

СИСТЕМНО-КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.В. Алексеев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3,
E-mail: 17151@bk.ru

М.Ю. Охтилев, С.В. Микони, Б.В. Соколов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский Центр РАН
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39
E-mail: oxt@mail.ru, smikoni@mail.ru, sokolov_boris@inbox.ru

Ключевые слова: сложный технический объект, цифровая модель, цифровой двойник, киберфизическая система, квалиметрия моделей и полимодельных комплексов, проактивное управление структурной динамикой.

Аннотация: В статье показано как на основе системно-кибернетической интерпретации процессов создания и использования цифровых двойников (ЦД) сложных технических объектов (СТО) как процессов проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой соответствующей развивающейся ситуацией, можно соответствующие задачи анализа и синтеза ЦД описывать в терминах теории управления. При таком подходе данные задачи формально описываются и решаются в рамках трех базовых задач квалиметрии моделей и ПМК: задачи анализа проактивного управления структурной динамикой РС, задачи наблюдения за управляемой структурной динамикой РС, задачи проактивного управления структурной динамикой РС. Приводятся сведения о практической реализации разработанного системно-кибернетического подхода к описанию и использованию ЦД СТО, базирующего на фундаментальных и прикладных результатах, полученных к настоящему времени в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов.

1. Введение

В настоящее время главным ресурсом ускоренного развития современного информационного общества становятся знания, главным механизмом развития – цифровая экономика, основанная на знаниях. Главными технологиями цифровой экономики становятся новые информационные, интеллектуальные и коммуникационные технологии, которые уже фактически являются технологиями общего назначения также как технологии производства тепла и электроэнергии. Главной компонентой цифрового производства и в целом цифровой экономики становятся разнообразные классы киберфизических систем (КФС), являющиеся неотъемлемой частью существующих и перспективных сложных технических объектов (СТО) [1-5]. КФС отличаются от широко используемых в СТО мехатронно-электронных и встроенных систем тем, что в них, в общем случае, одновременно

реализуются почти все функции управления СТО (а также самоуправления), в т.ч. функции обработки и анализа данных и информации, оперативного управления, а также телекоммуникационного взаимодействия с другими КФС, СТО и внешней средой.

Необходимо подчеркнуть, что при создании и использовании КФС и СТО ключевым фактором были и остаются их модели, а также методы и алгоритмы, обеспечивающие эффективное функционирование рассматриваемых систем и объектов. При этом для того, чтобы достигались цели управления СТО необходимо, чтобы модели как СТО, так и КФС в наибольшей степени соответствовали их реальным прообразам [1-2]. Для конструктивного соотнесения объектов-оригиналов и моделей в 2011 г. профессором Мичиганского университета Майклом Гривсом был введен термин цифровой двойник (ЦД) изделия (объекта), под которым понимается система, состоящая из цифровой модели (ЦМ) изделия (объекта), а также двусторонних информационных связей (ИнС) с изделием (объектом) и/или его составными частями [1]. Наличие постоянных двухсторонних ИнС между объектом-оригиналом (в нашем случае физическим СТО) и его моделью (в общем случае, моделями, полимодельными комплексами (ПМК)) позволяет в динамике оценивать степень адекватности ЦМ, а также проводить верификацию, валидацию ЦМ и в целом ЦД вместе с их последующей параметрической и структурной адаптацией.

В работе [4] указывается, что уже в 2020 г. поисковая система Google выдавала более миллиона ссылок по запросу «Digital Twin», и среди этих ссылок можно было обнаружить сотни статей, где приводится трактовка понятия ЦД, примеры их построения и использования. Однако, к сожалению, в настоящее время встречается мало исследований, посвященных теоретическим основам создания ЦМ и организации их последующего взаимодействия с объектом-оригиналом (ОБО), в качестве которого мы рассматриваем произвольный СТО. Основная цель данной статьи - предложить системно-кибернетическое описание процессов создания и использования ЦД, базируясь фундаментальных и прикладных результатах, полученных в рамках развиваемой теории оценивания и многокритериального выбора наиболее предпочтительных моделей, которая была названа квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [6].

2. Системно-кибернетическое описание процессов создания и использования ЦД

Анализ вышеизложенного показывает, что при построении и использовании ЦД для различных классов СТО целесообразно выделять следующие основные элементы и отношения, характеризующие данный процесс: во-первых, субъекта либо субъектов ($S_{<>}^m$), объект-оригинал ($Ob_{<>}^{op}$), объект-модель (ЦМ) ($Ob_{<>}^m$), среду ($CP_{<>}^m$) (в которой осуществляется взаимодействие ЦМ, СТО, субъектов); и, во-вторых, бинарные отношения между перечисленными элементами $R_{<1>}(Ob_{<>}^{op}, S_{<>}^m)$; $R_{<2>}(S_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$; $R_{<3>}(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$; $R_{<4>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^{op})$; $R_{<5>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$; $R_{<6>}(CP_{<>}^m, S_{<>}^m)$. Конкретные нижние индексы $<>$ в перечисленных условных обозначениях будут означать собственные имена объектов (субъектов) и отношений [5]. Сразу же отметим, что, говоря в дальнейшем о субъектах моделирования, мы будем под этим термином понимать, различные классы социальных субъектов, к числу которых могут быть отнесены: лица, принимающие решения (ЛПР), лица, обосновывающие решения (ЛОР), эксперты, лица, эксплуатирующие (использующие) СТО и их ЦД, лица, строящие

модели (обеспечивающие построение моделей). На рис. 1. представлен возможный вариант взаимосвязи перечисленных элементов и отношений между ними [5-6].

Из анализа рис. 1 следует, что процесс создания и использования ЦД, определяется процессами взаимодействия субъектов, объекта-оригинала, объекта-модели, среды, которые конструктивно задаются с помощью бинарных отношений между перечисленными элементами $R_{<1>} (,)$; $R_{<2>} (,)$; $R_{<3>} (,)$; $R_{<4>} (,)$; $R_{<5>} (,)$; $R_{<6>} (,)$. Данное описание обобщает ранее предложенные в рамках стандартных определений ЦД технологии взаимодействия объекта-оригинала ($Ob_{<>}^{op}$) с объектом-моделью (ЦМ) ($Ob_{<>}^m$), конкретизирующие отношения вида $R_{<3>}(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$. Становится ясно, что этих описаний явно недостаточно для целостного понимания процессов, происходящих в контексте взаимодействия указанной четверки. При этом важно отметить, что все перечисленные элементы и отношения под действием объективных-субъективных, внешних-внутренних причин постоянно изменяются во времени. В этом случае мгновенно зафиксированное структурное состояние рассматриваемой четверки назовем ситуацией, а ее изменение во времени – развивающейся ситуацией (РС).

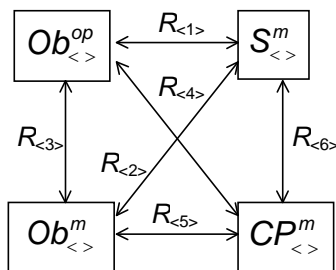


Рис. 1. Варианты взаимосвязи объектов и субъектов моделирования развивающейся ситуации.

При таком описании процессы создания и использования ЦД на различных этапах жизненного цикла (ЖЦ) СТО можно интерпретировать как *управляемые процессы* (как *управление структурной динамикой развивающейся ситуацией (РС)*). Цель такого процесса состоит в постоянном минимизации субъектом (либо автоматом его заменяющим) “невязки”, возникающей между объектом-оригиналом и его ЦМ на всех этапах их ЖЦ путем постоянной “подстройки” (адаптации) модели под изменения, происходящие как в $Ob_{<>}^{op}$, $CP_{<>}^m$, так и $S_{<>}^m$ (например, изменение субъектом целей функционирования и моделирования $Ob_{<>}^{op}$). Представленная трактовка процесса разработки и использования ЦД СТО в контексте РС является весьма перспективной. Такой подход позволяет использовать достаточно хорошо разработанный аппарат теории анализа и синтеза СТО и их систем управления применительно к таким объектам как модели и ПМК, а также в целом, к развивающейся ситуации. Данный процесс (технология) графически представлен на рис. 2. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 – формирование субъектом $S_{<>}^m$ целей создания (функционирования) объекта оригинала $Ob_{<>}^{op}$; 2 – формирование входных воздействий (сценариев управляющих и возмущающих воздействий) на объект-оригинал (реальный, либо виртуальный); 3 – формирование субъектом $S_{<>}^m$ целей моделирования РС; 4 – моделируемая система (объект $Ob_{<>}^{op}$); 5 – ЦМ (ПМК) ($Ob_{<>}^m$) исследуемого СТО; 6 – оценивание показателей качества ЦМ (ПМК); 7 – управление качеством ЦМ (ПМК); 8 – управление параметрами ЦМ (ПМК); 9 – управление структурами ЦМ (ПМК); 10 – изменение концепции описания моделей (ПМК), состоящее в изменении границ между объектом-оригиналом и воздействующей на него средой.

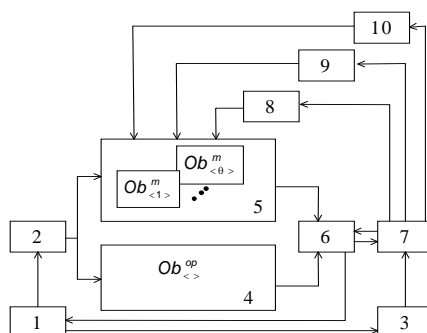


Рис. 2. Обобщённая технология моделирования развивающейся ситуации при ее управленческой интерпретации.

Из анализа рисунка следует, что моделирование РС можно интерпретировать как управляемый процесс, состоящий в управлении качеством соответствующих ЦМ (полимодельных комплексов) и самой технологии создания и использования ЦД при решении широкого спектра прикладных задач, связанных с проектированием и применением СТО. Проведем формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза ЦД СТО как проблемы проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой соответствующей развивающейся ситуации.

Формулировка и формальное описание решаемой проблемы синтеза ЦД СТО состоят в следующем: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, программное обеспечение, позволяющие синтезировать такие технологии и программы проактивного управления конфигурацией и реконфигурацией ЦД СТО с использованием и без использования средств КФС, а также управления реализацией указанных программ $\langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle$, при которых выполняются следующие условия:

$$J_\theta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f) \right) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \in \Delta_g}{extr},$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_\delta^{*t_f} \rangle \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g \right\},$$

$$U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \delta, \delta \rangle}^{t_2}; \chi \in \mathbf{B}$$

где χ – индекс, характеризующий различные типы структур СТО, КФС, ЦД, $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО}\}$ – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной и технической структурам, структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), $t \in T$ – множество моментов времени; $X_\chi^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного мультиграфа G_χ^t ; $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг мультиграфа типа G_χ^t , описывающих рассматриваемую РС и отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_\chi^t = \{z_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов мультиграфа. $F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t$ – отображения различных структур СТО, КФС, ЦД друг на друга в момент времени t , $\Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t$ – операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t ; U^t – проактивные управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры СТО, КФС, ЦД, так и процессы целенаправленного изменения их структурной динамики; J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования как СТО, КФС, так и их ЦД, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ – множество номеров показателей; Δ_g – множество

динамических альтернатив (множество структур и параметров СТО, КФС, ЦД, а также множество программ проактивного управления их структурной динамикой); \mathbf{B} – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих реализацию вычислительных процессов, описывающих проактивное управление структурной динамикой СТО, КФС, ЦД; \tilde{R}_g – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются технологии и программы проактивного управления структурной динамикой СТО, КФС, ЦД.

Представленное формальное описание проблемы создания и использования за счет системно-кибернетической интерпретации позволяет данную проблему решить на основе фундаментальных и прикладных результатов, полученных в междисциплинарной отрасли системных знаний, и, прежде всего, в рамках таких ее направлений как системология, теория управления, информатика и инженерия знаний (искусственный интеллект). В ранее выполненных исследованиях [5-7] было показано, как используя данные результаты и знания, можно на конструктивной основе обеспечивать полноту, замкнутость и непротиворечивость результатов, связанных с многокритериальным структурно-функциональным синтезом ЦД СТО.

3. Заключение

На основе системно-кибернетической интерпретации процессов создания и использования ЦД СТО как процессов проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой соответствующей РС можно соответствующие задачи комплексного моделирования СТО с использованием ЦМ описывать в терминах теории управления. При таком подходе существующие и перспективные задачи анализа и синтеза ЦД СТО и его ЦМ описываются в терминах трех базовых задач квалиметрии моделей и ПМК: задачи анализа проактивного управления структурной динамикой РС, задачи наблюдения за управляемой структурной динамикой РС, задачи проактивного управления структурной динамикой РС. В работе [6] и в последующих исследованиях, результаты, которых представлены на сайте [7], приведены конкретные примеры использования разработанного системно-кибернетического и квалиметрического подходов к описанию и использованию ЦД СТО в ракетно-космической, производственной, транспортно-технической сферах. Исследования проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

Список литературы

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // White Paper. 2014. Vol. 1. P. 1-7.
2. Национальный стандарт Российской Федерации Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники. Основные положения. 2021. 17 с.
3. Серугендо Д.Д., Каттинг-Десель А.Ф., Гиз Л., Корменье Т., Хан И., Хоссенлоп Л. Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации. [Электронный ресурс] / <https://www.osp.ru/os/2022/04/13056597> (дата обращения 12.04.2023).
4. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое / научн. ред. А. Боровиков. М.: АльянсПринт, 2020. 401 с.
5. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
7. <http://litsam.ru> (дата обращения 26.12.2023)