкий спектр вопросов: эргономику, интеграцию адаптивных структур в рабочий процесс, прослеживаемость причинно-следственных связей, адаптацию социального поведения в результате применения таких систем. При том что указанные системы многофункциональны и представляют разнообразные сервисы, взаимодействие с ними должно быть простым, надежным и интуитивно понятным. Сложные сети с растущим числом участников все труднее поддаются контролю. Возрастает необходимость обеспечения их надежности, сохранности и конфиденциальности информации, доверия пользователей. Критериями результативности подобных систем могут служить:

- энергоэффективность и экологичность;
- защита прав интеллектуальной собственности в открытых цепочках создания стоимости;
- оценка и контроль рисков, их перераспределение;

⁵ Подробнее см.: <https://uits.iu.edu/ii>, дата обращения 26.09.2020.

- этическое поведение при разрешении конфликта интересов, наличие взаимно согласованных правил и политики (включая выполнение требований законодательства).

Социальные эффекты сбалансированной инновационной деятельности

Интеллектуальные инфраструктуры развиваются на фоне меняющегося контекста и при этом сами преобразуют структуру общественного строя. Цифровые коммуникации позволяют быстрее получать информацию. Ввиду существенного трансформационного потенциала новые социотехнологические системы пользуются повышенным вниманием общества и его институтов. Благодаря доступу к информации в режиме реального времени, возможности активно реагировать на нее на фоне растущей плотности сетей и связанных с этим каскадных эффектов возникают новые «адаптивные» (*liquid*) формы демократии [Blum, Zuber, 2016]. Обладание качественной и оперативной информацией побуждает граждан активнее вовлекаться в принятие решений по внедрению социотехнологических систем. Таким образом, технологический дизайн приобретает значение не только для специалистов, но и для общества в целом. В ответ на потребность в партисипативной демократии расширяются возможности для вовлечения гражданского общества. Следовательно, при выработке новых технических решений должны учитываться экологические, экономические и социальные аспекты. Речь идет о сбалансированной инновационной активности [Schot, Geels, 2008; Boons, Lüdeke-Freund, 2013]. Однако одного лишь расширения партисипативности недостаточно. Инновационные социотехнологические проекты должны оставаться реалистичными и сбалансированными (*robust*) [Roth, 2015], чтобы не подвергать рискам территории, на которых они реализуются. Социотехнологические системы требуют устойчивых информационных инфраструктур как предпосылки для наращивания инновационного потенциала общества. Возникает спрос на комплексные исследовательские и образовательные центры, специализирующиеся одновременно на естественных, технических, гуманитарных и социальных науках [van Kerkhoff, 2014]. В междисциплинарных исследовательских кластерах возникают новые форматы университетов, избегающих традиционного разграничения между упомянутыми выше областями науки. Их можно рассматривать как матричную структуру, где дисциплины выступают в роли «строк», а «столбцами» являются комплексные исследовательские проекты, охватывающие различные элементы дисциплин в зависимости от целей исследования. Подобные проекты — не просто перспективный замысел, они уже реализуются на базе накопленного университетами опыта. Автор данной статьи непосредственно участво-

вал в создании центров компетенций при технических университетах Аугсбурга и Мюнхена⁶.

Все эти подходы базируются на фундаментальной идее, что наука не существует независимо от общества. Без учета социальных структур и процессов вряд ли какие-либо инновации в сфере технических и естественных наук (особенно в области искусственного интеллекта) окажутся успешными. Например, для создания «умного города» требуется понимание того, как обеспечить эффективное сосуществование жителей и «умной» инфраструктуры. Интеллектуальные цепочки поставок, призванные удовлетворить потребности растущего населения мира, не будут работать без учета контекста развивающихся стран. Роботы не станут эффективными помощниками для пожилых людей, если не будет глубокого понимания потребностей последних. Игнорирование соответствующих социальных, экономических и экологических факторов не позволит гармонично интегрировать масштабные технологические проекты в социальную структуру.

Заключение

ИКТ трансформируют большинство сфер деятельности. Прежде превалировало представление, что их развитие следует экспоненциальным закономерностям, а для достижения экономического успеха достаточно гибко адаптироваться к подобному вектору. Однако на практике технологическое развитие никогда не подчинялось жестким закономерностям. В настоящее время также невозможно с точностью определить, какие перспективные идеи для развития могут появиться в будущем. Научно-технологический прогресс, подобно развитию живых систем, характеризуется динамической сложностью, тем не менее, в отличие от биологической эволюции, он поддается контролю со стороны индивидов, которые способны влиять на его направление. Такой контроль возможен только при наличии междисциплинарного мышления и понимания принципов разработки производственных и образовательных стратегий в концепции сложных динамических систем. Результаты исследований будут эффективными лишь при постановке задач с учетом категорий социальных и гуманитарных наук, выборе релевантных критериев, выходе за рамки устоявшихся представлений и извлечении уроков из кризисов.

С точки зрения стратегий развития, основанных на учете специфики сложных динамических систем, междисциплинарный охват должен присутствовать с самого начала реализации любого проекта, а не в ходе последующей «доработки». В любой научно-технологический проект необходимо привлекать представителей не только инженерных, но и гуманитарных дисциплин для изучения сопутствующих социальных аспектов, оценки создаваемых разработок на соответствие экономической, медицинской, экологической и технологической этике, поиска новых механизмов обмена идеями между

⁶ В 2012 г. — в качестве директора-основателя Мюнхенского центра технологий и общества при Мюнхенском техническом университете, организованного в рамках программы Excellence Initiative 2012 г., а ранее (в 1998 г.) — основателя и первого руководителя Института междисциплинарных компьютерных исследований при Аугсбургском университете, созданном для анализа влияния интернета на общество.

наукой и обществом. Проблемно ориентированные эмпирические исследования должны строиться на принципах междисциплинарности, проектной ориентации и открытости для общественного обсуждения в целях последующей выработки мер политики.

С ростом информированности повышается потенциал для вовлеченности общества в принятие решений по инфраструктурным и технологическим вопросам. В попытке регулирования этого процесса государства выработывали процедуры утверждения планов с четкой поэтапной структурой: подготовка плана разработчиком проекта, консультации, публичное представление, обсуждение, демонстрация результатов и утверждение плана. Однако участие общества нередко организуется в формате слушаний, при котором реализация проектов остается исключительно под контролем органов власти. Правило «преюдициальной силы» (*preclusive effect*) [Ketchum, 2016] исключает возможность подачи каких-либо апелляций по истечении определенного периода. Хотя объективные технологические, социальные и экономические условия могут меняться, подобный подход не оставляет возможности для адаптивного обучения и корректировок. Сложившаяся «линейная» процедура легитимизации нуждается в пересмотре с учетом происходящих глобальных трансформаций. Предстоит

определиться с установлением границ для применения партисипативного подхода, с тем чтобы не нарушалась работоспособность систем принятия решений и сохранялся общественный баланс. Политические структуры меняются под влиянием технологического и экономического развития, появления новых экологических трендов. Следует переосмыслить правила игры при выработке согласованных коллективных решений в контексте диалога всех ветвей власти с научными, деловыми кругами и широкой общественностью. Для будущих поколений ученых, инженеров, специалистов по ИКТ контакты с общественностью станут неотъемлемым аспектом их работы. Обучение навыкам подобной коммуникации следует ввести в образовательные программы университетов. Учет человеческого фактора — важный элемент технологического дизайна взаимодействия людей и машин в процессе развития искусственного интеллекта. Только междисциплинарные исследования способны дать ответы на «большие вопросы» в отношении перспектив этого технологического направления. Анализ каждого этапа проекта одновременно с технологической и организационной точек зрения, привлечение общественности к диалогу позволят охватить и учесть всевозможные социальные последствия и вызовы, увидеть неожиданные перспективные направления.

Библиография

- Acatech (2011) Cyber-physical Systems. Driving force for innovation in mobility, health, energy and production. Berlin: National Academy of Science and Engineering (ACATECH). Режим доступа: <https://www.acatech.de/publikation/cyber-physical-systems/download-pdf?lang=wildcard>, дата обращения 15.09.2020.
- Acatech (2012) Technology Futures. Anticipation — Creation — Assessment (English Summary). Berlin: National Academy of Science and Engineering (ACATECH).
- Al Dakheel J., Del Pero C., Aste N., Leonforte F. (2020) Smart buildings features and key performance indicators: A review // *Sustainable Cities and Society*. Vol. 61. Art. 102328. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328>, дата обращения 19.09.2020.
- Alegre H., Vitorino D., Coelho S. (2014) Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets // *Procedia Engineering*. Vol. 89. P. 1428–1436. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.469>, дата обращения 06.08.2020.
- Bansraj D.S., Smit H.T.J., Volosovych V. (2018) Can Private Equity Act as Strategic Buyers? Evidence from Serial (Buy-and-Build) Strategies? Paper presented at the 2019 FMA European Conference, 12–14 June 2019, Glasgow, Scotland. Режим доступа: http://www.fmaconferences.org/Glasgow/Papers/Buy_and_Build_FMAEur_2019.pdf, дата обращения 04.07.2020.
- Bassett M., Wilkinson S., Mannakkara S. (2017) Legislation for building back better of horizontal infrastructure // *Disaster Prevention and Management*. Vol. 26. № 1. P. 94–104. DOI: 10.1108/DPM-03-2016-0054.
- Behymer K.J., Flach J.M. (2016) From Autonomous Systems to Sociotechnical Systems: Designing Effective Collaborations // *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*. Vol. 2. № 2. P. 105–114.
- Berg M. (1998) The politics of technology: On bringing social theory into technological design // *Science Technology and Human Values*. Vol. 23. № 4. P. 456–490. DOI: 10.1177/016224399802300406.
- Bezemek C. (2019) The 'Normative Force of the Factual': A Positivist's Panegyric // *The Normative Force of the Factual. Legal Philosophy Between Is and Ought* / Eds. N. Bersier-Ladavac, C. Bezemek, F. Schauer. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. P. 65–77.
- Biggs M. (2017) Self Fulfilling Prophecies // *The Oxford Handbook of Analytical Sociology* / Eds. P. Bearman, P. Hedström. Oxford: Oxford University Press. P. 294–314 DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199215362.013.13.
- Blum C., Zuber C.I. (2016) Liquid democracy: Potentials, problems, and perspectives // *Journal of Political Philosophy*. Vol. 24. № 2. P. 162–182. Режим доступа: <https://doi.org/10.1111/jopp.12065>, дата обращения 07.04.2020.
- Boons F., Ludeke-Freund F. (2013) Business models for sustainable innovation: State-of-the-art and steps towards a research agenda // *Journal of Cleaner Production*. Vol. 45. P. 9–19. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.007>, дата обращения 07.04.2020.
- Boy G.A. (ed.) (2017) *The handbook of human-machine interaction: A human-centered design approach*. Burlington, VT: Ashgate Publishing.
- Dean J. (2014) *Big data, data mining, and machine learning. Value creation for business leaders and practitioners*. Hoboken, NJ: Wiley.
- European Commission (2006) *European Technology Platform SmartGrids. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Brussels: European Commission. Режим доступа: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf, дата обращения 30.07.2020.
- Geisberger E., Broy M. (eds.) (2012) *Living in a Networked World. Integrated Research Agenda on Cyber-Physical Systems (agendaCPS)*. Berlin: National Academy of Science and Engineering (ACATECH). Режим доступа: <https://www.acatech.de/publikation/agendacps-integrierte-forschungsagenda-cyber-physical-systems/download-pdf?lang=en>, дата обращения 19.09.2020.

- Giaimo F., Andrade H., Berger C. (2020) Continuous experimentation and the cyber-physical systems challenge: An overview of the literature and the industrial perspective // *Journal of Systems and Software*. Vol. 170. Art. 110781. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110781>, дата обращения 27.08.2020.
- Glenn J.C., Gordon T.J. (eds.) (2009) *Futures research methodology — Version 3.0 (CD-ROM)*. Washington, D.C.: The Millennium Project. Режим доступа: <http://www.millennium-project.org/millennium/FRM-V3.html#toc>, дата обращения 22.11.2019.
- Godet M., Roubelat F. (1996) Creating the Future: The Use and Misuse of Scenarios // *Long Range Planning*. Vol. 29. № 2. P. 164–171. Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(96\)00004-0](https://doi.org/10.1016/0024-6301(96)00004-0), дата обращения 22.08.2020.
- Häder M. (ed.) (2002) *Delphi Interviews. A Workbook*, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Hawkins W., Abdelzaher T. (2005) Towards feasible region calculus: An end-to-end schedulability analysis of real-time multistage execution // *Proceedings of the 26th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS '05)*. Washington, D.C.: IEEE Computer Society. P. 75–86. Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/RTSS.2005.42>, дата обращения 19.09.2020.
- Isermann R. (2009) *Mechatronic Systems — A Short Introduction*. Springer Handbook of Automation / Ed. S.Y. Nof. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. P. 317–331.
- Jones A.J.L., Artikis A., Pitt J. (2011) The design of intelligent socio-technical systems // *Artificial Intelligence Review*. Vol. 39. № 1. P. 5–20. DOI: 10.1007/s10462-012-9387-2.
- Ketchum B.J. (2016) Keeping Tabs: When Will TTAB Decisions Have Preclusive Effect? Preclusive Effect of T.T.A.B. Likelihood of Confusion Decisions after B & B v. Hargis Industries // *Journal of Intellectual Property*. Vol. 15. № 1. P. 141–161.
- King A.S. (1973) Self-Fulfilling Prophecies in Organizational Change // *Social Science Quarterly*. Vol. 54. № 2. P. 384–393.
- Lee E.A., Seshia S.A. (2016) *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Lozito G.M., Salvini A. (2020) Swarm intelligence based approach for efficient training of regressive neural networks // *Neural Computing and Applications*. Vol. 32. № 14. P. 10693–10704. DOI: 10.1007/s00521-019-04606-x.
- Mainzer K. (2007) *Thinking in Complexity. Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind (5th ed.)*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Mainzer K. (2019) *Artificial Intelligence. When do Machines Take Over?* Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Nelson R. (2018) *Modern Evolutionary Economics — An Overview*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Nelson R., Winter S.G. (1982) *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- NSF (2008) *Cyber-Physical Systems. Program Announcements & Information*. Arlington, VA: National Science Foundation.
- Pop O.-M. (2015) Self-Fulfilling Prophecies and Innovation Success. Режим доступа: <https://blog.hypeinnovation.com/self-fulfilling-prophecies-and-innovation-success>, дата обращения 28.09.2020.
- Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J. (2010) Cyber-physical systems: The next computing revolution — Design automation // *Proceedings of the Design Automation Conference*. Piscataway, NJ: IEEE. P. 731–737. DOI: 10.1145/1837274.1837461.
- Ringland G. (2010) The role of scenarios in strategic foresight // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 77. № 9. P. 1493–1498. DOI: 10.1016/j.techfore.2010.06.010.
- Roth S. (ed.) (2015) *Non-technological and non-economic innovations: Contributions to a theory of robust innovation*. Kiel (Germany): ZBW — Leibniz Information Centre for Economics.
- Sa I., Corke P. (2014) Vertical infrastructure inspection using a quadcopter and shared autonomy control // *Field and Service Robotics: Results of the 8th International Conference*. Series: Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 92 / Eds. K. Yoshida, S. Tadokoro. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. P. 219–232.
- Schiff J.L. (2007) *Cellular Automata: A Discrete View of the World*. New York: John Wiley & Sons.
- Schot J., Geels F.W. (2008) Strategic niche management and sustainable innovation journeys: Theory, findings, research agenda, and policy // *Technology Analysis and Strategic Management*. Vol. 20. № 5. P. 537–554. Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/09537320802292651>, дата обращения 15.08.2020.
- Tantawi K.H., Sokolov A., Tantawi O. (2019) Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration // *Proceedings of the 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON 2019)*. Art. 9024658. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9024658>, дата обращения 30.05.2020.
- van de Poel I. (2020) Embedding Values in Artificial Intelligence (AI) Systems // *Minds and Machines* (в печати, впервые опубликовано онлайн 01.09.2020). Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11023-020-09537-4>, дата обращения 14.08.2020.
- van der Heijden K. (1996) *Scenarios: The Art of Strategic Conversation*. New York: Wiley & Sons.
- van Kerkhoff L. (2014) Developing integrative research for sustainability science through a complexity principles-based approach // *Sustainability Science*. Vol. 9. P. 143–155.
- Wayne W. (2008) *Computers as Components: Principles of Embedded Computing Systems Design*. Amsterdam: Morgan Kaufmann.
- Wedde H.E., Lehnhoff S., van Bonn B., Bay Z., Becker S., Böttcher S., Brunner C., Büscher A., Fürst T., Lazarescu A.M., Rotaru E., Senge S., Steinbach B., Yilmaz F., Zimmermann T. (2007) Highly dynamic and adaptive traffic congestion avoidance in real-time inspired by honey bee behavior // *Mobilität und Echtzeit* / Eds. P. Holleczeck, B. Vogel-Heuser. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. P. 21–31. DOI: 10.1007/978-3-540-74837-3_3.