

Концепция управления созданием и развитием киберфизического комплекса

В. Н. Волкова¹, А. В. Логинова², С. В. Широкова³

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия

¹ violetta-volkova@list.ru, ² alexandra-lo@yandex.ru,

³ swchirokov@mail.ru

А. Е. Леонова

АО «НИЦЭВТ»

Москва, Россия

alla.leonova@nicevt.ru

Ю. Ю. Черный

Институт научной информации по общественным наукам РАН (ИНИОН РАН)

Москва, Россия

yuri.chiorny@mail.ru

Аннотация. Предлагается концепция управления проектированием и развитием киберфизического комплекса, основанная на стратифицированной модели, обеспечивающей целостное представление процесса «выращивания» комплекса путем постепенного включения инновационных технологий и проверки устойчивости производственного процесса и организационного управления предприятием.

Ключевые слова: киберфизический комплекс; системный анализ; стратифицированная модель; технологическая инновация; управление; устойчивость

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют различные трактовки и способы реализации концепции киберфизической системы (Cyber-Physical System – CPS) [1–7 и др.]. Но при различных вариантах реализации CPS представляет собой информационно-технологическую концепцию, подразумевающую интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности любого вида.

Введенный в данной статье термин «киберфизический комплекс» подразумевает использование концепции CPS при внедрении инновационных технологий не только непосредственно в производственный процесс, но и в систему организационного управления обеспечением производственного процесса и предприятием в целом.

Это можно трактовать как новую ступень развития автоматизации производственных процессов, а также процессов управления организацией и обслуживанием процессов любого вида.

В то же время важно иметь в виду, что принципиальной особенностью этого нового этапа развития автоматизации является внедрения инновационных цифровых технологий третьей и четвертой промышленных революций, что приводит к принципиально новым особенностям функционирования создаваемых систем.

До сих пор создавались и внедрялись технологии, которые помогали бы выполнять отдельные функции. Например, обеспечивать более оперативную и качественную обработку материалов, более быстрое перемещение комплектующих и блоков изделий, большую скорость вычислений и т. п. При этом технологии не превосходили интеллект человека. А в настоящее время прогнозируется создание технологий, приближающихся к созданию искусственного интеллекта, который станет не только вести себя независимо, но и превосходить по своим возможностям естественный интеллект человека.

Прогнозируется, что при развитии производственных процессов на основе внедрения инновационных цифровых технологий создаваемые роботизированные технологические комплексы с элементами искусственного интеллекта и системы организационного управления обеспечением производства будут принимать собственные решения по корректировке производственных и организационных процессов предприятия, устранению неисправностей, замене комплектующих при необходимости и т. п. Это позволит оперативно ликвидировать непредвиденные отклонения от хода производственных процессов.

Однако возможно и нежелательное самостоятельное поведение подобных киберфизических комплексов [8]. В результате функционирование предприятия (организации) принципиально меняется, приближается к поведению живых биологических систем с активными элементами, с исследования которых начиналась общая теория систем.

Поэтому необходимо переосмыслить концепции открытой системы Л. фон Берталанфи [9], подвижного равновесия А. А. Богданова [10], принципиальной неравновесности Э. Бауэра [11]. Необходимо дальнейшее развитие на этой основе методов и моделей управления созданием киберфизических комплексов.

II. СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ СЛОЖНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Поскольку создание киберфизического комплекса в принятом понимании можно считать развитием систем автоматизации управления технологическими процессами производства и предприятием в целом, то естественно использовать накопленный опыт проектирования автоматизированных систем, соединив его с современными работами, посвященными управлению проектной деятельностью [12–15 и др.].

Большинство работ посвящено управлению проектами, включая получение заказа, планирование, управление ресурсами (финансовыми, материальными, персоналом и т. п.). В научно-исследовательских работах и нормативных документах определены циклы организации процесса проектирования – от разработки технического задания до опытной эксплуатации создаваемых изделий, а для сложных технических комплексов, включая госприемку, шеф-монтаж и авторский надзор.

В основном применяются экспертные и эвристические методы. Из формальных методов для планирования и управления ходом работ хорошо развито сетевое моделирование. Разрабатывают формализованные процедуры согласования мнений заинтересованных сторон (стейкхолдеров). Развивается исследование возможностей использования оптимизационных моделей. В некоторых работах [14] в число методов, применяемых при управлении проектами, стали включать методы, заимствованные из теории систем и системного анализа (мозговая атака, методы декомпозиции). Применяются различные принципы и признаки декомпозиции, предлагаются двумерные структуры управления [15] проектами сложных комплексов. Разработаны автоматизированные системы управления проектами.

Однако в большинстве работ исследуются проблемы управления ходом выполнения проектов с точки зрения экономических возможностей и рисков, а управление собственно процессами проектирования, создания и развития сложных технических и технико-организационных комплексов исследовано недостаточно.

Предлагается концепция управления созданием и развитием киберфизического комплекса производственного предприятия, включающая управление внедрением инновационных технологий не только непосредственно в производственный процесс, но и в систему проектирования и организационного управления предприятием в целом.

III. ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЕМ И РАЗВИТИЕМ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Традиционно подразумевается, что на основе научных исследований и опыта управления проектами можно разработать методы, с помощью которых при возникновении соответствующих проблем получать модели принятия решений, а еще лучше – рекомендации, алгоритмы, рецепты управления созданием нового сложного технического комплекса.

Однако в условиях ситуации подвижного равновесия, создаваемой инновационными технологиями, такой подход невозможен, поскольку при внедрении цифровых технологий, создании киберфизического комплекса функционирование предприятия меняется, приближается к поведению живых биологических систем с активными элементами, к состоянию подвижного равновесия.

Теоретической основой подвижного равновесия является предложенная Л. фон Берталанди закономерность, которая в открытых системах с активными элементами противостоит второму закону термодинамики, распространенному физиками на все системы. Характеристикой подвижного равновесия являются не традиционные координаты пространства и времени (как в ситуациях динамического равновесия), а состояние системы, характеризующееся соотношением энтропийных (разрушающих систему) тенденций и негэнтропийных (развивающих систему) тенденций, что и обеспечивают инновационные технологии.

При этом негэнтропийные процессы, инновации, обеспечивая развитие, приводят к нестабильности, могут разрушать систему («креативное разрушение» по В. Зомбарту и Й. Шумпетеру [16] или «подрывные инновации» по Кристенсену [17]), а энтропийные тенденции, напротив, стабилизируют состояние системы, поскольку минимальное энергетическое состояние, к которому они приводят – самое устойчивое.

Поэтому внедрение новых технологий предлагается проводить последовательно, проверяя сохранение устойчивости функционирования производственных и организационных процессов предприятия. Это особенно важно при внедрении инновационных цифровых технологий, поскольку помимо просчитанного эффекта от их внедрения, они могут проявлять собственные инициативы, т. е. создавать негэнтропийные тенденции.

При исследовании состоянии подвижного равновесия устойчивости КФК важно учитывать закономерности теории систем [18], позволяющие оценивать степень проявления энтропийных и негэнтропийных тенденций в системе.

Можно считать, что в реальных условиях при изобретении технологий, помогающих во взаимодействии с природной средой, а особенно с искусственно создаваемой средой, человек всегда жил в условиях подвижного равновесия. Однако эти изменения происходили не так быстро, и после определенного периода адаптации создавались некоторые алгоритмы поведения с принятыми формализованными правилами, обеспечивающими достаточную стабильность производственных процессов и организационного управления предприятием.

Таким образом, исследования особенностей функционирования систем в условиях подвижного равновесия, проводимые А. А. Богдановым, Л. фон Берталанди и их последователями, показали, что для таких систем характерны нестабильность поведения, что приводит к моделям с большой неопределенностью. Такие

системы нельзя «собрать» так, как технические устройства. Их нужно «выращивать», развивать, корректировать, контролируя устойчивость, влияя на этот процесс с помощью *управляющих воздействий*.

Для этого нужно разрабатывать модели, и на их основе вырабатывать некоторые рекомендации, корректирующие и направляющие поведение таких объектов.

Таким образом, предлагается концепция управления развитием киберфизического комплекса, основанная на постепенном включении инновационных технологий и проверке устойчивости производственного процесса и организационного управления предприятием.

При этом предлагается развитие киберфизического комплекса производственного предприятия, включая не только создание собственно робототехнических производственных комплексов, но и систему управления обеспечением производственных процессов и организационного управления предприятием. Это позволяет обеспечить целостное представление процесса «выращивания» комплекса и эффект эмерджентности, т. е. появление нового качества функционирования предприятия.

Для реализации предлагаемой концепции управления «выращиванием» КФК необходимо также создание информационной среды, которая обеспечивала бы взаимосвязи между компонентами системы, высокотехнологичными рабочими местами и доступ к информации лиц, использующих её на соответствующих этапах жизненного цикла. Основой такой среды может быть интеллектуальная система типа предлагаемой в [19]. Развитие системы следует включить в функции соответствующего подразделения, занимающегося организацией стратегического развития предприятия (организации).

IV. МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЕМ И РАЗВИТИЕМ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Для реализации концепции нужно разрабатывать модели и на их основе вырабатывать некоторые рекомендации, корректирующие и направляющие создание и развитие КФК. При этом не всегда удастся получить строго формальные модели. Могут быть и описательные или объяснительные модели, основанные на предшествующем опыте, помогающие понять ситуацию и выработать управляющие воздействия.

Заимствование алгоритмов и использование аналогий не помогут. Необходимо принимать нестандартные собственные решения, устраняя возникающую неопределенность, неустойчивость функционирования.

Для обеспечения целостного представления процесса «выращивания» киберфизического комплекса хорошей основой является стратифицированная структура, предложенная Ю. И. Черняком [20]. Один и тот же объект на разных этапах его рассмотрения может быть представлен в различных аспектах, и соответственно одна и та же система существует на разных уровнях (рис. 1):

философском (теоретико-познавательном, концептуальном), научно-исследовательском, проектном, конструкторском, технологическом – до материального воплощения, реализации, т. е. систему необходимо представлять в форме моделей разного рода (на разных «языках» – формальные модели выбранной научной теории, конструкторские чертежи, технологическая документация, макет и т. п.), помогающих постепенно глубже понять и раскрыть замысел системы.

Система

Строта 1. Концептуальное описание системы
Строта 2. Научное исследование и разработка модели
Строта 3. Проектное представление Проект системы
Строта 4. Конструкция (конструкторская документация)
Строта 5. Технология (технологическая документация)
Строта 6. Материальное воплощение / реализация системы

Рис. 1. Стратифицированная модель

На научно-исследовательском уровне наиболее распространенными моделями являются графы. В настоящее время развиваются методы объектно-ориентированного моделирования на основе формирования гибридных или сложных динамических систем, представляющих собой иерархические, событийно-управляемые системы переменной структуры.

Формально ориентированный граф (гибридный автомат) можно задать, например, следующим образом [21]:

$$H = \{G, V, C, P, A, F, t\},$$

где $G = \{S, s_0, E\}$ – ориентированный граф, вершины которого сопоставлены элементам множества дискретных состояний автомата $S = \{s_i \mid i=1 \dots m\}$, а дуги – возможным переходам автомата из одного состояния в другое $E: S \rightarrow S$; $V = \{V_c, V_d\}$ – множество переменных; $C = \{c_i : (t, V) \rightarrow V_c \mid i=1 \dots k_c\}$ – множество непрерывных отображений; $P = \{p_i(t, V) \in B \mid i=1 \dots k_p\}$ – множество логических предикатов; $A = \{c_i : (t, V) \rightarrow V \mid t=1 \dots k_a\}$ – множество мгновенных действий; $F = \{F_c, F_p, F_a\}$, где $F_c: C \rightarrow S$ – отображение, сопоставляющее множество непрерывных отображений множеству состояний (вершин графа), $F_p: P \rightarrow E$ отображение, сопоставляющее множество предикатов множеству переходов (дуг графа), $F_a: A \rightarrow E$ – отображение, сопоставляющее множество мгновенных действий множеству переходов (дуг графа).

При создании сложных изделий путь от замысла до реализации может представлять собой не однонаправленный, а сложный граф с ответвлениями на заказ или приобретение по тендерам комплектующих, распределения работ с учетом специализации и кооперирования не только подразделений, но и по другим

предприятиям. При этом каждый этап можно также структурировать, определяя подэтапы от организации исследований до обеспечения подэтапов проектирования, программирования и т. п.

Каждый этап стратифицированной модели рис. 1 – сложный процесс, для реализации которого требуются различные способы представления результатов, разные модели, временные затраты, кадры разной квалификации.

В частности, конструкторско-технологическая деятельность поддерживается многоуровневой системой чертежей разного вида (общие блок-схемы, принципиальные схемы, проекции изделий и т. п.) и соответствующей нормативно-технической документацией. Существуют специализированные автоматизированные системы, обеспечивающие конструкторско-технологическую деятельность.

На каждой страте нужно учесть требуемые ресурсы: F – финансовые затраты; MT – материально-технические ресурсы; N – кадровое обеспечение; T – время, отведенное для выполнения работы и т. п.

Для учета этих и других критериев и факторов можно с помощью двумерной, как предлагается в [13], или трехмерной структуры [22]:

$$S = \langle AL, St, VP \rangle,$$

где AL (Abstract Level) – уровень абстрагирования, определяет последовательное преобразование представлений о системе в процессе проектирования – от замысла (концепции) до материального воплощения, реализации проекта (рис. 1); St (Stage) – этапы проектирования, полученные на основе структуризации процесса управления, которые на разных стратах рис. 1 могут быть различными, и при их определении могут быть применены разные методики, базирующиеся на различных концепциях системы [23]; VP (Variety of Provided) – виды обеспечения (финансовое, материально-техническое, информационное, кадровое и т. п.).

Важной составляющей предлагаемой концепции является автоматизация информационного сопровождения на всех этапах жизненного цикла производства и организационного управления предприятием на основе создания информационно-управляющего комплекса (ИУК). При разработке структуры такого комплекса полезно использовать концепцию архитектуры предприятия и идеологию PLM-систем. Для помощи в принятии решений следует предусмотреть возможность включения в такой ИУК моделей, помогающих в принятии решений по анализу и выбору инноваций.

Оценка сохранения устойчивости КФК на каждом шаге внедрения новых технологий требует дополнительных исследований. Существующие методы оценки устойчивости, разработанные в теории автоматического управления, требуются дополнить исследованиями закономерностей открытых систем, основанных на идеях Л. фон Берталанфи [9], А. Холла [24], и введением количественных оценок, базирующихся на информационной теории А. А. Денисова [25–27].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования особенностей производственных систем, возникающих при внедрении инновационных технологий, предложена концепция управления проектированием и развитием киберфизического комплекса предприятия, основанная на стратифицированной модели, обеспечивающей целостное представление процесса «выращивания» комплекса путем постепенного включения инновационных технологий и проверки устойчивости производственного процесса и организационного управления предприятием.

Важной составляющей предлагаемой концепции является информационное сопровождение на всех этапах жизненного цикла производства и организационного управления предприятием на основе создания автоматизированного информационно-управляющего комплекса, при разработке которого также используются инновационные технологии в форме интеллектуальных систем представления и накопления знаний о развиваемом киберфизическом комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lee E.A., Seshia S.A. "Introduction to Embedded Systems, Cyber-Physical Systems Approach", <http://LeeSeshia.org>, ISBN 978-0-557-70857-4, 2011.
- [2] Colombo A., Bangemann T. Industrial Cloud-based Cyber-physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Cham Springer International Publishing, 2014.
- [3] Vasiljev Y.S., Volkova V.N., Kozlov V.N. The Concept of an Open Cyber-Physical System. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2020.
- [4] Vyatkin V. IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: State-of-the-art review // IEEE Transaction on Industrial Informatics, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 768–781.
- [5] Karpov V.I., Leonova A.E., Loginova A.V., Romanova E.V. Concept of engineering as a basis for development cyber-physical system. // CEUR Workshop Proceedings. Selected Papers of the 22nd International Conference "Enterprise Engineering and Knowledge Management", EEKM-2019, 2019. Pp. 180–190.
- [6] Volkova V., Leonova A., Loginova A., Chernyy Y. System analysis of the development of information-communication technologies. / Nordmann, A., Mocozet, L., Volkova, V., Shipunova, O. [eds.]. // CSIS'2019: XI Intern. Scientific Conf. Communicative Strategies of the Information Society, St. Petersburg, Russian Federation, October, 2019 / ACM International Conference Proceeding Series, pp. 1-6, ACM, New York 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3373722.3373765>.
- [7] Pankratova N.D. Creation of the Physical Model for Cyber-Physical Systems // Cyber-Physical Systems and Control. Lecture Notes in Networks and Systems. Series Volume 95 / Springer International Publishing. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-34983-7. P.68-77.
- [8] Шваб К. Четвертая промышленная революция: перевод с англ. М.: Изд-во «Э», 2017. 208 с.
- [9] Bertalanffy L. von. General System Theory. Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller, 1968. (Publ. 1, FRG, 1945).
- [10] Богданов А.А. Всеобщая организационная наука: Тектология. В 2-х кн. Берлин – Санкт-Петербург, 1903–1922. (Переиздание: В 2-х кн.) М.: «Экономика», 1989.
- [11] Бауэр Э.С. Теоретическая биология. СПб.: Росток, 2002. 351 с.
- [12] Управление проектами / И.И. Мазур [и др.] / Под общ. ред. И.И. Мазура и В.Д. Шапиро. М.: Омега-Л. 2010, 960 с.
- [13] Управление проектами. Основы проектного управления / Под ред. проф. М.Л. Разу. М.: КНОРУС, 2011. 768 с.

- [14] Ильин И.В., Широкова С.В., Левина А.И. Управление проектами в сложных социально-экономических системах. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. 312 с.
- [15] Троцкий М., Груча Б., Огонек К. Управление проектами. М.: Финансы и статистика, 2006. 304 с.
- [16] Schumpeter J.A. Capitalism, Socialism and Democracy, 1946.
- [17] Кристенсен К. Дилемма инноватора: Как из-за новых технологий погибают сильные компании. М.: Изд-во: Альпина Бизнес Букс, 2004.
- [18] Volkova, V.N., Chernyi, Y.Y Application of Systems Theory Laws for Investigating Information Security Problem // Automatic Control and Computer Sciences, 2018, Vol. 52, No. 8. Pp. 1164–1170.
- [19] Кузин Е.С. Представление знаний и решение информационно-сложных задач в компьютерных системах: монография. М.: Новые технологии, 2004. 32 с.
- [20] Черняк Ю.И. Информация и управление. М.: Наука, 1974. 184 с.
- [21] Henzinger, T.A. The Theory of Hybrid Automata // Eleventh Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science, July 1996. Pp. 278–292.
- [22] Волкова В.Н., Микеладзе Б.Д. Модели для разработки системы управления инновационным проектом многофункционального комплекса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 5 (157). С. 55–58.
- [23] Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высшая школа. 2014. 616 с.
- [24] Hall A.D, Fagen R.E. Definition of System // General Systems, vol. 1. 1956. Pp. 18–28.
- [25] Денисов А.А. Современные проблемы системного анализа: учебник. СПб.: 3-е изд. Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 304 с.
- [26] Volkova V.N., Kudryavtseva A.S., Loginova A.V., Chernyy Y.Y., Leonova A.E. System analysis of innovative technologies of industrial revolutions // Proceedings of the Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO), 4–7 July 2018, St. Petersburg, Russia, 2018. / IEEE Inc., New York. 2018. Pp. 57–61. DOI: <https://doi.org/10.1109/ERGO.2018.8443813>.
- [27] Taresenko F., Kozlov V., Volkova V., Kudryavtseva A. On future development of the control theory of automated complexes in the information-communication technologies implementation / Nordmann, A., Moccozet, L., Volkova, V., Shipunova, O. [eds.]. // CSIS'2019: XI Intern. Scientific Conf. Communicative Strategies of the Information Society, St. Petersburg, Russian Federation, October, 2019 / ACM International Conference Proceeding Series, pp. 1–6, ACM, New York. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3373722.3373772>.