

УДК 004.8:004.62:316.4

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0



**В.Г. Евдокимов**

Аспирант кафедры информационных технологий автоматизированных систем БГУИР  
vigandvdk@gmail.com



**А.А. Навроцкий**

Декан факультета информационных технологий и управления БГУИР, кандидат физико-математических наук, доцент  
navrotsky@bsuir.by

### **А.А. Навроцкий**

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов включает программные системы, системы компьютерного зрения и СВЧ-устройства.

### **В.Г. Евдокимов**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов включает оптимизацию алгоритмов искусственного интеллекта, применение ИИ в условиях неполноты данных и разработку адаптивных автономных интеллектуальных систем.

**Аннотация.** В статье развивается концепция применения динамических цифровых двойников как инструмента согласования решений в сложных социально-экономических системах, функционирующих в условиях интенсивной цифровизации. Обосновывается, что основные риски Big Data в государственном и корпоративном управлении связаны не только с объемом и скоростью обработки данных, но прежде всего с усредняющим характером алгоритмических моделей, фрагментарностью цифровизации и слабой согласованностью микро- и макроуровней принятия решений. Предлагается подход, при котором государство, предприятия, домохозяйства, индивиды и инфраструктурные контуры рассматриваются как взаимосвязанные источники уникальных и динамически изменяющихся данных. Их интеграция в систему многоуровневых цифровых двойников позволяет перейти от статического профилирования к адаптивному управлению, учитывающему реальные потребности, ограничения, траектории состояний и структуру межзловых связей. Показано, что наибольший эффект такой подход даёт не при локальном, а при сквозном внедрении, охватывающем жизненный цикл производства, распределения, потребления и государственного регулирования. Сделан вывод, что динамический цифровой двойник может быть интерпретирован не только как технологическая модель объекта, но и как инструмент объективизации распределения ресурсов и поддержания социально-экономического равновесия.

**Ключевые слова:** Big Data, цифровой двойник, динамический цифровой двойник, Индустрия 4.0, Индустрия 5.0, государственное управление, управление на основе данных, микроэкономика, макроэкономика, распределение ресурсов, алгоритмическая справедливость.

**Введение.** Цифровизация экономики и государственного управления сопровождается не просто ростом объемов данных, а качественным изменением самой логики управленческого воздействия. Данные постепенно превращаются в самостоятельный фактор координации, прогнозирования и распределения ресурсов. В российской стратегической повестке этот подход закреплён на нормативном уровне: данные в

цифровой форме рассматриваются как значимый фактор повышения эффективности производства, управления и оказания услуг [1].

Однако накопление больших массивов данных само по себе не устраняет системные дисбалансы. Напротив, в ряде случаев Big Data усиливают структурные перекосы, поскольку управленческие решения начинают строиться на основе агрегированных профилей, усреднённых групп и исторических корреляций. В таком режиме отдельный субъект - человек, домохозяйство, предприятие, муниципалитет - фактически редуцируется до статистического образа, тогда как его актуальное состояние, ограничения и динамика изменения потребностей учитываются лишь частично. Поэтому рост объёма данных не гарантирует содержательной адекватности решения.

Проблема особенно заметна в сферах распределения ограниченных ресурсов: бюджетных средств, энергии, производственных мощностей, логистических возможностей, медицинских и образовательных услуг, продовольствия и трудовых ресурсов. Ошибка в интерпретации потребностей одного уровня системы способна породить каскадный дисбаланс на других уровнях. Вследствие этого локальная оптимизация перестаёт совпадать с общественной эффективностью.

В научной литературе цифровые двойники первоначально рассматривались преимущественно как инструмент моделирования технических объектов и производственных процессов, однако впоследствии область их применения расширилась и стала охватывать инфраструктуру, городскую среду и организационные системы [2-5]. Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы предложить интерпретацию цифрового двойника как динамической модели согласования микро- и макроэкономических состояний. Исходный тезис заключается в следующем: каждый участник общественно-экономической системы является носителем уникальных данных; при включении этих данных в динамическую архитектуру цифровых двойников появляется возможность объективнее оценивать потребности и ограничения как конкретного узла, так и всей цепи управления в целом.

**Теоретический контекст: от больших данных к управлению на основе связанных состояний.** В исследованиях, посвящённых Big Data, давно отмечено, что проблема заключается не только в объёме, скорости и разнообразии данных, но и в способах их включения в управленческую практику. Для публичного сектора это означает переход к управлению, основанному на данных. Такая модель потенциально сокращает временной лаг между событием и реакцией системы управления, но одновременно повышает требования к качеству данных, архитектуре их интеграции и режимам доверия между участниками цифрового взаимодействия [6].

На практике цифровое управление часто строится по принципу платформенной централизации. Данные собираются из множества источников, агрегируются, стандартизируются, после чего используются для прогнозирования, ранжирования и автоматизации решений. Такой подход эффективен для задач массовой обработки, но имеет ряд уязвимостей.

Во-первых, такие решения основаны на статистической логике усреднения. В типовых ситуациях они могут демонстрировать достаточно высокую результативность, однако значительно хуже учитывают индивидуальные отклонения, нетипичные сочетания ограничений и редкие сценарии.

Во-вторых, для них характерна ориентация на локальную оптимизацию, при которой отдельная отрасль, ведомство или цифровой сервис стремятся повысить собственную эффективность без должного учёта последствий для связанных контуров.

В-третьих, подобные системы способны не только фиксировать, но и воспроизводить предвзятость, содержащуюся в исходных данных и сложившихся институциональных практиках. Этические аспекты алгоритмизации, включая непрозрачность процедур,

возможность дискриминационных эффектов и размывание ответственности, подробно рассматриваются в современной литературе [7–9].

В терминах системного управления это означает, что проблема сводится не столько к недостатку объёма данных, сколько к отсутствию такой модели, которая позволяла бы отражать изменяющиеся состояния объектов и структуру их взаимосвязей. Именно здесь концепция динамического цифрового двойника приобретает особую аналитическую ценность. Классическое понимание цифровых двойников формировалось в инженерном и производственном контексте как виртуальная репрезентация физического объекта или процесса, синхронизируемая с реальными данными и позволяющая прогнозировать его поведение, тестировать сценарии и оптимизировать жизненный цикл [2–4]. Для социально-экономических систем этого понимания уже недостаточно. Человек, предприятие или регион не являются техническими объектами в узком смысле; их состояние формируется под влиянием институтов, ресурсов, поведения других участников и внешних шоков. Следовательно, цифровой двойник в таких системах должен отражать не только параметры объекта, но и его позицию в распределённой структуре зависимостей. Иными словами, речь должна идти о динамическом цифровом двойнике, способном описывать изменение потребностей, ограничений и связей во времени.

**Ограничения точечной цифровизации.** Основная слабость современной цифровой трансформации заключается в том, что она часто реализуется по секторальному принципу. Развиваются цифровое производство, умное сельское хозяйство, цифровое здравоохранение, системы мониторинга занятости, городские платформы, цифровые бюджеты. Каждое из этих направлений имеет собственную логику, собственный массив данных и собственные показатели эффективности. Однако реальная социально-экономическая система не делится на изолированные домены. Потребление продовольствия связано с доходами, доходы - с занятостью и производственной структурой, производственная структура - с ресурсной и энергетической обеспеченностью, а всё вместе - с бюджетной, инфраструктурной и демографической динамикой.

Если цифровой двойник внедряется только на одном участке, он действительно способен повысить локальную точность решений. Но именно за счёт этого возникает риск перекоса: модель начинает улучшать тот сегмент, для которого она сконструирована, не видя системных последствий. Цифровой двойник агропромышленного комплекса, не связанный с динамикой потребительского спроса, логистики, цен, доходов населения и энергетических ограничений, может оптимизировать производство и одновременно усиливать диспропорции в распределении.

Содержательно это означает наличие четырёх взаимосвязанных проблем.

Первая проблема - редукция уникальности субъекта. Большие данные в традиционной платформенной архитектуре чаще фиксируют цифровой след, чем строят модель изменяющегося состояния.

Вторая проблема - разрыв микро- и макроуровня. Макроэкономические решения принимаются на основе агрегированных показателей, а микрорешения - на основе локальных профилей. Между ними часто отсутствует механизм согласования в режиме, близком к реальному времени.

Третья проблема - асимметрия участия. Те, кто генерирует данные, как правило, не контролируют способы их интерпретации и использования. Это усиливает недоверие и снижает легитимность управленческих решений.

Четвёртая проблема - фрагментарность цифровой архитектуры. Отдельные отрасли цифровизируются быстрее других, что не устраняет, а иногда даже усиливает общую дисбалансированность системы.

Таким образом, задача состоит не в том, чтобы собрать ещё больше данных, а в том, чтобы переопределить единицу анализа. Такой единицей должен стать не «профиль» и не

«сегмент», а динамический цифровой двойник субъекта, встроенный в сеть других двойников.

**Динамический цифровой двойник как инструмент согласования.** Предлагаемый подход основывается на следующем положении: любой элемент цепи управления - индивид, домохозяйство, предприятие, муниципалитет, отрасль, государственный институт, инфраструктурный контур - является источником уникальных данных, которые не сводятся к общему массиву без потери содержательной специфики. Однако если данные не просто собираются, а включаются в динамическую модель объекта, то уникальность перестаёт быть источником шума и становится основанием для более объективного решения.

В этом смысле динамический цифровой двойник выступает как универсальный уравниватель. Он не устраняет различия между субъектами, а делает их управленчески сопоставимыми. Сопоставимость достигается за счёт того, что каждый субъект описывается в единой логике: через структуру потребностей, доступных ресурсов, ограничений, связей и траектории изменения состояния. Тогда индивид, предприятие и государственный орган перестают быть несоизмеримыми объектами разных классов и могут анализироваться как узлы одной распределённой системы.

С практической точки зрения это означает переход от статической аналитики к адаптивному распределению. Например, потребности домохозяйства нельзя корректно оценить только по доходу или потребительскому профилю; необходимо учитывать состав семьи, территориальную доступность услуг, энергетические расходы, занятость, долговую нагрузку, сезонность и состояние здоровья. Аналогично предприятие нельзя описывать только объёмом выпуска или финансовой отчётностью: значимы зависимость от поставщиков, кадровая устойчивость, энергетическая обеспеченность, состояние оборудования, логистические риски и рыночная волатильность.

Если государственный уровень представлен цифровыми двойниками бюджета, ресурсов, социальной нагрузки, нормативных ограничений и инфраструктурных возможностей, а частный сектор и граждане поставляют данные о фактическом состоянии производства, потребления и потребностей, то формируется динамическая структура цифрового двойника микро- и макроэкономики. Её ценность состоит не в тотальном наблюдении, а в возможности согласовывать решения по всей цепи. Без государства невозможно зафиксировать общесистемные рамки, без бизнеса и граждан - достаточную детализацию фактического состояния системы. Односторонняя модель в любом случае будет неполной.

**Формализация модели.** Для концептуального описания введём систему взаимосвязанных цифровых двойников (формула 1):

$$DT_t = \{DT_{i\text{ind}t}, DT_{i\text{firm}t}, DT_{i\text{reg}t}, DT_{i\text{stat}t}, DT_{i\text{inf}t}\}, \quad (1)$$

где  $DT_{i\text{ind}t}$  - двойники индивидов и домохозяйств,  $DT_{i\text{firm}t}$  - двойники предприятий,  $DT_{i\text{reg}t}$  - двойники региональных систем,  $DT_{i\text{stat}t}$  - государственный макродвойник,  $DT_{i\text{inf}t}$  - двойники инфраструктурных и ресурсных контуров.

Состояние каждого узла представим вектором (формула 2):

$$Sat = \langle Nat, Rat, Cat, Lat, Dat \rangle, \quad (2)$$

где  $Nat$  - вектор потребностей,  $Rat$  - вектор располагаемых ресурсов,  $Cat$  - совокупность ограничений,  $Lat$  - структура связей с другими узлами,  $Dat$  - параметры динамики состояния.

Тогда задача согласованного распределения ресурсов может быть записана как минимизация суммарного расхождения между потребностями и фактическим обеспечением при учёте межузловых дисбалансов: (формула 3):

$$t = a = 1Aa * ||\text{Nat} - \text{Raalloct}|| + \lambda * a = 1Ab = 1 b \neq a Aab(t), \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент значимости узла,  $\text{Raalloct}$  - объём фактически выделенных ресурсов,  $ab(t)$  - функция межузлового дисбаланса,  $\lambda$  - коэффициент системной связанности.

Динамика обновления цифрового двойника может быть представлена оператором перехода (формула 4):

$$S_a(t+1) = F(S_a(t), X_a(t), U_a(t), E_a(t)), \quad (4)$$

где  $X_a(t)$  - поток новых данных о состоянии узла,  $U_a(t)$  - управленческое воздействие,  $E_a(t)$  - внешние шоки и экзогенные эффекты.

Для оценки качества распределения введём показатель объективности решения (формула 5):

$$O_t = 1 - a = 1A ||\text{Nat} - \text{Raalloct}|| a = 1A ||\text{Nat}|| + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\varepsilon > 0$  - малая константа.

Представленный аппарат задаёт состав системы, структуру состояния узла, целевую функцию адаптивного распределения, механизм обновления и критерий оценки результата. **Архитектура симбиоза цифровых двойников микро- и макроэкономики.** Предлагаемая модель строится как многоуровневая архитектура.

На микроуровне формируются цифровые двойники индивидов, домохозяйств, предприятий, конкретных производственных объектов, сервисных платформ, ферм, логистических узлов и иных непосредственных участников экономического оборота. Здесь фиксируются фактические потребности, ресурсы, ограничения, циклы потребления, производственные нагрузки и поведенческие изменения.

На мезоуровне располагаются двойники муниципалитетов, регионов, отраслей, кластеров и цепочек поставок. Они агрегируют данные нижнего уровня, но не сводят их к простым средним значениям; задача этого уровня - выявлять структурные зависимости, территориальные перекосы и отраслевые узкие места.

На макроуровне находятся цифровые двойники государственного бюджета, социальной нагрузки, занятости, инфраструктуры, ресурсных балансов и иных параметров национальной экономики. Этот уровень задаёт рамки допустимых и приоритетных решений.

Связь между уровнями должна быть двусторонней. Сверху вниз система передаёт ограничения, нормативы, приоритеты и ресурсные лимиты. Снизу вверх поступают данные о реальном состоянии субъектов, спросе, дефицитах, избыточности, изменении нагрузок и нарушениях равновесия. В результате возникает динамический контур согласования, в котором каждый уровень корректирует другой.

Такой подход особенно важен для сфер, где жизненный цикл решения распределён между множеством разнородных узлов. Например, продовольственная система включает производство, поставщиков сырья, транспорт, хранение, энергоснабжение, розничную торговлю, доходы населения и бюджетные механизмы поддержки. Если цифровые двойники охватывают весь цикл, появляется возможность управлять не отдельными событиями, а соотношением состояний во всей цепи.

**Преимущества и пределы применимости.** Главное преимущество динамических цифровых двойников в предложенной трактовке состоит в том, что они позволяют заменить логику усреднения логикой согласования. Речь не идёт об отказе от агрегирования как такового; речь идёт о том, чтобы агрегирование не уничтожало состояние конкретных узлов, а сохраняло его в управленчески значимой форме.

Из этого вытекает ряд практических следствий.

Во-первых, повышается точность оценки потребностей. Система работает не с абстрактной категорией «потребитель», «предприятие» или «регион», а с изменяющейся структурой конкретного объекта.

Во-вторых, снижается риск алгоритмической несправедливости, поскольку решение опирается не только на историческую типологизацию, но и на текущее состояние субъекта [7; 9].

В-третьих, повышается прозрачность распределительных решений. Если решение может быть обосновано через параметры цифрового двойника и его место в системе взаимосвязей, оно приобретает более чёткое рациональное основание.

В-четвёртых, повышается устойчивость управления. Система получает возможность выявлять диспропорции на ранних стадиях, до того, как они проявятся в форме острого дефицита, перегрузки инфраструктуры или роста социального напряжения.

Вместе с тем следует учитывать и ограничения данной модели. Применение динамических цифровых двойников требует развитой инфраструктуры сбора и синхронизации данных, сопоставимости их форматов, устойчивого правового режима обращения с данными и достаточного уровня институционального доверия. При отсутствии этих условий модель может либо остаться декларативной, либо использоваться преимущественно как инструмент асимметричного контроля.

**Заключение.** Проведённый анализ показывает, что динамические цифровые двойники могут рассматриваться как перспективный инструмент снижения социальных рисков Big Data в том случае, если они понимаются не как изолированные цифровые копии отдельных объектов, а как взаимосвязанные модели состояний, включённые в единую систему управления. В таком понимании цифровой двойник выступает не только как средство мониторинга, но и как инструмент повышения обоснованности решений.

Ключевой результат предложенного подхода состоит в смещении акцента от работы с большими данными как совокупностью массивов информации к работе с динамически изменяющимися состояниями субъектов и структурой их взаимосвязей. Это позволяет в большей степени учитывать потребности индивидов, предприятий и территорий, соотносить локальные решения с макроэкономическими ограничениями и снижать диспропорции, возникающие в условиях фрагментарной цифровизации.

Тем самым подтверждается исходная гипотеза статьи: интеграция динамических цифровых двойников государства, частного сектора, граждан и инфраструктурных контуров способна сформировать более адаптивную систему управления и распределения ресурсов, тогда как их внедрение лишь в отдельных сферах создаёт риск системного дисбаланса.

#### Список литературы

- [1] Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы».
- [2] Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham: Springer, 2017. P. 85-113.
- [3] Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: state-of-the-art // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, no. 4. P. 2405-2415.
- [4] Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952-108971.
- [5] Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, no. 11. P. 1016-1022.
- [6] Janssen M., Brous P., Estevez E., Barbosa L. S., Janowski T. Data governance: organizing data for trustworthy artificial intelligence // *Government Information Quarterly*. 2020. Vol. 37, no. 3. Art. 101493.
- [7] Mittelstadt B. D., Allo P., Taddeo M., Wachter S., Floridi L. *The ethics of algorithms: mapping the debate* // *Big Data & Society*. 2016. Vol. 3, no. 2.
- [8] Floridi L., Cowls J. *A unified framework of five principles for AI in society* // *Harvard Data Science Review*. 2019. Vol. 1, no. 1.
- [5] Batty M. *Digital twins* // *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2018. Vol. 45, no. 5. P. 817-820.

**Авторский вклад**

**Навроцкий Анатолий Александрович** – руководство исследованием и постановка задачи. Общее руководство научным проектом, формулировка научной проблемы.

**Евдокимов Виталий Геннадьевич** – разработка концепции, алгоритмического обеспечения и анализ практического применения.

**DYNAMIC DIGITAL TWINS AS A TOOL FOR REDUCING THE SOCIAL  
RISKS OF BIG DATA IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0**

*V.G. Evdokimov*

*Postgraduate student of the Department of  
Information Technologies of Automated  
Systems, BSUIR*

*A.A. Navrotsky*

*Dean of the Faculty of Information Technology and  
Control, BSUIR, PhD in Physics and Mathematics,  
Associate Professor*

**Abstract.** This article develops the concept of using dynamic digital twins as a tool for coordinating decisions in complex socio-economic systems operating under conditions of intensive digitalization. It is argued that the main risks of Big Data in public and corporate governance are associated not only with the volume and speed of data processing, but above all with the averaging nature of algorithmic models, the fragmented character of digitalization, and the weak coordination between micro- and macro-level decision-making. The article proposes an approach in which the state, enterprises, households, individuals, and infrastructure systems are viewed as interconnected sources of unique and dynamically changing data. Their integration into a system of multilevel digital twins makes it possible to move from static profiling to adaptive governance that takes into account actual needs, constraints, state trajectories, and the structure of inter-node relationships. It is shown that this approach yields the greatest effect not when implemented locally, but when deployed end-to-end across the entire lifecycle of production, distribution, consumption, and public regulation. It is concluded that a dynamic digital twin can be interpreted not only as a technological model of an object, but also as a tool for objectifying resource allocation and maintaining socio-economic balance.

**Keywords:** Big Data, digital twin, dynamic digital twin, Industry 4.0, Industry 5.0, public governance, data-driven governance, microeconomics, macroeconomics, resource allocation, algorithmic fairness.