

УДК 330:004.942:007.3

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Гейда А.С.

*ФГБУН «Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации»  
Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, e-mail: Geida@iias.spb.su*

В работе представлены концептуальные и соответствующие им формальные модели, разработанные для исследования экономических систем, совершенствуемых при цифровой трансформации экономики, основные методы, позволяющие решать актуальные прикладные задачи аналитического исследования цифровизации таких систем. Вскрыты механизмы проявления эффектов использования информационных технологий, внедряемых в процессе цифровой трансформации экономики. Выполнена концептуализация проявления эффектов использования информационных технологий в экономических системах и их связей с проявлениями операционных свойств совершенствуемых систем – таких свойств, как Capabilities, Dynamic Capabilities, потенциал систем при использовании информационных технологий, результативность цифровизации, цифровой потенциал. Предложены концепты и принципы, а затем теоретико-графовые модели, позволяющие вскрыть механизмы формирования эффектов использования цифровых информационных технологий в совершенствуемых экономических системах и затем выполнить аналитическое моделирование формирования таких эффектов. Введено свойство потенциала системы, как комплексное операционное свойство системы, характеризующее приспособленность системы к достижению изменяющихся целей. Раскрыты основные модели, позволяющие оценивать показатели этого свойства на основе учета эффектов использования информационных технологий. Описан ряд направлений использования описанных элементов концепции и методологии для аналитического исследования результативности цифровой трансформации экономики.

**Ключевые слова:** потенциал систем, экономические системы, операционные свойства, эффективность, результативность, потенциальные возможности, информационные технологии, эффективность использования информационных технологий, цифровизация, цифровой потенциал экономической системы, цифровая экономика

## METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF ANALYTICAL ESTIMATION OF ECONOMICAL SYSTEMS DIGITALIZATION PERFORMANCE

Geyda A.S.

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS),  
Saint-Petersburg, e-mail: Geida@iias.spb.su*

In article conceptual and corresponding formal models developed for a research of the economic systems improved at digital transformation of economy and the methods allowing solving the corresponding applied research problems of digitalization of such systems are presented. Mechanisms of manifestation of effects of the information technologies usage in the course of digital transformation of economy are discussed. Conceptualization of effects of use of information technologies manifestation in economic systems digital transformation and related to them conceptualization of operational properties of systems, changed during their functioning – such as Capabilities, Dynamic Capabilities, System's potential, digital potential, performance of digital transformation of economy provided. Concepts and the principles, and corresponding graph theoretic models, which allows explaining and model mechanisms of information technologies usage effects formation in the economic systems based on analytical modeling are offered. The property of system potential as the complex operational property of system characterizing system suitability to achieve changing goal in changing environment introduced. Models allowing estimating indicators of this property on the basis of analytical modeling of effects of information technologies usage are introduced. A number of the directions to use the described elements of the concept and methodology for an analytical research of digital transformation of economy performance are described.

**Keywords:** system potential, economic systems, operational properties, efficiency, effectiveness, potential capabilities, information technologies, efficiency of using information technologies, digitalization, digital potential of an economic system, digital economy

В работе представлены методологические основы оценивания результативности цифровизации экономических систем. Они рассмотрены на примере функционирования технологической экономической системы, относящейся к классу микроэкономических, технологических систем. Под цифровизацией системы понимается такое совершенствование системы, которое позволяет улучшить операционные свойства системы (результативность, эффективность

функционирования, потенциал системы) при ее функционировании в изменяющейся среде за счет использования при ее функционировании цифровых информационных технологий. Функционирование системы – реализация ее функций на границе со средой. Такое функционирование может носить в том числе и характер совершенствования системы, ее функционирования. Необходимость совершенствования системы и ее функционирования вызывается из-

менениями среды. Возможности такого изменения создаются за счет использования информационных технологий (ИТ). Под ИТ понимаются описания возможных информационных операций, их возможных характеристик и связей между ними. Цифровые ИТ – современные ИТ, основывающиеся на цифровом представлении информации. Результативность цифровизации экономической системы следует оценивать по тому, насколько изменятся операционные свойства этой системы, проявляющиеся при таких изменениях среды и системы, что в результате этих изменений оказывается необходимым использовать информационные действия цифровых ИТ для изменения системы и ее функционирования с целью достижения требуемых результатов функционирования. Соответственно, под цифровой экономикой (ЦЭ) понимается та часть экономики, которая изменяется (совершенствуется) в изменяющейся среде за счет использования информационных действий цифровых ИТ для реализации необходимых изменений функционирования. Описанную роль ИТ в функционировании экономики желательно раскрыть аналитически, с использованием числовых математических моделей. Для этого целесообразно использовать введенное ранее [1, 2] понятие потенциала системы (в том числе экономической системы), позволяющее достаточно просто перейти к построению математических моделей показателя оценивания потенциала. Потенциал системы определен как комплексное операционное свойство системы, характеризующее приспособленность системы к достижению изменяющихся целей (при изменяющихся воздействиях среды).

Изменяющаяся цель – действительная и возможные цели. Изменение целей происходит в результате воздействия среды и может потребовать дополнительных операций для перехода к функционированию системы для достижения одной из возможных, актуализированных в результате действий среды целей. Кроме изменения целей среда может вызывать случайные события при функционировании системы, ведущие к необходимости выполнения дополнительных операций при функционировании системы, в том числе для достижения действительной цели.

Для должной реакции на изменяющиеся воздействия среды и возникает необходимость использования информационных операций. Они реализуются в соответствии с какими-либо (в частности, цифровыми) информационными технологиями для того, чтобы проверить состояния среды и си-

стемы и определить, какие у системы есть возможности по изменению системы и ее функционирования так, чтобы это функционирование лучше соответствовало изменяющимся целям, изменяющимся воздействиям среды.

В экономических системах такие воздействия могут иметь вид изменений: цен на биржах, спроса на продукцию, характеристик покупателей продукции, предпочтений при покупках, воздействий конкурентов.

Такие изменения в системе и среде ведут к необходимости реализации информационных действий в соответствии с какой-либо ИТ для получения информации об изменившемся состоянии, а затем выработки реакции на изменения и, наконец, в зависимости от особенностей используемых информационных действий – к разным экономическим результатам в изменяющейся среде. Проверка изменений среды и системы и последующая реакция на изменения в виде выработки предписаний по совершенствованию систем, их функционирования и представляется основной функцией, которую реализуют с использованием ИТ. Поэтому результат использования ИТ следует описывать с использованием показателей, основанных на показателе потенциала системы. А именно, в зависимости от используемых ИТ экономическая система будет по-разному приспособлена к изменениям среды и системы, будет по-разному реагировать на изменения и будет по-разному приспособлена достигать разных (изменяющихся) целей. Приспособленность достигать цели с использованием ИТ вскрывается за счет концептуализации цепочек информационных действий и связанных с ними последующих неинформационных (материальных) действий. Необходимость реализации таких цепочек возникает в связи с изменением воздействий среды, последующих в результате информационных действий для проверки состояний и выработки реакций на изменения, а затем реализацией выработанных этими информационными действиями предписаний по выполнению измененных материальных действий, которые и позволяют достигать целей при использовании цифровых ИТ. Эти цепочки, проявляющиеся в результате использования цифровых ИТ, отличаются от цепочек при использовании других ИТ тем, что за счет использования цифровых ИТ достигается приспособленность к достижению целей, которые не могли достигаться ранее, при использовании традиционных ИТ. Кроме того, улучшается приспособленность к достижению целей в таких

условиях, в которых ранее экономическая система достигать цели была не приспособлена. Такая приспособленность достигать изменяющихся целей и характеризовалась разными показателями потенциала системы. Поэтому часть потенциала экономической системы, полученная за счет использования цифровых ИТ, и может служить показателем целевого результата цифровизации. Назовем этот показатель цифровым добавленным потенциалом экономической системы или – цифровым потенциалом экономической системы.

Цифровая экономика может быть определена как такая экономика, которая характеризуется функционированием экономических систем со значительным и растущим цифровым потенциалом.

Значительность цифрового потенциала для экономики означает, что без учета цифровизации экономика имела бы существенно другие характеристики. Растущий цифровой потенциал обуславливает повышение важности проявлений цифровой экономики по сравнению с традиционной экономикой (экономикой, функционирующей за счет использования традиционных информационных технологий). Моделирование использования информационных технологий в экономических системах целесообразно реализовать на основе концептуальной модели взаимосвязи информационных и неинформационных операций (действий) при функционировании экономических систем в условиях изменений среды. Такая модель была ранее разработана для использования ИТ при функционировании технологических систем разных видов [3, 4]. Она позволяет перейти к теоретико-графовому моделированию функционирования экономической системы с использованием ИТ, параметрическому теоретико-графовому моделированию изменений системы и ее функционирования, а затем к функциональному и программному моделированию функционирования экономической системы с использованием ИТ.

Строящиеся модели позволяют рассчитать показатели потенциала экономической системы при использовании разных ИТ и затем – показатели цифрового потенциала. Расчет показателей цифрового потенциала становится возможным благодаря тому, что с использованием разработанных моделей использования ИТ при функционировании экономических систем удалось выполнить моделирование той части цепочек из воздействий среды, последующих в результате информационных действий и вызванных этими действиями изменений материальных действий, которые проявля-

ются и позволяют достигать целей при использовании цифровых ИТ. Цифровые ИТ используются при цифровых информационных действиях, позволяющих нужным образом, с нужными эффектами реагировать на изменения состояний среды и системы, а именно – проверять эти состояния, вырабатывать предписания по результатам проверки и доводить эти предписания до стадии начала исполнения. Разница в показателях потенциала, полученная за счет реализации таких «цифровых» цепочек и цепочек «традиционных», и формирует цифровой потенциал экономической системы. Для оценивания цифрового потенциала экономической системы использован метод оценивания на основе определения мер возможности соответствия требуемых средой состояний системы и прогнозируемых при функционировании с использованием заданной ИТ состояний системы.

Цель исследования: разработать такие модели функционирования экономических систем, подвергающихся цифровизации, а затем на их основе – такие методы и методики решения задач исследования цифровизации, которые позволили бы научно обоснованно, с использованием аналитических прогнозных математических моделей оценить цифровой потенциал исследуемых экономических систем, совершенствуемых с использованием цифровых ИТ. Это должно позволить решать актуальные практические задачи цифровизации экономических систем, как математические задачи исследования (оценивания, анализа и синтеза) цифрового потенциала экономических систем, например – с использованием математических методов исследования операций и математического программирования.

#### Материалы и методы исследования

Основой для построения разработанных моделей и предложенных методов их использования при оценивании показателей является концептуальная модель исследования потенциала систем [1–3] с использованием информационных технологий [5–7]. При реализации последовательностей технологических операций (ТлОп) сначала выполняются технологические информационные операции (ТИО) по проверке (изменившихся) состояний элементов и среды, затем – ТИО по выбору изменившихся ТлОп (при необходимости). ТИО вызываются изменениями состояний системы и среды. Их целевой результат – информация о том, в каком состоянии находятся СТС, ее среда и что следует в связи с этим изменить. Затем на практике реализуются связанные с информационными причинно-следственной связью технологические неинформационные операции (ТНИО). В результате целенаправленно меняются неинформационные эффекты (вещества, энергии). То, как меняется среда и как меняются требования, предъявленные к системе, описывается деревом  $T_{cp}$  состояний на границе

среды и системы, схематически представленного на рисунке. В этом дереве каждому  $k$ -му узлу  $d_k$  соответствует вектор  $\tilde{Y}_{j,k}^d$  требуемых (директивных) характеристик эффектов функционирования системы (требуемых будущих состояний). Ребру дерева соответствует изменение вектора требуемых будущих состояний и мера возможности  $p_k(t)$  такого изменения в зависимости от времени. Соответственно, ветви  $C_i^{cp}$  дерева  $T_c$  соответствуют вложенные последовательности  $\langle \tilde{Y}_{j,k}^d, p_k(T) \rangle: d_k \in C_i^{cp}$  вплоть до номера  $k$ , соответствующего висячей вершине. При заданной последовательности  $\langle \tilde{Y}_{j,k}^d, p_k(T) \rangle$  (заданной  $C_i^{cp}$ ) в зависимости от используемых ИТ (ИТ-1  $h_1$ , ИТ-2  $h_2$ ) в моменты времени  $T_n$  проверки  $s_n$  состояний на границе системы и среды ТИО вырабатываются разные предписания по выполнению мероприятий (ТИО и ТНИО) и соответственно, получают разные возможные последовательности таких состояний. Эти последовательности моделируются с использованием дерева  $T_c$  состояний системы при заданной используемой ИТ и заданной последовательности требуемых состояний среды. В заданный момент времени  $T_n$  среда может находиться в разных состояниях, соответствующих разным возможным последовательностям состояний. Вероятности нахождения среды в каждом из этих состояний для каждой из  $C_i^{cp}$  равны  $p_k(T_n)$ . При условии фиксации  $C_i^{cp}$  узлу  $d_k$  соответствует указанная вероятность и последовательность изменений  $\langle \tilde{Y}_{j,k}^d, p_k(T) \rangle$ .

Зная эти вероятности для каждой из под ветвей  $C_i^{cp}$  ведущих в висячую вершину и дерева  $T_c$ , полученные при условии, что была реализована последовательность изменения требований, соответствующая рассматриваемой вершине  $T_{cp}$  и задавшись одной ИТ,

возможно рассчитать эффекты функционирования системы при условии актуализации заданной последовательности требований и затем рассчитать эффекты для всех возможных в момент  $T_n$  последовательностей изменения требований. Для другой ИТ дерева  $T_c$  и характеристики эффектов будут другими.

Дерево  $T_c$  описывает то, какие последовательности состояний системы возможны при достижении изменяющихся по заданной  $C_i^{cp}$  последовательности целей, заданных требованиями к функционированию. В этом дереве каждому  $z$ -му узлу  $d_z$  соответствует состояние функционирования системы, описываемое вектором  $\tilde{Y}_{j,z}$  прогнозируемых характеристик эффектов функционирования системы при условии реализации функционирования системы для заданной  $C_i^{cp}$  и заданной ИТ. Ребру  $a_{pz} = (d_p, d_z)$  дерева  $T_c$  соответствует изменение вектора прогнозируемых характеристик состояний в виде функции  $f_z$ , отображающей характеристики начального состояния в характеристики конечного состояния  $f_z: Y_{j,p}(d_p) \rightarrow Y_{j,z}(d_z)$ , мера возможности  $p_z(t)$  такого изменения в зависимости от времени. Узлы  $d_z$  могут быть вложенными. Тогда задаются функции  $g_z: \{Y_{j,z,i}(d_{z,i})\} \rightarrow Y_{j,z}(d_z)$  для вложенных вершин. Ветви  $C_u^c$  дерева  $T_c$  соответствует последовательность  $\langle \tilde{Y}_{j,z}, p_z(T) \rangle: d_z \in C_u^c$ . При заданной последовательности  $\langle \tilde{Y}_{j,z}, p_z(T) \rangle$  (заданной  $C_u^c$ ) в зависимости от используемых ИТ (ИТ-1  $h_1$ , ИТ-2  $h_2$ ) в моменты времени  $T_n$  проверки  $s_n$  состояний на границе системы и среды в зависимости от проверенных ТИО состояний вырабатываются разные предписания по выполнению мероприятий (ТИО и ТНИО) и, соответственно, получают разные возможные последовательности таких состояний.

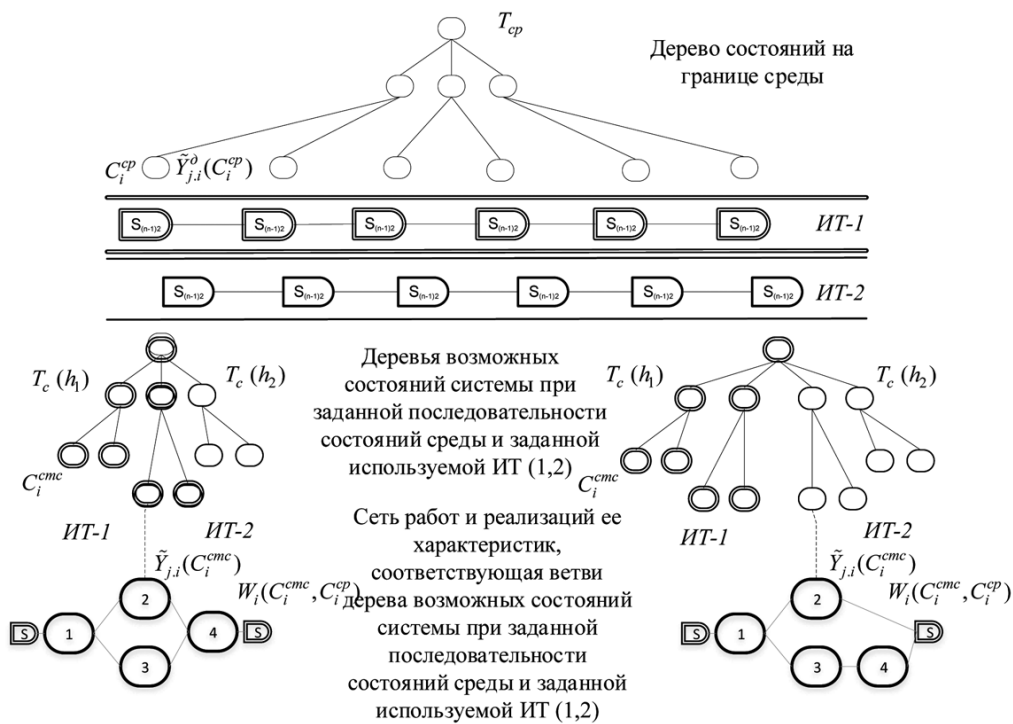


Схема формирования эффектов использования информационных технологий

В результате получают рекуррентную последовательность отображений случайных величин, ассоциированных с узлами ветви  $C_u^c$ . К окончанию расчета каждой ветви  $C_u^c$  получают вектор случайных эффектов функционирования при условии реализации состояний и событий, ассоциированных с вершинами и дугами ветви и мера возможности (вероятность) того, что все ассоциированные события реализуются. В результате возможные последовательности состояний фиксируются в виде дерева возможных состояний с заданными на нем вероятностями реализации состояний при условии реализации единственного предшествующего состояния. Полученные на  $C_u^c$  значения прогнозируемых эффектов и полученные на  $C_i^{cp}$  значения требуемых эффектов сравнивают и определяют меру возможности (например, вероятностную) соответствия требований прогнозируемым результатам. Эта мера и позволяет рассчитать показатели эффективности функционирования и потенциала системы, а затем – результативности использования ИТ.

$$W_{u,i}(C_{u,i}^c, C_i^{cp}, T_n, h_w) = \prod_{j=1,J} P(\tilde{Y}_{j,i}(C_{u,i}^c, C_i^{cp}, T_n, h_w) \leq Y_{j,i}^A(C_i^{cp}, T_n, h_w)) -$$

показатель эффективности функционирования системы при условии реализации последовательности целей, ассоциированных с  $C_i^{cp}$  и последовательности возможных состояний, ассоциированных с  $C_{u,i}^c$  в условиях использования ИТ  $h_w$ . Потенциал системы оценивается в соответствии с выражением

$$\Psi(T_{cp}(h_w)) = \sum_{C_i \in T_{cp}(h_w)} (W_i(C_i, h_w) \cdot p_i(C_i, h_w)),$$

где

$$W_i(C_i, h_w) = \sum_{C_{u,i} \in T_c(h_w)} (W_{u,i}(C_{u,i}^c, h_w) \cdot p_u(C_{u,i}^c, h_w)).$$

Результативность [8] использования ИТ  $h_w$  по сравнению с ИТ  $h_q$  оценивается выражением для расчета цифрового потенциала [9–11] экономической системы:

$$\Delta\Psi(T_{cp}(h_w, h_p)) = \Psi(T_{cp}(h_w)) - \Psi(T_{cp}(h_p)).$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты позволяют оценивать показатели потенциала экономических систем с учетом использования ИТ [12, 13] и оценивать показатели результативности использования информационных технологий [14, 15]. Это дает возможность решать существующие и перспективные задачи исследования цифровизации экономических систем, как математические задачи оценивания, анализа показателей цифрового потенциала и оптимизации по этим показателям.

### Заключение

В дальнейшем предполагается использование предложенных методологических основ аналитического оценивания результативности цифровизации для решения практических задач выбора стратегий цифровизации экономических систем различных отраслей экономики.

### Список литературы

1. Гейда А.С., Лысенко И.В. Автоматизация решения задач исследования потенциала систем и эффективности их функционирования // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 22. С. 260–281.
2. Гейда А.С., Лысенко И.В., Седлов Е.П. Методика планирования инновационной деятельности // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 301–319.
3. Гейда А.С., Лысенко И.В., Седлов Е.П. Планирование инновационной деятельности с учетом приоритетности изделий // Системы управления и информационные технологии. 2011. Т. 45. № 3–2. С. 220–224.
4. Гейда А.С., Лысенко И.В., Нехорошкин Н.И., Трмасов А.Д. Оценивание социально-экономических потенциалов для аудита отраслевых и региональных стратегий развития // Государственный аудит. Право. Экономика. 2011. № 1. С. 13–17.
5. Scott M., DeLone W., Golden W. Measuring eGovernment success: a public value approach // European Journal of Information Systems. 2016. Vol. 25 (3). P. 187–208.
6. Bayne L., Schepis D., Purchase S. A framework for understanding strategic network performance: Exploring efficiency and effectiveness at the network level // Industrial Marketing Management. 2017. Vol. 67. P. 134–147.
7. Stojic N., Hashi I., Orlic E. Creativity, innovation effectiveness and productive efficiency in the UK // European Journal of Innovation Management. 2018. P. 1460–1060.
8. Yang Z., Yong S., Hong Y. Scale, congestion, efficiency and effectiveness in e-commerce firms // Electronic Commerce Research and Applications. 2016. Vol. 20. P. 171–182.
9. Matinheikki Y., Pesonen T., Arto K., Peltokorpi A. New value creation in business networks: The role of collective action in constructing system-level goals // Industrial Marketing Management. Vol. 7. 2017. P. 122–133.
10. Shelly P., Straub D., Liang T. How Information Technology Governance Mechanisms and Strategic Alignment Influence Organizational Performance: Insights from a Matched Survey of Business and IT Managers // MIS Quarterly. 2015. Vol. 39. P. 497–518.
11. Mikalef P., Pateli A. Information technology-enabled dynamic capabilities and their indirect effect on competitive performance: Findings from PLS-SEM and fsQCA // Journal of Business Research. 2017. Vol. 70. P. 1–16.
12. Wetering V., Mikalef P., Adamantia P. A strategic alignment model for IT flexibility and dynamic capabilities: Toward an assessment tool // Twenty-Fifth European Conference on Information Systems (ECIS). Guimarães, Portugal. 2017. P. 1–17.
13. Laaksonen O., Peltoniemi M. The essence of dynamic capabilities and their measurement // International Journal of Management Reviews. British Academy of Management. 2018. Vol. 20 (2). P. 184–205.
14. Schilke O., Hu S., Helfat C. Quo vadis, dynamic capabilities? A content-analytic review of the current state of knowledge and recommendations for future research // Academy of Management Annals. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 390–439.
15. Zainal Arifin. Dynamic capability and Technology adoption: for improving Firm performance. LAP Lambert, 2017. 148 p.