

СИСТЕМНО-УПРАВЛЕНЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

**А.В. Алексеев, В.В. Захаров, М.Ю. Охтилев, П.А. Охтилев, Б.В. Соколов
(Санкт-Петербург)**

Актуальность

Актуальность тематики доклада определяется тем, что современный этап научно-технического развития РФ, связанный с формированием цифровой экономики и характеризующийся существенным возрастанием сложности создаваемых и эксплуатируемых социально-экономических и технико-технологических объектов требует их системного рассмотрения и исследования как сложных объектов (СЛО), представленных разнотипными и разнообразными организационно-техническими полиструктурами, цели и задачи функционирования которых реализуются в конкретных изделиях (Изд) и продукции [1–3].

В таких СЛО и Изд циркулируют сверхбольшие объемы данных, информации и знаний различной природы, которые образуют их информационное обеспечение (ИО), размещенное в территориально распределенных узлах [4, 5]. При этом, к сожалению, в большинстве случаев данное ИО не образует единую сквозную и замкнутую технологическую цепочку поддержки и управления жизненным циклом (ЖЦ) изделий, поскольку решаемые задачи автоматизированы фрагментарно, а их результаты часто не согласованы. Совокупность указанных факторов ведет к слабо прогнозируемому уровню качества получаемых организациями результатов деятельности и его потенциальному снижению. В связи с этим возникает необходимость развития более совершенных технологий, обеспечивающих комплексный учет информационных аспектов функционирования СЛО на всех этапах их жизненного цикла (ЖЦ) с целью повышения эффективности и обоснованности принимаемых решений по управлению и, как следствие, повышения качества и надежности Изд в условиях ограниченных ресурсов.

Необходимо отметить, что сейчас главной компонентой цифрового производства и в целом цифровой экономики становятся разнообразные классы киберфизических систем (КФС), являющиеся неотъемлемой частью существующих и перспективных СЛО и лежащих в основе создания соответствующих цифровых двойников (ЦД) указанных объектов [6–10]. КФС отличаются от широко используемых в СЛО мехатронно-электронных и встроенных систем тем, что в них, в общем случае, одновременно реализуются почти все функции управления СЛО (а также самоуправления), в т.ч. функции обработки и анализа данных и информации, оперативного управления, а также телекоммуникационного взаимодействия с другими КФС, СЛО и внешней средой. Для простоты и компактности изложения дальнейшего материала говоря об СЛО мы предполагаем наличие в их составе КФС, с помощью которых будет организовываться двухсторонняя связь ЦД с СЛО в рамках конкретной системы проактивного управления ими [11]. В дальнейшем говоря о ЦД, будем руководствоваться его определением, данным в ГОСТ Р 57700.37-2021, согласно которому ЦД – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [9].

Следует подчеркнуть, что при создании и использовании КФС СЛО и их ЦД ключевым фактором были и остаются их модели, а также методы и алгоритмы, обеспечивающие эффективное функционирование рассматриваемых систем и объектов на различных этапах их ЖЦ. При этом для того, чтобы достигались цели управления СЛО, необходимо, чтобы модели, методы и алгоритмы управления (далее будем их называть модельно-алгоритмическим обеспечением управления (МАОУ)) как СЛО, так и КФС в наибольшей степени соответствовали их реальным прообразам [6–8].

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 СЛО. Основная цель данного доклада – предложить системно-управленческое описание процессов создания и использования ЦД, базируясь на фундаментальных и прикладных результатах, полученных в рамках развиваемой теории оценивания и многокритериального выбора наиболее предпочтительных моделей, которая была названа квалиметрией моделей и полимодельных комплексов [12].

Системно-управленческое описание процессов создания и использования ЦД сложных объектов

Анализ вышеизложенного показывает, что при построении и использовании ЦД для различных классов СЛО 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, СЛО, 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 [7]. 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) СЛО и их ЦД, лица, строящие модели (обеспечивающие построение моделей).

На рис. 1. представлен возможный вариант взаимосвязи перечисленных элементов и отношений между ними [11, 12].

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).

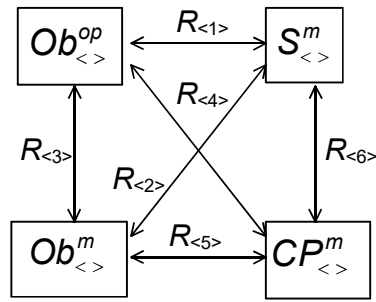


Рис. 1. Варианты взаимосвязи объектов и субъектов моделирования развивающейся ситуации

При таком описании процессы создания и использования ЦД на различных этапах жизненного цикла (ЖЦ) СлО можно интерпретировать как проактивные *управляемые процессы* (как проактивное *управление структурной динамикой развивающейся ситуацией (РС)*) [11, 12]. Цель такого процесса состоит в постоянной 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 СлО в контексте *РС* является весьма перспективной. Такой подход позволяет использовать достаточно хорошо разработанный аппарат теории анализа и синтеза СлО и их систем управления применительно к таким объектам, как модели и полимодельные комплексы (ПМК), а также в целом к *РС*. 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) ($Ob_{<\theta>}^m$) исследуемого СлО; 6 – оценивание показателей качества ЦМ (ПМК); 7 – проактивное управление качеством ЦМ (ПМК); 8 – проактивное управление параметрами ЦМ (ПМК); 9 – проактивное управление структурами ЦМ (ПМК); 10 – изменение концепции описания моделей (ПМК), состоящее в изменении границ между объектом-оригиналом и воздействующей на него средой.

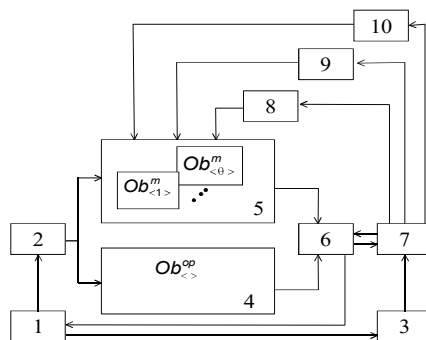


Рис. 2. Обобщённая технология моделирования развивающейся ситуацией при ее управленческой интерпретации

Из анализа рисунка следует, что моделирование РС можно интерпретировать как проактивный 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 СЛО. Проведем формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза ЦД СЛО как проблемы проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой соответствующей развивающейся ситуации.

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

$$\begin{aligned} J_\theta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi, \chi'>}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f] \right) &\rightarrow \underset{<U^t, S_\delta^{*t_f}> \in \Delta_g}{extr}, \\ \Delta_g = \left\{ <U^t, S_\delta^{*t_f}> \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{<\chi, \chi'>}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \right. \\ &\left. U^t = \Pi_{<\delta_1, \delta_2>}^{t_1} \circ \Pi_{<\delta_2, \delta_3>}^{t_2} \Pi_{<\tilde{\delta}, \tilde{\delta}>}^{t_2}; \chi \in B \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где χ – индекс, характеризующий различные типы структур СЛО, 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 ; $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг мультиграфа типа G_χ^t , описывающих рассматриваемую РС и отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_\chi^t = \{z_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов мультиграфа. $F_{<\chi, \chi'>}^t$ – отображения различных структур СЛО, КФС, ЦД друг на друга в момент времени t , $\Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t$ – операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t ; U^t – проактивные управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуры СЛО, КФС, ЦД, так и процессы целенаправленного изменения их структурной динамики; J_θ – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования как СЛО, КФС, так и их ЦД, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ – множество номеров показателей; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров СЛО, КФС, ЦД, а также множество программ проактивного управления их структурной динамикой); B – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих реализацию вычислительных процессов, описывающих проактивное управления структурной динамикой СЛО, КФС, ЦД; $\tilde{R}_g$ – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются технологии и программы проактивного управления структурной динамикой СЛО, КФС, ЦД.

Ранее уже указывалось, что на практике из-за высокой структурной динамики как самих СЛО, так и соответствующих систем управления ими, приходится постоянно подстраивать (подбирать, адаптировать) существующие модели, описывающие

перечисленные системы, к изменяющейся обстановке. В данном случае речь идёт уже о системе проактивного управления (СПУ) как СлО, так и его ЦД. К сожалению, данные процедуры адаптации моделей (в более общем случае – полимодельных комплексов) носят эвристический характер. В связи со сказанным, в предлагаемой статье, базируясь на предыдущих исследованиях по данной тематике [7-9], разработан математический аппарат, позволяющий формально описывать и решать задачи параметрической и структурной адаптации моделей и полимодельных комплексов, лежащих в основе ЦД СлО и используемых СПУ СлО и его ЦД. Для этого необходимо провести формальное описание (в данном случае теоретико-множественное описание) исследуемых процессов проактивного управления [11].

$$H^{<t,w>} : M^{<t,w>} \times W^{<t,w>} \times N^{<t,w>} \rightarrow M^{<t,w>} \\ W^{<t>} = W_1^{<t>} \times W_2^{<t>} \times W_3^{<t>}$$

где $M^{<t,w>}$ – множество моделей (полимодельных комплексов), описывающих процессы функционирования СПУ СлО и его ЦД, $W^{<t>}$ – множество параметров, настраиваемых внешним и внутренним адаптерами имитационной системы (ИмС) [7, 8, 13], с использованием которой осуществляется поиск как оптимальных технологий, так программ управления СлО и его ЦД. Данное множество строится на декартовом произведении трех других множеств: $W_1^{<t>}$ – множество параметров моделей СПУ СлО и его ЦД, настраиваемых внутренним адаптером ИмС; $W_2^{<t>}$ – множество параметров моделей СПУ СлО и его ЦД, настраиваемых внешним адаптером ИмС; $W_3^{<t>}$ – множество параметров, настраиваемых указанным адаптерами при структурной адаптации моделей; $N^{<t,w>}$ – множество наиболее существенных атрибутов (признаков) характеризующих состояние реальных СПУ СлО и используемых при оценивании степени адекватности разрабатываемых и используемых в ЦД моделей; $H^{<t,w>}$ – оператор (в частном случае – отображение) итеративного конструирования (синтеза, выбора) моделей, описывающих СПУ СлО и его ЦД и их проактивно-управляемую структурную динамику.

С учетом вышеизложенного, теоретико-множественное описание исследуемой в докладе проблемы, описанное ранее (см. формулу 1), можно модифицировать следующим образом: необходимо разработать и реализовать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение (Про) многокритериального синтеза технологий и программ проактивного управления СПУ СлО и его ЦД, а также соответствующее методическое обеспечение параметрической и структурной адаптации созданных моделей, полимодельных комплексов и Про с использованием которых должен быть решен следующий комплекс научно-технических задач:

Задачи I класса (задачи параметрической и структурной адаптации моделей проактивного управления ЦД СПУ СлО).

$$I_{\tilde{\alpha}}^{<t,w>} \left(J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}, J_{\tilde{\beta}}^{<t>}, G_{\chi}^{<t,w>}, H^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{W^{<t>} \in \Delta_1^{(g)}}{extr} \\ \Delta_1^{(g)} = \{ W^{<t>} | H^{<t,w>} : M^{<t,w>} \times W^{<t>} \times N^{<t>} \rightarrow M^{<t,w>}, W^{<t>} = \\ = W_1^{<t>} \times W_2^{<t>} \times W_3^{<t>}, \\ R_{<1,\gamma_1>}^{<t,w>} (M^{<t,w>}, W^{<t>}, N^{<t>}) \leq \tilde{R}_{<1,\gamma_1>}, \gamma_1 \in \{1, \dots, \Gamma_1\} \} \quad (2),$$

где $I_{\tilde{\alpha}}^{<t,w>}$ – обобщенный показатель качества моделей и полимодельных комплексов (ПМК), описывающих СПУ СлО и входящих в состав ЦД; $\tilde{\alpha}$ – индекс, характеризующий вариант свертки частных показателей качества моделей и ПМК (например, показателей адекватности, точности, гибкости, сложности и т.п. моделей), $\tilde{\alpha} \in A$ – множество вариантов скаляризации (свертки) показателей качества моделей; $J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}, J_{\tilde{\beta}}^{<t>}$ – соответственно обобщенные показатели качества синтеза технологии и программ

проактивного управления СЛО, рассчитанные с использованием разработанных моделей, ПМК, ПрО, входящих в состав ЦД, а также значения которых получены путем прямых либо косвенных измерений характеристик (параметров) состояний реальных СЛО, $G_{\chi}^{<t,w>}$ – динамический альтернативный мультиграф, входящий в состав формулы (1), $H^{<t,w>}$ – оператор итеративного конструирования моделей, $\Delta_1^{(g)}$ – множество допустимых значений параметров адаптации моделей, полимодельных комплексов (ПМК) и ПрО; $R_{<1,\gamma_1>}^{<t,w>}(M^{<t,w>}, W^{<t>}, N^{<t>}) \leq \tilde{R}_{<1,\gamma_1>}$ – множество ограничений, накладываемых на процессы адаптации моделей, ПМК и ПрО ЦД; $\tilde{R}_{<1,\gamma_1>}$ – заданные константы; γ_1 – текущий номер ограничений; $\{1, \dots, \Gamma_1\}$ – множество номеров ограничений, определяющих множество допустимых альтернатив $\Delta_1^{(g)}$.

Задачи II класса (задачи синтеза технологий и программ проактивного управления СЛО с использованием ЦД)

$$J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>} \left(X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \begin{matrix} extr \\ <V^{<t,w>}, S_{\delta}^{<t_f>} > \in \Delta_2^{(g)} \end{matrix}$$

$$\Delta_2^{(g)} = \left\{ < V^{<t,w>}, S_{\delta}^{<t_f>} \right.$$

$$\left. > \left| R_{<2,\gamma_2>}^{<t,w>} \left(X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \leq \tilde{R}_{<2,\gamma_2>}, \right.$$

$$\left. V^{<t,w>} = U^{<t,w>} \times E^{<t>}, \gamma_2 \in \{1, \dots, \Gamma_2\} \right\}, \quad (2)$$

где $J_{\tilde{\beta}}^{<t,w>}$ – обобщенный качества синтеза технологии и проактивного управления СЛО, который рассчитывается с использованием предлагаемых моделей, ПМК, а также ПрО, входящих в состав ЦД; $V^{<t,w>}$ – множество входных воздействий, образованное на декартовом произведении множества допустимых управляющих воздействий $U^{<t,w>}$ и множества возмущающих воздействий $E^{<t>}$; $\tilde{\beta}$ – индекс, характеризующий вариант свертки частных показателей качества синтеза технологий и программ проактивного управления СЛО, а также соответствующего ПрО; $\tilde{\beta} \in B$ – множество вариантов скаляризации (свертки) частных показателей качества проактивного управления СЛО; $\Delta_2^{(g)}$ – множество допустимых динамических альтернатив (множество структур и параметров СПУ СЛО, множество технологий и программ проактивного управления СЛО, множество ПрО); $S_{\delta}^{<t_f>}$ – множество конечных (требуемых) допустимых многоструктурных макросостояний; $R_{<2,\gamma_2>}^{<t,w>} \left(X_{\chi}^{<t,w>}, F_{\chi}^{<t,w>}, Z_{\chi}^{<t,w>}, E_{<\chi,\chi'>}^{<t,w>}, V^{<t,w>}, t \in (t_0, t_f] \right) \leq \tilde{R}_{<2,\gamma_2>}$ – множество ограничений, накладываемых на процессы синтеза технологий и программ проактивного управления КФС, $\tilde{R}_{<2,\gamma_2>}$ – заданные константы; γ_2 – текущий номер ограничений; $\{1, \dots, \Gamma_2\}$ – множество номеров ограничений, определяющих множество допустимых альтернатив $\Delta_2^{(g)}$.

Представленное формальное описание проблемы создания и использования ЦД СПУ СЛО за счет системно-управленческого описания 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 [6, 11–22] 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 СЛО.

Реализация результатов исследований

На рис. 3 представлена общая проблематика разработки и внедрения новых информационных технологий создания и использования цифровых двойников, а также место данной проблематики в процессах управления ЖЦ изделий судостроения. Анализ данной проблематики показал, что аналогичная проблематика существует в такой наукоемкой отрасли российской экономики как ракетно-космическая отрасль [3]. Коллективом авторов данного доклада и организациями, в которых они работают, к настоящему времени выполнен большой объем НИР и ОКР в направлении создания отечественной информационно-аналитической платформы (ИАП), обобщенная структура которой представлена на рис. 4 [14–16]. В частности, на базе данной ИАП разработан и внедрен в Государственная корпорации по космической деятельности «Роскосмос» конкретный вариант ЦД в виде Единого Виртуального Электронного Паспорта (ЕВЭП) такого Изд, как ракета космического назначения (РКН) «Союз-2».



Рис 3. Общая проблематика разработки и внедрения новых информационных технологий создания и использования цифровых двойников [2]

На рис. 5 представлен интерфейс составного элемента аппаратно-программного комплекса ЕВЭП, связанного с решением задачи формирования заявления о соответствии изделия требованиям заказчика. Выполненный на основе представленных выше технологических аспектов информационно-аналитической поддержки ЖЦ изделий программный комплекс позволяет, основываясь на метаданных информационных ресурсов предприятий и организаций, конфигурируемых с помощью специальных электронных карточек регистрации, оценить текущее техническое состояние (ТС) РКН «Союз-2» для этапов проектирования, производства и комплексных испытаний изделия [15, 16].

В результате можно отметить, что опытно-экспериментальная отработка, промежуточные результаты разработки ЕВЭП РКН «Союз-2» для заинтересованных производственных и эксплуатирующих организаций и перспективы внедрения с использованием формируемой технологии информационно-аналитической поддержки

ЖЦ изделий показывают, что на основе рассмотренного подхода может быть достигнуто существенное повышение эффективности функционирования системы информации, повышение экономической отдачи предприятий и организаций космической отрасли, многократное повышение эффективности и оперативности принятия мер, направленных на повышение качества проактивного оценивания технического состояния (ТС) и надежную эксплуатацию КК, оптимизацию межведомственного информационного взаимодействия на основе автоматизации бизнес-процессов, регламентированных информационных потоков, доступности актуальной и достоверной информации участникам системы информации.



Рис. 4. Обобщенные сведения о созданной ИАП

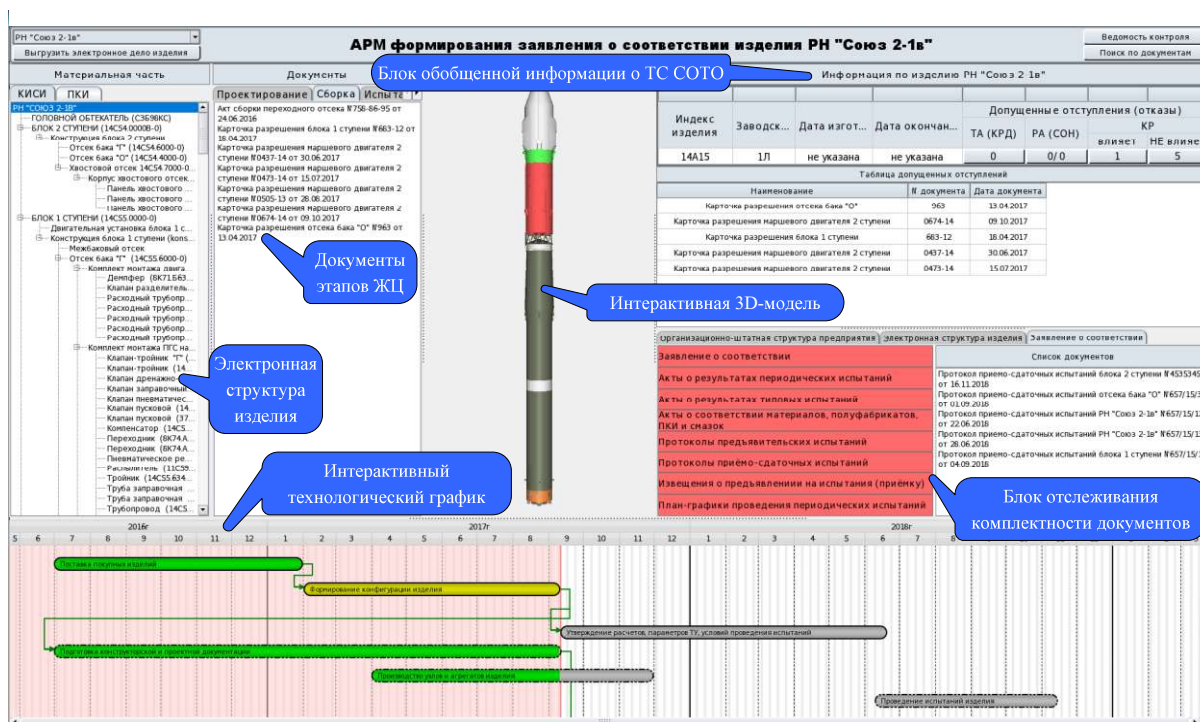


Рис. 5. Интерфейс Про АРМ доступа к информации из электронного паспорта РКН «Союз-2»

Заключение

На основе предложенного системно-управленческого описания процессов функционирования ЦД СлО как процессов проактивного (упреждающего) управления структурной динамикой соответствующей РС удалось соответствующие задачи комплексного моделирования СлО с использованием ЦД описывать в терминах теории управления, исследования операций и искусственного интеллекта. При таком подходе существующие и перспективные задачи анализа и синтеза ЦД СТО и его ЦМ описываются в терминах трех базовых задач квалитрии 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 [14] и в последующих исследованиях, результаты, которых представлены на сайте [17], приведены конкретные примеры использования разработанного системно-кибернетического и квалитрического подходов к описанию и использованию ЦД СТО в ракетно-космической, производственной, транспортно-технической сферах. Так, например, внедрение на практике ЕВЭП РКН «Союз-2» позволило получить следующие положительные эффекты:

- сокращение на 15–20% времени обработки информации и принятия управленческих решений;
- снижение до 30% стоимости и сроков разработки программного обеспечения информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений.

Также обеспечивается повышение степени соответствия разрабатываемого ПрО исходным требованиям и постановке задачи, а также достоверности результатов его функционирования на основе формальных спецификаций; потенциальное снижение стоимости, сроков разработки и сложности масштабирования и модифицирования ПрО информационно-аналитической поддержки ЖЦ СлО; технологичность и конструктивность процессов извлечения и представления экспертных знаний на основе использования графических нотаций при использовании полимодельного и многоязычного описания, комплекса средств верификации.

Исследования проводились в рамках финансирования по госбюджетной теме НИР FFZF-2025-0020.

Литература

1. **Ершова Т.** О цифровой парадигме развития // Информационное общество. 2019. № 4-5. С.1–2.
2. **Архипов А.В., Четвертаков М.М.** Долгосрочная кораблестроительная программа: принципы разработки и проблемы реализации // Оружие наследников Победы. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2015. С. 794–801.
3. Стратегия цифровой трансформации ракетно-космической отрасли РФ на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. – М.: Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», 2019. 33 с.
4. **Алексеев А.В., Михальчук А.В.** Цифровой двойник системы комплексной защиты информации в инвариантном исполнении (ЦД СКЗИ) / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (Реестр программ Федеральной службы по интеллектуальной собственности) № 2023662162, 06.06.2023 (поступило: 19.05.2023).

5. **Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В.** Цифровой двойник систем автоматизации процессов борьбы за информационную живучесть корабля, судна // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2023). XIII Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 25-27 октября 2023 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. – СПб, 2023, с. 226-228.
6. **Балухто А.Н., Хартов В.В., Романов А.А., Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В. и др.** Искусственный интеллект в космической технике. Состояние. Перспективы применения / Под ред. докт. техн. наук А.Н. Балухто. (Монография). – М.: Радиотехника, 2021. 434 с.
7. **Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Концепция и технология проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов на судостроительном предприятии / Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2023)». Труды конференции. СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. С. 163-68.
8. **Grieves M.** Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // White Paper. 2014. Vol.1. P. 1-7.
9. Национальный стандарт Российской Федерации Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники. Основные положения. 2021. 17 с.
10. **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое / научн. ред. А. Боровиков. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
11. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
12. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
13. **Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В.** Сертификация качества моделей на примере цифровых двойников управления борьбой за живучесть корабля, судна // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы XIII международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. С. 192-200.
14. **Охтилев М.Ю.** Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизированных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов (Монография). – СПб.: ГУАП, 2018.- 261с.
15. **Охтилев М.Ю., Ключарев А.А., Охтилев П.А., Зянчурин А.Э.** Технология автоматизированной информационно-аналитической поддержки жизненного цикла изделий на примере единого виртуального электронного паспорта космических средств // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2020. Т. 63, №11. С. 1012-1019.
16. Патент РФ на изобретение № 2669330, от 06.07.2017, «Интегрированная автоматизированная система космодрома».
17. <http://litsam.ru> (дата обращения 26.12.2023)
18. **Алексеев А.В., Максимова М.А., Согонов С.А., Михальчук А.В.** Модель и технология цифровых двойников систем автоматизации судов / Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ). 2023. Вып. 4 (8). С. 5-14.
19. **Алексеев А.В.** Теория практики цифровых двойников в судостроении // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов Одиннадцатой Всероссийской научно-практической

конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности / Под науч. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023, с. 78-90.

20. **Дригола В.К., Алексеев А.В.** Цифровой двойник распределенной системы управления: вариант реализации // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы XIII международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. – 400 с. С. 229-237.
21. **Михальчук А.В., Алексеев А.В., Антипов В.В., Смольников А.В.** Алгоритм функционирования цифрового двойника управления борьбой за информационную живучесть корабля, судна в режиме «Цифровой тени» // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Вып. 14 / СПОИСУ. – СПб., 2025, с. 399-404.
22. **Михальчук А.В., Алексеев А.В.** Цифровой двойник информационной безопасности на базе РПК «КАСОР-26.Гюйс» // VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Цифровая трансформация и информационная безопасность: вызовы для науки и образования», 26 июня – 1 июля 2026. Нальчик: КБГУ, 2026.