

ОТЛАДКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МЕХАНИЗМА ЭКОНОМИКО-ФИНАНСОВОГО, ИНФОРМАЦИОННОГО И ЛОГИСТИЧЕСКОГО МЕЖКЛАСТЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ*

Сергей Николаевич ЯШИН^{a*}, Юрий Васильевич ТРИФОНОВ^b,
Егор Викторович КОШЕЛЕВ^c

^a доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента и государственного управления, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского (ННГУ), Нижний Новгород, Российская Федерация
jashinsn@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7182-2808>
SPIN-код: 4191-7293

^b доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и инструментальных методов в экономике, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского (ННГУ), Нижний Новгород, Российская Федерация
kei@ef.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4745-0004>
SPIN-код: 4394-4681

^c кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и государственного управления, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского (ННГУ), Нижний Новгород, Российская Федерация
ekoshelev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5290-7913>
SPIN-код: 8429-5702

* Ответственный автор

История статьи:

Рег. № 325/2020
Получена 01.06.2020
Получена в доработанном виде 15.06.2020
Одобрена 29.06.2020
Доступна онлайн 30.07.2020

УДК 332.142.2

JEL: C63, E17, O21, O36

Ключевые слова:

цифровой двойник, межкластерное

Аннотация

Предмет. Использование цифровых двойников для управления инновационно-индустриальными кластерами и их взаимодействия.

Цели. Предложить модель создания и отладки цифрового двойника межкластерного взаимодействия.

Методология. Используются общенаучные методы. Произведены выбор и корректировка параметров цифрового двойника, построение и отладка его модели, а также алгоритма имитационного моделирования.

Результаты. В качестве наиболее важных направлений межкластерного взаимодействия предложены экономико-финансовое, информационное и логистическое, а в качестве основной характеристики успешности взаимодействия — естественный прирост населения.

Выводы. Использование цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия позволит избежать необоснованных управленческих решений. Для Приволжского федерального округа справедлив вывод о том, что увеличение инвестиций в основной капитал не всегда приводит к росту численности населения. Население интересуется прежде всего рост

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ. Грант № 19-010-00932.

взаимодействие, его доходов. Это необходимо учитывать при перераспределении имитационное инвестиционных и человеческих ресурсов. моделирование, имитационный отжиг

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2020

Для цитирования: Яшин С.Н., Трифонов Ю.В., Кошелев Е.В. Отладка цифрового двойника механизма экономико-финансового, информационного и логистического межкластерного взаимодействия // *Финансы и кредит*. — 2020. — Т. 26, № 7. — С. 1448 — 1468. <https://doi.org/10.24891/fc.26.7.1448>

В настоящее время технологии программирования и искусственного интеллекта прочно вошли в различные сферы жизнедеятельности и развития общества. Одним из таких направлений является применение цифровых двойников в производстве. Это позволяет корректировать различные параметры модели сложного изделия в режиме реального времени и не прибегать в этом случае к работе с реальным опытным образцом изделия. Так, к примеру, поступают в проектировании и производстве автомобилей.

Подобные модели цифровых двойников начинают применять в других отраслях, например, в финансовом и инвестиционном анализе. Однако использование цифровых двойников дает также широкие возможности и для прочих отраслей. Здесь мы говорим об управлении инновационно-индустриальными кластерами [1], а также об их взаимодействии. Оптимизация подобных процессов, безусловно, позволит развиваться кластерам более эффективно с социальной, экономической и технической точек зрения.

На современных конкурентных рынках при массовом производстве новой продукции цифровые технологии в производстве рассматриваются как возможность для достижения более высокой производительности [2]. Подобные цифровые технологии позволяют интегрировать взаимосвязанные компоненты внутри производств [3], что делает возможным дистанционный контроль, мониторинг и управление устройствами через сетевую инфраструктуру, а значит, обеспечивает более надежную интеграцию и перенос данных физического объекта на виртуальный мир [3, 4].

Полученные большие объемы данных (Big Data) обрабатываются, анализируются и оцениваются с помощью алгоритмов имитационного моделирования и глобальной оптимизации, чтобы иметь возможность сделать их доступными для планирования в режиме реального времени [5].

Цифровые двойники (Digital Twin, DT) — это одна из концепций планирования и оптимизации производства с большим потенциалом во многих областях промышленности [6]. Это компьютерный аналог рассматриваемой физической системы. Цифровой двойник может использоваться для имитации работы реального объекта в разных целях. При этом синхронизируются различные данные, поступающие от него в режиме реального времени, что способствует осуществлению выбора оптимального воздействия на реальный объект и позволяет

повысить эффективность производства продукции, а следовательно, и эффективность деятельности самого производственного предприятия [2, 3, 7].

Впервые упоминание технологии цифрового двойника произошло в 2002 г. Этот термин ввел Майкл Гривз (Michael Grieves) в целях отраслевой презентации управления жизненным циклом продукта (PLM). Цифровой двойник в своем первоначальном виде описывался как цифровое информационное отражение физического объекта, созданное как единое целое и связанное с исходным физическим объектом. Цифровой двойник должен оптимально включать всю информацию о реальном объекте, что возможно только при его тщательном изучении [8].

В 2012 г. появилось подробное определение: «цифровой двойник представляет собой интегрированное мультифизическое, масштабное, вероятностное моделирование сложного продукта и использует данные о физической модели, поступающие с различных датчиков, чтобы отразить реальное состояние физической модели» [6].

Современный уровень развития техники и технологий позволяет моделировать цифровые модели не только отдельных продуктов производства, но и целых технологических процессов. Первые модели цифровых двойников появились в аэрокосмической отрасли в виде технологических дорожных карт NASA [6]. Ключевым элементом функционирования ДТ является предоставление различной информации об объекте в согласованном формате. Цифровые двойники включают в себя не только данные, но и алгоритмы, которые описывают функционирование исходного объекта и определяют действия всей системы на основе этих обработанных данных [5, 7, 9].

В терминологии производства [10] имеется следующее определение цифрового двойника: «ДТ состоит из виртуального отображения производственной системы, которая может работать при различных задачах моделирования и характеризуется синхронизацией между виртуальной и реальной системами благодаря считыванию данных и их обработке интеллектуальными математическими моделями в реальном времени». «Ключевая роль ДТ в производственных системах заключается в использовании этих возможностей для прогнозирования и оптимизации поведения производственной системы на каждом этапе ее жизненного цикла» [3]. При этом в отдельных отраслях существуют различные понимания сути цифровых двойников [6, 7, 11].

Применение цифровых двойников на практике тесно связано с технологиями программирования и искусственного интеллекта. Одним из методов искусственного интеллекта является имитационное моделирование. К наиболее мощным алгоритмам имитационного моделирования можно отнести:

- 1) генетический алгоритм (genetic algorithm);
- 2) имитационный отжиг (simulated annealing);

- 3) поиск по шаблону (pattern search);
- 4) муравьиный алгоритм (ant algorithm).

Наибольший практический интерес представляет алгоритм имитационного отжига в силу ряда его преимуществ.

1. Метод отжига позволяет избежать «ловушки» в локальных экстремумах оптимизируемой функции и продолжить поиск глобального экстремума [12].
2. Даже в условиях нехватки вычислительных мощностей для нахождения глобального экстремума метод отжига, как правило, выдает неплохое решение, то есть один из локальных экстремумов [12].
3. При сравнении адаптивного метода отжига (Adaptive Simulated Annealing, ASA) и генетических алгоритмов получено, что в большинстве задач метод отжига не проигрывает генетическим алгоритмам, а во многих и выигрывает [13].

Алгоритм имитационного отжига относится к вероятностным методам решения, что подразумевает случайный выбор одного или нескольких возможных решений вместо анализа каждого. Это позволяет существенно сократить время расчетов. Основная идея имитационного отжига заключается в контролируемом охлаждении, что приводит в итоге к желаемой структуре анализируемой системы. Если дать возможность алгоритму случайно выбирать решение, оптимальное на каждом шаге (жадный алгоритм), то можно пропустить ход, не лучший локально, но дающий в результате оптимальное решение.

Существуют различные общие схемы метода отжига, среди которых обычно выделяют больцмановский отжиг [14, 15], отжиг Коши (быстрый отжиг) [16, 17], сверхбыстрый отжиг [18], алгоритм Ксин Яо [19] и методы «тушения» [20, 21]. В работе А.С. Лопатина [12] показано, что версия алгоритма сверхбыстрого отжига сходится значительно быстрее других методов. При этом отжиг Коши также приводит к низким значениям невязки при большом числе вызовов функции — порядка 50 000, что для нашего исследования, безусловно, также представляет определенный практический интерес.

Эволюция инновационно-индустриальных кластеров предопределяется не только их самостоятельным развитием, но и эффективным взаимодействием кластеров. Здесь в качестве наиболее важных направлений подобного взаимодействия следует рассматривать три их вида:

- 1) экономико-финансовое взаимодействие;
- 2) информационное взаимодействие;
- 3) логистическое взаимодействие.

Прежде всего эти три вида взаимодействия инновационно-индустриальных кластеров определяют перспективность инновационного развития большой территории, на которой они расположены. Под такими территориями можно понимать федеральные округа России.

Основной наиболее значительной характеристикой успешности социально-экономического развития инновационно-индустриальных кластеров в рамках одного федерального округа мы считаем естественный прирост численности населения региона, в котором находится тот или иной кластер.

Далее следует определиться с параметрами, от которых зависит прирост населения, после чего можно перейти к построению и отладке цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия. При этом выбранные параметры должны соответствовать цели создания компьютерной цифровой модели перечисленных ранее трех видов взаимодействия. А затем следует построение и отладка цифрового двойника указанного взаимодействия кластеров (*рис. 1*).

Использование подхода, представленного на *рис. 1*, позволит избежать преждевременных необоснованных управленческих решений государственного масштаба в отношении дальнейшего развития инновационно-индустриальных кластеров, расположенных на территории конкретного федерального округа России, и, напротив, смоделировать механизм межкластерного взаимодействия на компьютере в виде соответствующего цифрового двойника. Это позволит затем отладить указанный цифровой двойник так, чтобы получить оптимальное управленческое решение в смысле глобальной оптимизации, после чего принять его на практике с возможностью планирования и корректировки будущих государственных решений на компьютере с помощью уже отлаженного цифрового двойника.

В целях конкретизации модели рассмотрим указанные на *рис. 1* этапы более детально.

Этап 1 — выбор и корректировка необходимых параметров цифрового двойника. Эффективность межкластерного взаимодействия лучше всего отражает естественный прирост населения (y) в анализируемых регионах, в которых расположены соответствующие инновационно-индустриальные кластеры. Именно этот показатель является наиболее оправданной характеристикой образования и дальнейшей эволюции кластеров.

Однако прирост населения необходимо поставить в зависимость от таких факторов модели цифрового двойника, которые отражали бы в достаточной мере направления межкластерного взаимодействия, к числу которых относятся экономико-финансовый, информационный и логистический виды взаимодействия. К таким факторам мы относим среднедушевые денежные доходы населения (в месяц) (x_1), инвестиции в основной капитал (x_2) и экспорт минус импорт (x_3). Перераспределение величины данных показателей со стороны государства и

бизнеса внутри конкретного федерального округа между регионами, где находятся кластеры, совершенно очевидно отражает их экономико-финансовое взаимодействие. Кроме того, перераспределение инвестиций в основной капитал естественным образом происходит из информационного взаимодействия кластеров. К тому же, если среднедушевые доходы населения в одном регионе выше, чем в другом, то это приведет к миграции соответствующей рабочей силы и интеллектуального капитала в лице необходимых специалистов между регионами. Соответственно, это также является следствием информационного взаимодействия кластеров между собой. Наконец, логистическое взаимодействие кластеров также отражает процессы миграции капитала и квалифицированных кадров между соответствующими регионами федерального округа, что, кроме всего прочего, находит отражение и в показателе экспорта минус импорт.

Таким образом, нами рассматривается функция трех переменных $y = f(x_1, x_2, x_3)$ для планирования перераспределения перечисленных ресурсов со стороны государства во взаимодействии с бизнесом в целях увеличения естественного прироста населения федерального округа. Однако по причине того, что исходные статистические данные всех трех переменных выражены в рублях или долларах, их, прежде чем использовать, необходимо скорректировать на соответствующие темпы инфляции для того, чтобы все данные были представлены в ценах последнего анализируемого года.

Этап 2 — построение и отладка модели цифрового двойника. В качестве такой модели будем использовать модель множественной нелинейной регрессии как наиболее приближенной к описанию реальных процессов, происходящих в экономике, в том числе и для инновационно-индустриальных кластеров. Практической задачей исследования на данном этапе будет выбор такой регрессии, которая будет наиболее качественной по необходимым статистическим параметрам, а также не будет противоречить логике, поскольку на основании рекомендаций А. Дамодарана [22] в любом анализе необходимо руководствоваться здравым смыслом.

Этап 3 — отладка алгоритма имитационного моделирования. В качестве алгоритма имитационного отжига будем использовать отжиг Коши, то есть быстрый отжиг. Однако для достижения глобального экстремума регрессионной функции, полученной на этапе 2, указанный отжиг следует дополнительно отладить, что подразумевает корректировку параметров температуры отжига и определение времени останова решателя. Подобную отладку необходимо произвести один раз на примере полученной регрессионной функции, глобальный экстремум которой можно найти аналитически. Это позволит отладить алгоритм отжига так, чтобы он гарантировал с достаточной достоверностью достижение глобального экстремума и не требовал последующей отладки алгоритма в случае получения новых регрессионных функций.

Таким образом, мы получаем гибкую адаптированную модель цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия.

Рассмотрим процесс создания и отладки цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия на примере Приволжского федерального округа (ПФО).

Согласно перечню, утвержденному Правительством РФ, в России действуют 25 пилотных инновационных территориальных кластеров по регионам Российской Федерации. Тогда будем рассматривать в ПФО только те регионы (области или республики), в которых расположены кластеры из данного перечня (табл. 1).

Этап 1 — выбор и корректировка необходимых параметров цифрового двойника. Используя показатели «Статистического обозрения» Федеральной службы государственной статистики, сгруппируем необходимые данные о естественном приросте населения, среднедушевых доходах населения (в месяц), инвестициях в основной капитал и об экспорте минус импорт за 10 лет с 2009 по 2018 г. При этом в целях сравнимости данных скорректируем показатели, измеряемые в рублях или долларах, на инфляцию (табл. 2). Таким образом, получаем данные в ценах 2018 г. в табл. 3.

Этап 2 — построение и отладка модели цифрового двойника. Используя данные табл. 3, в программе Statistica получены две наиболее достоверные модели множественной нелинейной регрессии:

$$\text{регрессия 1: } y = -290,198 + 0,36 x_2 + 57,229 \sqrt{x_1} - 33,052 \sqrt{x_2};$$

$$\text{регрессия 2: } y = 15\,283 - 148\,867\,881 \frac{1}{x_1} - 35 \sqrt{x_2}.$$

При этом сама программа Statistica отбросила переменную x_3 как незначимую.

Обе регрессии получились достаточно качественными, что иллюстрируют рис. 2 и 3. Коэффициенты детерминации для регрессий получились примерно одинаковыми, то есть $R^2 \approx 0,62$.

Чтобы выбрать окончательно наиболее адекватную регрессию, построим их трехмерные графики в программе Matlab (рис. 4 и 5). При этом из табл. 3 берется диапазон среднедушевых денежных доходов населения (в месяц), который составляет сегмент $[0; 37\,914,6]$ руб. Соответственно, диапазон инвестиций в основной капитал составляет сегмент $[0; 736\,854,4]$ млн руб.

Как уже указывалось ранее, если следовать рекомендациям А. Дамодарана [22], в любом анализе необходимо руководствоваться здравым смыслом. Тогда неестественной представляется ситуация на рис. 5, где при максимальном доходе населения наибольший прирост его численности будет при нуле инвестиций в основной капитал. Как известно, без инвестиций в основной капитал невозможно развитие инновационно-индустриальных кластеров, что в свою очередь приведет к падению производства и сокращению доходов населения в таком кластере. По

этой причине в дальнейшем не будем рассматривать регрессию 2, а станем анализировать регрессию 1 как наиболее достоверную.

Этап 3 — отладка алгоритма имитационного моделирования. Если внимательно посмотреть на *рис. 4*, то видно, что при максимальном доходе населения 37 914,6 руб. и нулевых инвестициях в основной капитал будет самый большой прирост населения в среднем на один регион (правая часть графика). Далее если при максимальном доходе населения постепенно увеличивать инвестиции до максимума в 736 854,4 млн руб., то прирост населения будет уменьшаться почти до нуля, а затем снова увеличиваться, пока не достигнет нового максимума (левая часть графика). Но при этом прирост населения все равно не достигнет глобального максимума (как на правой части графика).

Таким образом, имеем задачу нахождения максимального значения функции y на заданных сегментах ее аргументов: $x_1 \in [0; 37\,914,6]$ и $x_2 \in [0; 736\,854,4]$. В нашем случае она решается аналитически: инвестиции $x_2 = 0$ и доход населения $x_{1,\max} = 37\,914,6$ руб., тогда $y_{\max} = 10\,853,2$ чел.

Однако это позволяет отладить алгоритм имитационного отжига для выпуклого вниз по x_2 графика функции y на *рис. 4*. Это необходимо для того, чтобы при дальнейшем изменении уравнения регрессии, например, при введении в него новых аргументов x , в процессе применения уже полученного цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия получалось бы наибольшее значение функции глобальное, а не локальное. Для этого подбираем параметры температурного режима и времени остановки решателя опытным путем, причем так, чтобы получилось решение, которое мы получили аналитически.

Отладка цифрового двойника проведена в программе Matlab. Для этого сначала создается М-файл-функция анализируемой регрессии. Затем исполняется программа с подобранными параметрами температурного режима и времени остановки решателя имитационного отжига. В результате получается значение целевой функции $y_{\max} = 10\,853$ чел.

Самым важным результатом для полученного цифрового двойника является то, что увеличение инвестиций в основной капитал далеко не всегда приводит к росту численности населения в регионах федерального округа. Население инновационно-индустриальных кластеров интересуется прежде всего рост его среднедушевых доходов. Это необходимо учитывать при перераспределении инвестиционных и человеческих ресурсов в рамках одного федерального округа. Краткосрочное сокращение инвестиций в основной капитал и одновременное повышение доходов населения в отдельно взятом регионе одного федерального округа может привести к более серьезному приросту населения в регионе по сравнению с ситуацией, когда недостаток доходов населения компенсируется приростом инвестиций в основной капитал.

Таким образом, более четко спланированное экономико-финансовое, информационное и логистическое взаимодействие между инновационно-индустриальными кластерами в конкретном федеральном округе, которое отражено в полученном цифровом двойнике, поможет решать как тактические, так и стратегические задачи эволюции кластеров, решаемые государством и бизнесом в совместном взаимодействии.

Сформулируем наиболее важные практические выводы, полученные в результате исследования.

1. Использование цифровых двойников дает широкие возможности для управления инновационно-индустриальными кластерами и их взаимодействием. Оптимизация подобных процессов позволит развиваться кластерам более эффективно с социальной, экономической и технической точек зрения.
2. В качестве наиболее важных направлений межкластерного взаимодействия следует рассматривать экономико-финансовое, информационное и логистическое взаимодействие. При этом основной наиболее значительной характеристикой успешности подобного взаимодействия в рамках одного федерального округа мы считаем естественный прирост населения региона, в котором находится тот или иной кластер.
3. Применение цифровых двойников на практике тесно связано с технологиями программирования и искусственного интеллекта. Одним из методов искусственного интеллекта является имитационное моделирование. Наибольший практический интерес представляет алгоритм имитационного отжига в силу ряда его преимуществ.
4. Использование цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия позволит избежать преждевременных необоснованных управленческих решений государственного масштаба в отношении дальнейшего развития инновационно-индустриальных кластеров, расположенных на территории конкретного федерального округа России, и, напротив, смоделировать механизм межкластерного взаимодействия на компьютере в виде соответствующего цифрового двойника. Это позволит затем отладить указанный цифровой двойник так, чтобы получить оптимальное управленческое решение в смысле глобальной оптимизации, после чего принять его на практике с возможностью планирования и корректировки будущих государственных решений на компьютере с помощью уже отлаженного цифрового двойника.
5. Самым важным результатом для полученного цифрового двойника механизма межкластерного взаимодействия в Приволжском федеральном округе является то, что увеличение инвестиций в основной капитал далеко не всегда приводит к росту населения в регионах федерального округа. Население инновационно-индустриальных кластеров интересуется прежде всего рост его среднедушевых доходов. Это необходимо учитывать при перераспределении инвестиционных и

человеческих ресурсов в рамках одного федерального округа. Краткосрочное сокращение инвестиций в основной капитал и одновременное повышение доходов населения в отдельно взятом регионе одного федерального округа может привести к более серьезному приросту населения в регионе по сравнению с ситуацией, когда недостаток доходов населения компенсируется приростом инвестиций в основной капитал.

Таблица 1**Инновационные территориальные кластеры по регионам ПФО****Table 1****Regional innovation clusters by region of the Volga Federal District**

Регионы	Инновационные кластеры
Нижегородская область	Нижегородский индустриальный инновационный кластер в области автомобилестроения и нефтехимии
Республика Мордовия	Энергоэффективная светотехника и интеллектуальные системы управления освещением
Ульяновская область	Консорциум «научно-образовательно-производственный кластер «Ульяновск-Авиа»
	Ядерно-инновационный кластер г. Димитровграда
Самарская область	Инновационный территориальный аэрокосмический кластер
Пермский край	Инновационный территориальный кластер ракетного двигателестроения «Технополис «Новый Звездный»
	Фотоника
Удмуртская Республика	Удмуртский машиностроительный кластер
Республика Татарстан	Камский инновационный территориально-производственный кластер
Республика Башкортостан	Нефтехимический территориальный кластер

Источник: Российская кластерная обсерватория. URL: <https://cluster.hse.ru>

Source: The Russian Cluster Observatory data. URL: <https://cluster.hse.ru> (In Russ.)

Таблица 2**Годовые темпы инфляции (%)****Table 2****Annual inflation rates, percent point**

Валюта	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Рубль	8,78	6,1	6,58	6,45	11,36	12,91	5,38	2,52	4,27
Доллар США	1,5	2,96	1,74	1,5	0,76	0,73	2,07	2,11	1,91

Источник: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru>

Source: The Federal State Statistics Service of Russia data. URL: <https://www.gks.ru> (In Russ.)

Таблица 3

Данные для построения регрессионной модели в ценах 2018 г.

Table 3

Data to build a regression model at 2018 values

Год	Среднедушевые денежные доходы населения (в месяц), руб. x_1	Инвестиции в основной капитал, млн руб. x_2	Экспорт минус импорт, млн долл. США x_3	Естественный прирост населения, чел. y
1. Нижегородская область				
2009	26 646,5	364 200	323,8	-22 094
2010	27 399	293 805,4	67,1	-22 942
2011	28 948,2	356 243,3	2 097,9	-17 869
2012	32 204,6	389 268,9	1 578,1	-13 890
2013	34 216,8	385 562,5	1 676	-13 457
2014	35 548,8	364 555,9	2 051,8	-12 846
2015	34 663,1	257 909,3	886,4	-10 714
2016	32 503,3	234 809,1	669,4	-11 420
2017	31 967,1	254 493	445,1	-13 556
2018	31 631	259 045,4	1 216,8	-15 917
2. Республика Мордовия				
2009	17 624,5	60 431,5	-61,9	-4 896
2010	18 794,6	65 463,8	-28,1	-5 211
2011	18 495,5	74 836	-17	-4 414
2012	19 478,1	74 621,1	-74,4	-3 691
2013	20 234,8	76 059,2	17,5	-3 855
2014	20 460	70 326,3	93	-3 434
2015	19 843,1	58 975,9	-2,2	-3 567
2016	19 000	56 500	30,3	-3 457
2017	18 914,6	62 474,5	47,9	-4 008
2018	18 048	51 210,1	44,3	-4 094
3. Ульяновская область				
2009	19 362	90 379	70,2	-5 734
2010	21 503,8	76 465,4	117,4	-6 690
2011	22 223	99 259,3	30,2	-5 101
2012	24 621,3	109 859,2	-21,9	-3 551
2013	25 858,6	107 972	-258,1	-3 523
2014	27 545,9	104 511,3	-14	-3 397
2015	25 522,8	101 496,5	-67,7	-3 734
2016	23 501,4	73 628,4	-15,3	-3 997
2017	23 980	95 728	-57	-4 944
2018	22 846	81 105,4	-254,9	-5 413
4. Самарская область				
2009	33 303,5	203 968,9	3 420,1	-10 713
2010	34 014,9	226 028,2	5 769,8	-11 809
2011	34 691,1	319 376,7	4 168,6	-9 516
2012	37 031	307 832,4	3 291,7	-5 641
2013	37 254,5	371 560,7	4 276,8	-6 594
2014	33 115,6	381 970,5	5 938,4	-5 402
2015	30 293,5	336 533,9	3 585,7	-4 687
2016	28 315	274 484,7	2 020,4	-4 277
2017	27 781,7	262 201,5	1 594,4	-9 284
2018	27 507	259 152,3	1 723,7	-9 927

5. Пермский край				
2009	31 714,1	249 400,2	1 963,1	-4 511
2010	31 357	221 552,1	3 157,9	-3 153
2011	33 153	215 208	5 058,3	-1 765
2012	34 336,2	238 700,8	6 059,8	1 569
2013	36 360,1	267 302,7	5 366	1 584
2014	36 281,4	236 130,4	5 688,4	2 070
2015	37 117,7	244 438,1	5 035	1 383
2016	30 707,4	253 362,4	3 611,3	889
2017	29 701,3	264 639,6	2 938,4	-2 946
2018	28 777	238 007,9	3 180,2	-5 224
6. Удмуртская Республика				
2009	20 042,8	76 615,2	-17	869
2010	20 968,3	72 199,6	1,5	622
2011	22 351,7	97 862,4	781,7	1 495
2012	24 341	86 273,2	1 184	3 718
2013	26 318,5	101 725,9	452,6	2 776
2014	27 052,4	114 264	342,2	2 651
2015	27 740,9	90 503,7	167,2	2 662
2016	25 543,2	91 296,9	250,7	1 822
2017	24 874,7	83 364,7	51,5	-258
2018	24 415	97 892,8	-57,9	-1 670
7. Республика Татарстан				
2009	28 782	497 040,8	8 170,6	-1 415
2010	30 792,5	521 763,6	11 221,9	-762
2011	31 867,1	620 525	14 488,8	3 752
2012	35 592	700 725,8	15 484,2	9 023
2013	36 843,6	736 854,4	13 959,5	10 218
2014	37 914,6	690 372,2	11 861,9	9 732
2015	35 513,6	695 245,1	7 452,5	10 416
2016	35 076,3	686 810,8	6 861	10 643
2017	33 673	664 837,7	6 496,5	4 240
2018	33 130	629 731	8 223,7	1 600
8. Республика Башкортостан				
2009	29 927,6	259 180,6	3 271,5	2 305
2010	30 390,3	238 457,6	7 754,9	2 686
2011	31 009,2	297 102,9	8 499,9	1 374
2012	32 245,2	351 117,4	9 300,7	5 617
2013	34 085,1	377 093,5	9 156,6	5 895
2014	33 046,9	363 157,3	10 279,8	6 949
2015	31 493,2	356 778,5	5 629,3	5 089
2016	30 082,1	385 843,1	5 292,3	3 298
2017	29 603,3	272 034,6	2 679,4	-1 072
2018	28 645	267 868,1	2 650,2	-3 429

Источник: авторская разработка

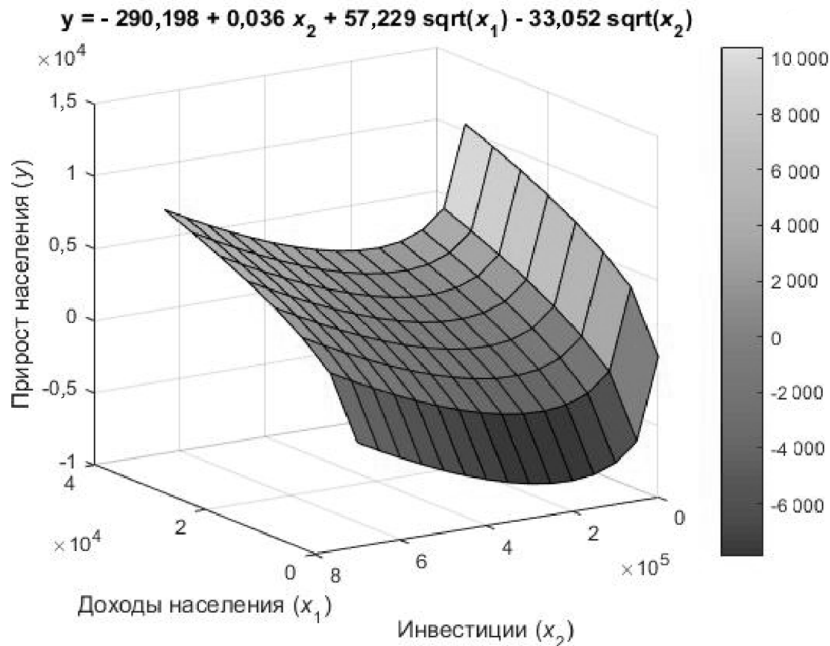
Source: Authoring

Рисунок 3**Регрессия 2 для восьми регионов Приволжского федерального округа с кластерами****Figure 3****Regression 2 for the eight regions of the Volga Federal District with clusters**

Regression Summary for Dependent Variable: Var4 (Total.sta)						
R= ,78749368 R ² = ,62014630 Adjusted R ² = ,57266459						
F(3,24)=13,061 p<,00003 Std.Error of estimate: 2086,3						
N=28	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(24)	p-value
Intercept			15283	9929	1,53917	0,136845
Var2	2,73627	1,100996	0	0	2,48526	0,020309
SQRV2	-2,18245	1,222732	-35	20	-1,78489	0,086925
1/V1	-0,25502	0,248224	-148867881	144901692	-1,02737	0,314489

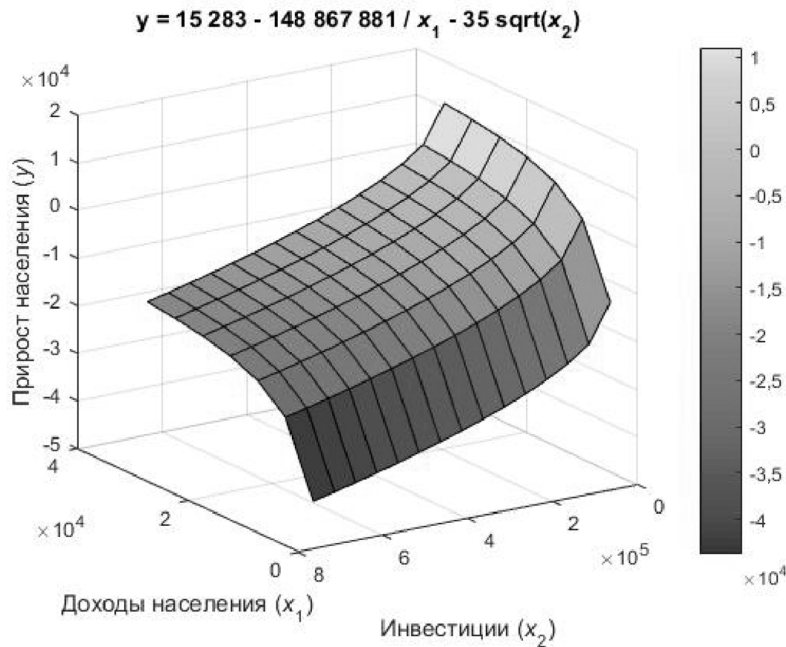
Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 4**График регрессии 1 для восьми регионов Приволжского федерального округа с кластерами****Figure 4****Regression plot 1 for the eight regions of the Volga Federal District with clusters**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 5**График регрессии 2 для восьми регионов Приволжского федерального округа с кластерами****Figure 5****Regression plot 2 for the eight regions of the Volga Federal District with clusters**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Яшин С.Н., Кошелев Е.В., Костригин Р.В. Составление линейного функционала ценности инновационно-индустриального кластера для региона // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. 2019. № 12. URL: <http://uecs.ru/innovacii-investicii/item/5774-2019-12-21-11-28-53>
2. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C. et al. The Digital Twin. Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, no. 9, pp. 113–120. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
3. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 939–948. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
4. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 2015, no. 3, pp. 18–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

5. *Boschert S., Rosen R.* Digital Twin – The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) *Mechatronic Futures*. Cham, Springer International Publishing, 2016, pp. 59–74. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
6. *Tao F., Cheng J., Qi Q. et al.* Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3563–3576.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
7. *Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D.* About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 3, pp. 567–572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
8. *Grieves M., Vickers J.* Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, Cham, Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
9. *Kuhn T.* Digitaler Zwilling. *Informatik-Spektrum*, 2017, vol. 40, pp. 440–444.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2>
10. *Garetti M., Rosa P., Terzi S.* Life Cycle Simulation for the Design of Product-Service Systems. *Computers in Industry*, 2012, vol. 63, iss. 4, pp. 361–369.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.007>
11. *Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H.-A.* Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment. *Manufacturing Letters*, 2013, vol. 1, iss. 1, pp. 38–41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
12. *Лопатин А.С.* Метод отжига // Стохастическая оптимизация в информатике. 2005. Т. 1. № 1. С. 133–149. URL: <https://readera.org/metod-otzhiga-14339381>
13. *Ingber L., Rosen B.* Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing: A Comparison. *Mathematical and Computer Modelling*, 1992, vol. 16, iss. 11, pp. 87–100. URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(92\)90108-W](https://doi.org/10.1016/0895-7177(92)90108-W)
14. *Kirkpatrick S., Gelatt C.D. Jr., Vecchi M.P.* Optimization by Simulated Annealing. *Readings in Computer Vision. Issues, Problem, Principles, and Paradigms*, 1987, pp. 606–615. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50059-3>
15. *Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N. et al.* Equation of State Calculations by Fast Computer Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, vol. 21, iss. 6, pp. 1087–1092. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1699114>

16. *Тихомиров А.С.* О быстрых вариантах алгоритма отжига (Simulated Annealing) // *Стохастическая оптимизация в информатике*. 2009. Т. 5. №1. С. 65–90.
URL: <https://readera.org/o-bystryh-variantah-algoritma-otzhiga-simulated-annealing-14339451>
17. *Szu H., Hartley R.* Fast Simulated Annealing. *Physics Letters A*, 1987, vol. 122, iss. 3-4, pp. 157–162. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(87\)90796-1](https://doi.org/10.1016/0375-9601(87)90796-1)
18. *Ingber L.* Very Fast Simulated Re-Annealing. *Mathematical and Computer Modelling*, 1989, vol. 12, iss. 8, pp. 967–973.
URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(89\)90202-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(89)90202-1)
19. *Yao X.* A New Simulated Annealing Algorithm. *International Journal of Computer Mathematics*, 1995, vol. 56, iss. 3-4, pp. 161–168.
URL: <https://doi.org/10.1080/00207169508804397>
20. *Ingber L.* Simulated Annealing: Practice versus Theory. *Mathematical and Computer Modelling*, 1993, vol. 18, iss. 11, pp. 29–57.
URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90204-C](https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90204-C)
21. *Ingber L.* Adaptive Simulated Annealing (ASA): Lessons Learned. *Control and Cybernetics*, 1996, vol. 25, no. 1, pp. 33–54.
URL: https://www.researchgate.net/publication/236901952_Adaptive_simulated_annealing_ASA_Lessons_learned
22. *Damodaran A.* Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2002, 992 p.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

DEVELOPING THE DIGITAL TWIN OF THE ECONOMIC, FINANCIAL, INFORMATION AND LOGISTICS INTER-CLUSTER COOPERATION MECHANISM

Sergei N. YASHIN^{a*}, Yurii V. TRIFONOV^b, Egor V. KOSHELEV^c

^a National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN),
Nizhny Novgorod, Russian Federation
jashinsn@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7182-2808>

^b National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN),
Nizhny Novgorod, Russian Federation
kei@ef.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4745-0004>

^c National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN),
Nizhny Novgorod, Russian Federation
ekoshelev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5290-7913>

* Corresponding author

Article history:

Article No. 325/2020
Received 1 June 2020
Received in revised form
15 June 2020
Accepted 29 June 2020
Available online
30 July 2020

JEL classification: C63,
E17, O21, O36

Keywords: digital twin,
inter-cluster cooperation,
simulation modeling,
simulated annealing

Abstract

Subject. This article deals with the issues related to the use of digital twins in order to manage innovation and industrial clusters and the liaison between them.

Objectives. The article aims to develop a digital twin model of inter-cluster cooperation within a Federal district of Russia. The Volga (Privolzhsky) Federal District is considered a case study.

Methods. For the study, we used a multiple non-linear regression method and a fast simulated annealing (FSA).

Results. The article offers and describes a designed digital twin model of inter-cluster cooperation mechanism.

Conclusions and Relevance. When reallocating investment and human resources within one federal district, the interests of the population of innovation and industrial clusters should be taken into account, as only just an increase in fixed investment does not always lead to the growth of the region's population. The use of the digital twin model of inter-cluster cooperation mechanism will help avoid premature unreasonable management decisions of the public-policy level regarding the further development of innovation-industrial clusters.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2020

Please cite this article as: Yashin S.N., Trifonov Yu.V., Koshelev E.V. Developing the Digital Twin of the Economic, Financial, Information and Logistics Inter-Cluster Cooperation Mechanism. *Finance and Credit*, 2020, vol. 26, iss. 7, pp. 1448–1468.
<https://doi.org/10.24891/fc.26.7.1448>

Acknowledgments

The article was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), grant № 19-010-00932.

References

1. Yashin S.N., Koshelev E.V., Kostrigin R.V. [Compilation of linear functional of the value of the innovation and industrial cluster for the region]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2019, no. 12. (In Russ.)
URL: <http://uecs.ru/innovacii-investicii/item/5774-2019-12-21-11-28-53>
2. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C. et al. The Digital Twin. Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, no. 9, pp. 113–120.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
3. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 939–948.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
4. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 2015, no. 3, pp. 18–23.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
5. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) *Mechatronic Futures*. Cham, Springer International Publishing, 2016, pp. 59–74. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
6. Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3563–3576.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
7. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 3, pp. 567–572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, Cham, Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
9. Kuhn T. Digitaler Zwilling. *Informatik-Spektrum*, 2017, vol. 40, pp. 440–444.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2>

10. Garetti M., Rosa P., Terzi S. Life Cycle Simulation for the Design of Product-Service Systems. *Computers in Industry*, 2012, vol. 63, iss. 4, pp. 361–369.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.007>
11. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H.-A. Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment. *Manufacturing Letters*, 2013, vol. 1, iss. 1, pp. 38–41. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
12. Lopatin A.S. [Simulated annealing method]. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 133–149.
URL: <https://readera.org/metod-otzhiga-14339381> (In Russ.)
13. Ingber L., Rosen B. Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing: A Comparison. *Mathematical and Computer Modelling*, 1992, vol. 16, iss. 11, pp. 87–100. URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(92\)90108-W](https://doi.org/10.1016/0895-7177(92)90108-W)
14. Kirkpatrick S., Gelatt C.D. Jr., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Readings in Computer Vision. Issues, Problem, Principles, and Paradigms*, 1987, pp. 606–615. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50059-3>
15. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N. et al. Equation of State Calculations by Fast Computer Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, vol. 21, iss. 6, pp. 1087–1092. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
16. Tikhomirov A.S. [About the fast versions of annealing algorithm (Simulated Annealing)]. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike*, 2009, vol. 5, no. 1, pp. 65–90. URL: <https://readera.org/o-bystryh-variantah-algoritma-otzhiga-simulated-annealing-14339451> (In Russ.)
17. Szu H., Hartley R. Fast Simulated Annealing. *Physics Letters A*, 1987, vol. 122, iss. 3-4, pp. 157–162. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(87\)90796-1](https://doi.org/10.1016/0375-9601(87)90796-1)
18. Ingber L. Very Fast Simulated Re-Annealing. *Mathematical and Computer Modelling*, 1989, vol. 12, iss. 8, pp. 967–973.
URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(89\)90202-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(89)90202-1)
19. Yao X. A New Simulated Annealing Algorithm. *International Journal of Computer Mathematics*, 1995, vol. 56, iss. 3-4, pp. 161–168.
URL: <https://doi.org/10.1080/00207169508804397>
20. Ingber L. Simulated Annealing: Practice versus Theory. *Mathematical and Computer Modelling*, 1993, vol. 18, iss. 11, pp. 29–57.
URL: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90204-C](https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90204-C)
21. Ingber L. Adaptive Simulated Annealing (ASA): Lessons Learned. *Control and Cybernetics*, 1996, vol. 25, no. 1, pp. 33–54.

URL:

https://www.researchgate.net/publication/236901952_Adaptive_simulated_annealing_ASA_Lessons_learned

22. Damodaran A. *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2002, 992 p.

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.