

# СИНТЕЗ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОАГЕНТНОГО СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ СУБЪЕКТАМИ И ОБЪЕКТАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Ботуз С.П.

Институт государственной службы и управления РАНХиГС,  
Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 84

bsp\_serg@mail.ru

*Аннотация:* Рассматриваются методы последовательного синтеза поведенческих моделей сложно - функциональных блоков (СФ-блоков) систем на кристалле (СнК) человеко-машинных (эргатических) систем многоагентного ситуационного управления (ЭСМСУ) субъектами и объектами интеллектуальной собственности (ОИС). Процессы наблюдения за поведением СФ-блоков в составе СнК поддерживаются агентами ЭСМСУ не только на уровне контроля функций взаимодействия между субъектами ОИС, но и на уровне мониторинга (оценки) физических характеристик (вектора состояния) СнК. При этом применение разработанного аппарата графоаналитического исчисления обеспечивает обработку (фиксацию, сжатие и отображение) многомерных данных (МД, числовых массивов и т.п.) вектора состояния СнК ЭСМСУ на основе использования подвижно-взаимосвязанной системы координат, у которой в качестве основного графического примитива использованы не точечные объекты, а прямые линии и соответствующие рекурсивные выражения. Синтез приемлемых для зрительного восприятия ЛПР отображений МД на плоскости монитора осуществляется на основе использования графоаналитических объектов (графических вычислительных таблиц, графоаналитических бинарных полей и т.п.) и применения аппарата проективных групп Ли. Разработанные методы позволяют осуществлять синтез поведенческих моделей СФ-блоков эргатических систем многоагентного ситуационного управления сетевыми субъектами и объектами интеллектуальной собственности в реальном масштабе времени на всех этапах жизненного цикла СнК ЭСМСУ, при этом реализации СнК могут быть выполнены в виде специализированных микросхем (Application Specific Integrated Circuit, ASIC).

Ключевые слова: эргатические системы технического зрения, многоагентный синтез, поведенческие модели

## Введение и постановка задачи

Рассматриваются методы и модели автоматизации основных процессов жизненного цикла (ЖЦ – CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support)) проектирования (исследования/моделирования, разработки/синтеза и патентования/экспертизы) поведенческих моделей сложно-функциональных блоков человеко-машинных (эргатических) систем технического зрения (ЭТЗ) систем многоагентного ситуационного управления сетевыми субъектами и объектами интеллектуальной собственности на основе применения разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) многоагентного синтеза интеллектуальных ЭТЗ [1,2] – ЭСМСУ ОИС.

Основное внимание в работе уделено проектированию высоконадежных радиационно-стойких бортовых/автономных ЭТЗ (космических аппаратов, систем специального назначения, подвижных беспилотных транспортных систем и т.п.), а именно, ЖЦ проектирования бортовых ЭТЗ в виде систем на кристалле (СнК – в иностранной литературе – System-on-Chip, SoC – подсистем ЭТЗ). При этом в работе сконцентрировано внимание на существовании целого ряда промежуточных вариантов подсистем ЭТЗ, которые можно определить как конфигурируемые системы на кристалле (Configurable System on Chip – CsoC) [3]. А также на том, что СнК – это сверхбольшая интегральная схема (СБИС), содержащая на кристалле различные сложные функциональные модули (СФ-модули/блоки, ещё их называют IP-ядра (Intellectual Property)-ядра или IP Core reuse, они же: Silicon IP, Soft IP – цифровые блоки, не привязанные к определенной технологии, VC (virtual components – виртуальные компоненты), представляющие функционально обособленные изделия, которые могут найти самостоятельное применение для решения различных прикладных задач на основе синтеза интеллектуальных ЭТЗ. По сути СФ-модули представляют готовые вычислительные заготовки, обеспечивающие функциональную и технологическую адаптивность ЭТЗ для решения различного рода прикладных задач, что в свою очередь позволяет существенно уменьшить трудозатраты и сроки исследования и разработки архитектуры СнК ЭТЗ.

Следовательно, особую значимость приобретает сам процесс оценки патентоспособности (патентной чистоты, лицензионности и т.п.) СФ-модулей на самых ранних стадиях ЖЦ проектирования ЭТЗ и то, насколько их наличие (или отсутствие) повышает ценность, прозрачность и безопасность в целом всей разработки ЭТЗ. При этом необходимость исследования радиационной



*Утверждение. 2.1.* Поведенческие модели КМОП СБИС СТЗ и соответствующие подсистемы системы на кристаллах (СнК) СТЗ ограниченной сложности могут быть синтезированы на основе систем нелинейных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$(1) \quad \vec{X}(t) = F \left[ \vec{X}(t), \vec{X}(t - \tau^{(X)}(t)), \vec{U}(t), \vec{U}(t - \tau^{(U)}(t)), \vec{\xi}_b(t), t \right],$$

$$(2) \quad \vec{Y}(t) = \Phi \left[ \vec{X}(t), t \right], \quad 0 \leq t_0 \leq t \leq t_k < \infty,$$

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0(t), \quad t_0 - \tau^{(X)}(t) \leq t \leq t_0, \quad \tau^{(X)}(t) \geq 0,$$

$$\vec{U}(t) = \vec{U}^0(t), \quad t_0 - \tau^{(U)}(t) \leq t \leq t_0, \quad \tau^{(U)}(t) \geq 0,$$

$$\vec{X}(t) \in \Omega_X \subset R^n, \quad \vec{U}(t) \in \Omega_U \subset R^m, \quad \vec{\xi}_b(t) \in \Omega_\xi \subset R^r,$$

$$\vec{Y}(t) \in \Omega_y \subset R^\ell,$$

где  $\vec{X}(t)$ ,  $\vec{U}(t)$ ,  $\vec{Y}(t)$  и  $\vec{\xi}_b(t)$  – векторы координат, соответственно, состояния, управления, выхода и возмущения;  $F(\cdot)$  и  $\Phi(\cdot)$  – матрицы-столбцы, состоящие из  $n$  и  $m$  элементов;

$\Omega_X$ ,  $\Omega_U$ ,  $\Omega_y$  и  $\Omega_\xi$  – замкнутые множества, соответственно, в

$R^n$ ,  $R^m$ ,  $R^\ell$  и  $R^r$  –  $n$ ,  $m$ ,  $\ell$  и  $r$  – мерных пространствах;  $\vec{X}^0(t)$  и  $\vec{U}^0(t)$  – векторы начальных координат состояния и управления, таковы, что удовлетворяют теоремам существования и единственности решений уравнений с запаздывающим аргументом;  $\tau^{(X)}(t)$  и  $\tau^{(U)}(t)$  – нестационарные значения величины запаздывания поведенческих моделей СнК ЭСТЗ по состоянию и управлению соответственно.

Содержательно утверждение 2.1. означает то, что процессы генерации прикладного программного обеспечения поведенческих моделей КМОП СБИС СТЗ предоставляется возможность осуществить на основе унифицированной модели (1) и (2), формальные параметры (переменные) которой или векторы координат состояния, управления, выхода и возмущения заменяются на фактические переменные, а параметры указанных матриц – устанавливаются по «умолчанию» или задаются ЛППР (или его агентом).

В частности справедливо следующее

*Предложение. 2.1.* Предоставляется возможность расширить традиционную задачу терминального управления процессами исследования, разработки и патентования таких объектов промышленной собственности, как изобретения в человеко-машинных (эргатических) СТЗ.

А именно, на основе предлагаемой унифицированной модели можно определить процесс принятия решения как некоторую последовательность взаимосвязанных действий в заданном наборе состояния выхода  $\vec{Y}(t_i) = \Phi \left[ \vec{X}(t_i), t_i \right]$ ,  $0 \leq t_0 \leq t_i \leq t_k < \infty$ , информационных полей или множестве

состояния графоаналитических экранов –  $G_i \equiv \vec{Y}(t_i)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ , физические размеры  $G_i$  в заданном координатном базисе, например, в декартовой системе координат по оси абсцисс  $\rightarrow \Delta X_\varepsilon$ , а по оси ординат  $\rightarrow \Delta Y_\varepsilon$ , в каждом из которых расположен набор ( $j = 1, 2, \dots, N_i$ ) активных и пассивных опций (или, в общем случае использования обозначений формальных переменных унифицированной модели – возмущающих воздействий  $\vec{\xi}_b(t)$ , характеризующие радиационную стойкость КМОП СБИС СТЗ).

Элементы вектора возмущающих воздействий в общем случае поведенческой модели (1) – (2)

$$\vec{\xi}_b(t) = \Phi_b \left( \vec{X}(t), t \right) = \left[ \varphi_j(X_j(t), t) \right], \quad j = \overline{1, r},$$

где  $\varphi_j(X_j(t), t)$  – скалярные нестационарные нелинейности, характеристики которых удовлетворяют условиям:

$$(3) \quad \begin{cases} \xi_j(t)/X_j(t) = [\varphi_j(X_j(t), t)/X_j(t)] \in [0, k_j], & k_j = \text{const при } X_j(t) \neq 0, \\ \xi_j(t) = \varphi_j(X_j(t), t) = 0 & \text{при } X_j(t) = 0. \end{cases}$$

При этом справедливо

*Утверждение 2.2.* Построение надежных и достаточно простых систем формирования поведенческих моделей СнК может быть обеспечено в классе дискретных (релейных, релейно-импульсных, импульсных или цифровых) систем автоматического регулирования и управления, для которых

$$(4) \quad \vec{U}(t) = F_U \left\{ (\vec{e}(t), t) : t \in [t_0, t], t_k > t_0 \geq 0 \right\},$$

удовлетворяющие следующим ограничениям:

- 1)  $\vec{U}(t) \in \Omega_U \subset R^m$  при всех  $(t, \vec{e}(t)) \in [t_0, t] \times R^\ell$ , где  $\Omega_U$  – компакт в  $m$ -мерном евклидовом пространстве;
- 2)  $\vec{U}(t)$  – непрерывно дифференцируемый всюду на  $[t_0, t_K] \times R^\ell$ , за исключением  $t = t^*_k, k = 1, 2, \dots, K$ ,  $(t_0 \leq t^*_1 \leq t^*_2 \leq \dots \leq t^*_k \leq t_k)$ , на которых
- 3) 
$$\begin{cases} U_j(t^-_{i_1}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} U_j(t^*_{i_1} - \varepsilon), \\ U_j(t^+_{i_1}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} U_j(t^*_{i_1} + \varepsilon), \end{cases} \quad \varepsilon > 0, \forall j = \overline{1, m}, i_1 = 1, 2, \dots$$

*Утверждение 2.3.* Динамические процессы, происходящие в поведенческих моделях СнК ЭСТЗ не являются процессами марковского типа, так как условная плотность вероятностей

$$P \left[ \vec{X}(t_n) / \vec{X}_0, \vec{X}_1, \dots, \vec{X}(t_{n-1}) \right] \neq P \left[ \vec{X}(t_n) / \vec{X}(t_{n-1}) \right].$$

*Следствие 2.1.* Для определения состояния процесса в будущем, при  $t > t_0$ , недостаточно знания

состояния  $\vec{X}(\theta)$ ,  $\vec{U}(\theta)$  и  $\vec{\xi}_b(\theta)$  на отрезке  $\theta \in [t_0, t]$ , еще необходима информация о векторных функциях  $\vec{X}(t^*)$ ,  $\vec{U}(t^*)$  и  $\vec{\xi}_b(t^*)$ ,  $\forall t^* \in [t_0 - \max(\tau^{(X)}(t), \tau^{(U)}(t))]$ .

Кроме этого, ввиду наличия в поведенческих моделях СнК существенно нелинейных звеньев с неоднозначными гистерезисными функциями, и соответственно, вносимого ими пространственного запаздывания, в [1] сформулирована постановка задачи, связанная с автоматизированным синтезом адекватных поведенческих моделей и автоматизированным контролем соответствующих условий их регулярности в каждом конкретном случае исследования, разработки, эксплуатации и патентования ЭСТЗ. При этом процедуры экспертизы состояния поведенческих моделей СнК ЭСТЗ осуществляют в условиях ограничений на ресурсные возможности разного вида (сроки, располагаемая функциональная база, число и квалификация разработчиков и т.п.).

В этой связи условие реализуемости множества

$$(5) \quad J = \{ J_i(\vec{x}, \vec{U}, \vec{\xi}_b, \vec{y}, t) : \vec{x} \in \Omega_x \subset R^n; \vec{U} \in \Omega_U \subset R^m; \vec{\xi}_b \in \Omega_\xi \subset R^r; \vec{y} \in \Omega_y \subset R^l; t \in [t_0, t_k] \subset R^1_+; i = \overline{1, l} \},$$

перечисленных выше локальных критериев и требований, предъявляемых в процессе мониторинга состояния поведенческих моделей СнК ЭСТЗ можно записать в следующем виде:

$$(6) \quad G \equiv \left\{ \bigcap_{i=1}^{\ell} J_i(\vec{x}, \vec{U}, \vec{\xi}_b, \vec{y}, t) : J_i(B) \leq \hat{J}_i; \forall i = \overline{1, \ell} \right\} \neq \emptyset,$$

где  $J_i(B)$  – непрерывные скалярные функции, приближенно дифференцируемые необходимое число раз по каждой из

$$(7) \quad B = \{ \beta_i(t) : \max_{t \in [t_0, t_k]} \left\| \sigma_i(t) - (\beta_i^{(1)} - \beta_i(t)) / (\beta_i^{(2)} - \beta_i^{(1)}) \right\|_2 \leq \Delta \sigma_i^{don} \},$$

$$\forall t \in [t_{i_1}, t_{i_1+1}] \subseteq [t_0, t_k] \subset R^1_+; i = \overline{1, (n+m+r+l)}; i_1 = 1, 2, \dots;$$

где  $\beta_i^{(1)} = \inf \beta_i(t)$ ;  $\beta_i^{(2)} = \sup \beta_i(t)$ ;  $\beta_i^{(1)} \neq \beta_i^{(2)}$ ;

$$\sigma(t) \in \Xi \equiv \left\{ \vec{x} \in \Omega_x \subset R^n; \vec{U} \in \Omega_U \subset R^m; \vec{\xi}_b \in \Omega_{\xi} \subset R^r; \vec{y} \in \Omega_y \subset R^l; t \in [t_0, t_k] \subset R_+^1 \right\},$$

$J_i$  – граничное значение соответствующего критерия.

В результате справедливо следующее

*Предложение 2.2.* Эффективность основных процедур мониторинга поведенческих моделей СнК в реальных условиях их проектирования и эксплуатации существенно зависит от способов фиксации вариантного обоснования принимаемых проектных решений на самых ранних этапах ЖЦ проектирования СнК ЭСТЗ, которые, с одной стороны, должны учитывать возможности современных вычислительных сред (ВС), а с другой – эвристические способности ЛПР в ЭСМСУ ОИС.

*Следствие 2.2.* В качестве методической основы для синтеза поведенческих моделей СнК ЭСТЗ целесообразно использования основных положений принципа минимальной (ограниченной) сложности (ПМС) [10,11,12] на основе учета реальных (ситуационных и т.п.) ограничений (6).

*Следствие 2.3.* Поведенческие модели процедур принятия решений (ППР) следует формировать таким образом, чтобы:

во-первых, ППР отвечали бы естественному процессу самообучения ЛПР или его агентов ЭСМСУ ОИС, в ходе которого одновременно с формированием стереотипа ЛПР или на основе учета приобретенных ЛПР ассоциаций (например, на основе опыта известных аналогичных разработок, описанных в научно-технической и патентной литературе и др.), осуществляется проблемное ориентирование ЛПР, позволяющее ему справиться с неопределенностью ситуации того или иного этапа ЖЦ поведенческих моделей СнК ЭСМСУ ОИС;

во-вторых, ППР учитывали бы располагаемый ресурс конкретных условий разработки технически оптимальных СнК ЭСТЗ (рис. 3).

*Следствие 2.4.* В процессе патентования СнК ЭСТЗ решение, удовлетворяющее критериям (условиям) охраноспособности, часто не подчиняется аксиомам транзитивности предпочтений, например, если  $S_i(U) > S_j(U)$  и  $S_k(U) > S_i(U)$ , то  $S_k(U) > S_j(U)$  для всех  $S_i, S_j, S_k$ , принадлежащих конечному множеству  $S = \{S_j, \dots, S_n\}$ .

Разработчик СнК ЭСТЗ, как правило, находится в условиях, так называемых, жизненных проблем, которые ему поставляют массу нетранзитивных предпочтений, то есть –  $S_k(U) < S_j(U)$ .

В подобных ситуациях происходит нарушение аксиом теории Неймана – Моргенштейна, а именно, аксиом о транзитивности предпочтений.

Применение различных вариантов лексикографической стратегии также вызывает нетранзитивность предпочтений. Ее особенностью является то, что ЛПР сначала упорядочивает измерения (или характеристики) исходов по степени значимости, выбирая затем тот из исходов, который предпочтительнее для него с точки зрения важнейшей характеристики. Если по этой характеристике исходы уже не различимы, то сравниваются их ценности по следующему измерению и т.д. Эта “разумная” стратегия часто приводит к нетранзитивности предпочтений относительно исходов выбора, что естественно в подобных сложно формализуемых ситуациях. Тем не менее, было бы ошибкой считать это нормой для всех других ситуаций, так как нетранзитивность может быть и результатом непоследовательного поведения ЛПР или совершения ЛПР (или его агентом) различных ошибок. Поэтому, в одних случаях нетранзитивность предпочтений – свидетельство нерационального поведенческой модели ЛПР, а в других – нормальное явление.

В этой связи рассмотрены основные варианты теории полезности (Саймона), которые основаны на иной трактовке аксиомы транзитивности, в частности, на понятии стохастической транзитивности.

Определены уровни притязаний ЛПР в процессе экспертизы поведенческих моделей СнК ЭСМСУ ОИС на основе применения бинарных отношений в моделях формирования функции выбора  $C(\cdot)$ .

Рассмотрена общая ситуация, когда каждому варианту  $x \in \Omega$  ставится вектор критериальной оценки  $\vec{J}(x) \in R^n$ , а процесс выбора обобщает понятие экстремизационного правила для одного критерия, при этом

$$(7) \quad C(X) = \{y \in X \mid \exists x \in X: (\forall i = 1, \dots, j, \dots, n \ J_i(x) \geq J_i(y) \& \exists i_o: J_{i_o}(x) > J_{i_o}(y))\}.$$

Правило (7) вместе с вектором  $\vec{J}(x) \in R^n$  представляют механизм многокритериального паретовского выбора, согласно которому возможные решения следует искать среди неулучшаемых альтернатив.

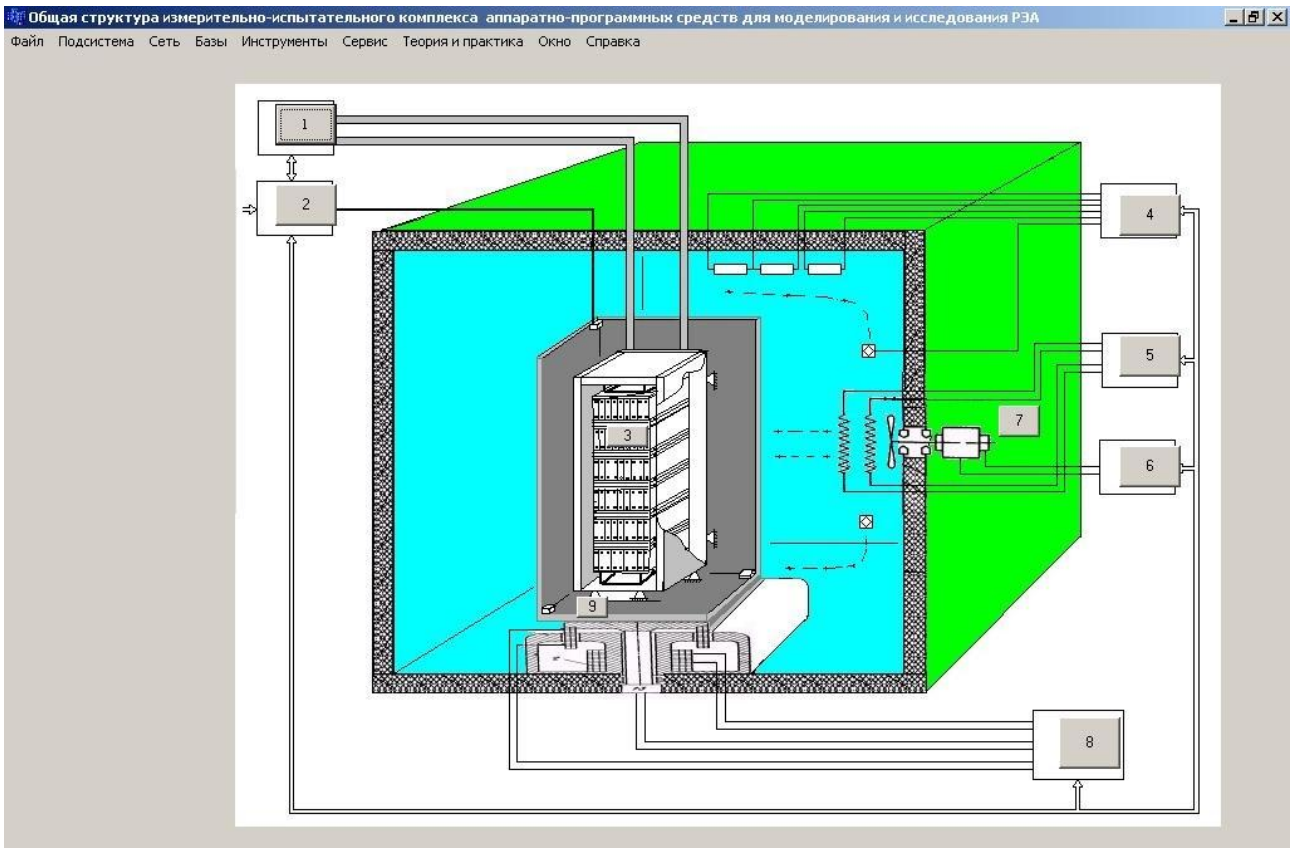


Рис. 3. Вид главного окна интерфейса пользователя программно-аппаратного комплекса испытания РЭА(СнК) ЭСТЗ, который содержит следующие загрузочные модули подсистем: охлаждения (1); – многоканальной обработки визуализации многомерных данных (2); – моделей несущих конструкций РЭА ЭСТЗ (3); измерения, регистрации, контроля и генерации тепловых, электромагнитных и радиационных режимов в испытательной камере РЭА ЭСТЗ (4) и (5); – регулирования теплообмена (6); – регулируемых асинхронных двигателей (АД) (7); – формирования механических воздействий, вибрации, ударов и других дестабилизирующих воздействий механической природы (8); – моделей подвижной опоры РЭА ЭСТЗ (9)

Для синтеза поведенческих моделей СнК ЭСМСУ ОИС предлагается менее жесткая стратегия выбора – правило Слейтера (или слабое правило Парето), которое на основе использования формализма нечетких отношений ( $\tilde{G}$ ) или СНФ принимает следующий вид:

$$(8) \quad C(X) = \{y \in X \mid \exists x \in X: (\forall i = 1, \dots, j, \dots, n \ J_i(x) \tilde{G} J_i(y))\}.$$

В результате справедливо

*Предложение. 2.3.* В процессе проверки соответствий функционирования аппаратуры в условиях, например, космической радиации – целесообразно формирование поведенческой модели ЭКБ ЭСТЗ и синтез соответствующих обобщенных моделей ( $L_i(T)$ ) взаимодействия ЭКБ СнК ЭСТЗ с окружающей средой  $V(T) = \{\vec{V}_i(\cdot), \vec{V}_{pi}(\cdot)\} \in \mathbb{R}^3$ , где  $T = \{t, (t-\theta), H\}$ ,  $t$  – время,  $\theta$  – отклоняющий аргумент  $\theta \in [-\max(\tau^{(x)}(t), \tau^{(u)}(t)), \max(\tau^{(x)}(t), \tau^{(u)}(t))]$ ,  $\max(\tau^{(x)}(t), \tau^{(u)}(t)) \geq 0$ ;  $H$  – энтропия;  $\vec{V}_i(\cdot)$  и  $\vec{V}_{pi}(\cdot)$  – вектор состояния внешнего состояния окружения  $L_i(T)$   $i$ -й СнК и её подсреды;  $\vec{L}_{pi}(\cdot)$  – вектор состояния внутренних элементов  $L_i(T)$   $i$ -й СнК, обеспечивая возможность формирования графоаналитических бинарных полей (ГАБП – модулей) или паспортов состояния ЭКБ ЭСТЗ [1].

При этом ГАБП – модули, синтезированные на основе обработки данных о радиационном поведении ЭКБ, могут быть использованы не только для аутентификации подлинности ЭКБ ЭСТЗ, но и для оценки радиационной стойкости подсистем ЭСТЗ или в целом ЭСМСУ ОИС.

Следовательно, справедливо следующее утверждение.

*Утверждение. 2.4.* ГАБП – модули подсистем ЭСТЗ являются дополнительными существенными (отличительными) признаками формулы изобретения, которые могут быть представлены, например, в

виде процедуры синтеза ГАБП распределения амплитуд ионизационных откликов и радиационной деградации параметров ЭКБ СнК ЭСТЗ по мере накопления поглощенной дозы радиации.

*Следствие.2.5.* ГАБП – модуль подсистем ЭСТЗ является одной из уникальных составляющих поведенческих моделей ЭКБ ЭСТЗ или в целом ЭСМСУ ОИС.

В этой связи необходим синтез ГАБП на основе обработки многомерных числовых массивов, получаемых в процессе анализа поведенческих моделей ЭКБ на всех этапах жизненного цикла СнК ЭСТЗ.

Для этого согласно [11] использован подход, в соответствии с которым структура многомерных числовых данных (МД) для анализа поведенческих моделей СнК ЭСТЗ представлена в виде иерархически упорядоченных списков. При этом, учитывая надежность характеристики используемого комплекса технических средств, организация информационной БД о рассматриваемых вариантах (режимах работы или функционирования) СнК ЭСТЗ осуществляется в соответствии со следующими составляющими МД: исходные (начальные), текущие (получаемые в процессе исследования) и защитные (минимальный объем МД, позволяющий восстановить результаты исследований состояния поведенческих моделей СнК ЭСТЗ в любой  $t_i \in [t_0, t_k]$ ). В соответствии с исходной и текущей информацией для заданных значений (6), определяющих область допустимых решений  $\forall \beta_i(t) \in B$ , применяя принцип сжимающих отображений, осуществляется биективное отображение многомерных зависимостей  $J_i$  от  $\beta_i^{(1)}(\beta_i^{(2)})$  на  $R^2$  (на экране монитора) в виде графоаналитических бинарных полей (таблиц и т.п.), в форме адекватной восприятию конкретному ЛПР (например, в проблемно-ориентированном пространстве конкретной разработки СнК ЭСТЗ). Процесс перехода от МД из  $R^{k+1}$  в  $R^2$  осуществляется на основе применения конструктивных реализаций подвижно-взаимосвязанной системы координат [1,11] следующим образом.

Согласно полученным рекурсивным выражениям интерполяционной формулы гиперповерхности МД в  $R^{k+1}$ :

$$(9) \quad f_{k+1}(\beta_i, i = \overline{1, k}; P_k) = 0,$$

$$\text{где } P_k \equiv P_k(\beta_k; J_{ij}^{(p)}, i, j = 1, 2; p = 1, 2, 3, \dots, 2^{k-2}),$$

разбиваются на  $N_0$  подпространств  $R^4$  или  $R^5$ .

$$\text{Соответственно } f_3(\beta_1, \beta_2, \beta_3, P_3) = 0 \text{ или } f_4(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, P_4) = 0,$$

где

$$P_3 \equiv P_3(\beta_3; J_{ij}^{(p)}, ij = 1, 2; p = p_1, p_1 + 1), p = 1, 3, 5, \dots; N_0 = 2^{k-3};$$

$$P_4 \equiv P_4(\beta_4; J_{ij}^{(p)}, ij = 1, 2; p = p_1, p_1 + 1, p_1 + 2, p_1 + 3), p_1 = 1, 5, 9, \dots; N_0 = 2^{k-4}.$$

Информация каждого из полученных подпространств с помощью канонических форм Коши биективно (взаимно-однозначно) отображается на плоскости монитора (в  $R^2$ ) в виде графоаналитических объектов (графических вычислительных таблиц, графоаналитических бинарных полей данных и т.п. ГАБП). Синтез в  $R^2$  приемлемого графоаналитического отображения МД осуществляется в динамике исследования ПСПУ ФТП на основе применения аппарата проективных групп Софуса Ли (см. табл.1).

При этом синтез ГАБП преобразование, в основном, осуществляют путем коллинеации [11]. Так как второй метод преобразования плоскости – коррелятивный можно заменить последовательным выполнением полярного преобразования относительно единичной окружности и некоторого коллинеарного преобразования.

Таким образом, в рассматриваемом случае необходимо первоначально рассматривать бинарные поля –

$$(10) \quad (\beta_i, \beta_{i+1}) \equiv \left\{ \xi_{\theta\gamma}(\beta_i^{(\theta)}, \beta_{i+1}^{(\gamma)}), \eta_{\theta\gamma}(\beta_i^{(\theta)}, \beta_{i+1}^{(\gamma)}); \theta, \gamma = 1, 2 \right\},$$

заклЮчить в четырехугольники –

$$(11) \quad Q_i(\xi_{11}, \eta_{11}) Q_{2i}(\xi_{12}, \eta_{12}) Q_{3i}(\xi_{21}, \eta_{21}) Q_{4i}(\xi_{22}, \eta_{22})$$

и на основе коллинеарных преобразований, которые представляются формулами:

$$(12) \quad \xi'_{ij} = \frac{a_{i1}\xi_{ij} + b_{i1}\eta_{ij} + c_{i1}}{a_{i3}\xi_{ij} + b_{i3}\eta_{ij} - c_{i3}}, \quad \eta'_{ij} = \frac{a_{i2}\xi_{ij} + b_{i2}\eta_{ij} + c_{i2}}{a_{i3}\xi_{ij} + b_{i3}\eta_{ij} + c_{i3}}, \quad j = \overline{1, 4},$$

где  $(\xi_{ij}, \eta_{ij}), (\xi'_{ij}, \eta'_{ij})$  – соответственно координаты исходного бинарного поля  $(\beta_i, \beta_{i+1})$  и соответствующие координаты искомого поля  $(\beta_i, \beta_{i+1})'$ ;

Таблица 1. Основные группы синтеза ГАБП поведенческих моделей ЭСМСУ ОИС

Группа преобразований	Ограничения на коэффициенты $\forall i = \overline{1,4}, \forall t \in [t_0, t_k] \subset R^1_+$
$G_p$ – проективная	$\det \begin{pmatrix} a_{i1}(t) & b_{i1}(t) & c_{i1}(t) \\ a_{i2}(t) & b_{i2}(t) & c_{i2}(t) \\ a_{i3}(t) & b_{i3}(t) & c_{i3}(t) \end{pmatrix} \neq 0$
$G_p^\perp$ – ортогональная	$\begin{pmatrix} a_{i1}(t) & b_{i1}(t) & c_{i1}(t) \\ a_{i2}(t) & b_{i2}(t) & c_{i2}(t) \\ a_{i3}(t) & b_{i3}(t) & c_{i3}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i1}(t) & a_{i2}(t) & a_{i3}(t) \\ b_{i1}(t) & b_{i2}(t) & b_{i3}(t) \\ c_{i1}(t) & c_{i2}(t) & c_{i3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$G_a^\perp$ – ортогональные аффинные преобразования	$a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0, c_{i3}(t)=1, c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=0, a_{i1}(t)=\pm \cos \theta, b_{i1}(t)=\pm \sin \theta$ ( $\text{sign}(\cos \theta)=\text{sign}(\sin \theta)$ ), $a_{i2}(t)=-\sin \theta, b_{i2}(t)=\cos \theta$
$G_\theta$ – повороты и вращения	$a_{i1}(t)=\cos \theta, b_{i1}(t)=\sin \theta, a_{i2}(t)=-\sin \theta, b_{i2}(t)=\cos \theta, a_{i3}(t)=b_{i1}(t)=b_{i3}(t)=c_{i2}(t)=0,$ $c_{i3}(t)=1$
$G_{k,\theta}^c$ – комбинации метрических преобразований	$a_{i1}(t)=k(t)\cos \theta, b_{i1}(t)=k(t)\sin \theta, a_{i2}(t)=-k(t)\sin \theta, b_{i2}(t)=k(t)\cos \theta,$ $a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0, c_{i3}(t)=1$
$G_{k,\theta}^\varepsilon$ – евклидовы подобия	$a_{i1}(t)=k(t)\cos \theta, b_{i1}(t)=k(t)\sin \theta, a_{i2}(t)=-k(t)\sin \theta, b_{i2}(t)=k(t)\cos \theta,$ $c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i3}(t), c_{i3}(t)=1$
$G_s^\varepsilon$ – симметрия (отображения)	$a_{i1}(t)=\pm 1, b_{i2}(t)=\pm 1,$ $a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i1}(t)=b_{i3}(t)=c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=0, c_{i3}(t)=1$
$G_m^\varepsilon$ – изменения масштаба	$a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i1}(t)=b_{i3}(t)=c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=0, c_{i3}(t)=1, a_{i1}(t) \neq 0, b_{i2}(t) \neq 0$
$G_m^c$ – смещение и изменение масштаба	$b_{i1}(t)=a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0, c_{i3}(t)=1, a_{i1}(t) \neq 0, b_{i2}(t) \neq 0$
$G_{m,p}^c$ – смещения подобия	$b_{i1}(t)=a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0, c_{i3}(t)=1, a_{i1}(t)=b_{i2}(t) \neq 0$
$G_m$ – подобия	$a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i1}(t)=b_{i3}(t)=c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=0, c_{i3}(t)=1, a_{i1}(t)=b_{i2}(t) \neq 0$
$G_s$ – смещения	$a_{i1}(t)=b_{i2}(t)=c_{i3}(t)=1, b_{i1}(t)=a_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0$
$G_a^c$ – центроаффинные преобразования	$c_{i1}(t)=c_{i2}(t)=a_{i3}(t)=b_{i3}(t)=0, c_{i3}(t)=1, \det \begin{pmatrix} a_{i1}(t) & b_{i1}(t) \\ a_{i2}(t) & b_{i2}(t) \end{pmatrix} \neq 0$

$a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}$  – коэффициенты коллинеарного преобразования, удовлетворяющие единственному условию [11]:

$$(13) \quad \begin{vmatrix} a_{i1} & b_{i1} & c_{i1} \\ a_{i2} & b_{i2} & c_{i2} \\ a_{i3} & b_{i2} & c_{i3} \end{vmatrix} \neq 0, \quad \forall i = \overline{1,4},$$

преобразовать исходное поле  $(\beta_i, \beta_{i+1})$  в искомое поле  $(\beta_i, \beta_{i+1})'$  в соответствии с заданными координатами

$$Q'_{1i}(\xi'_{11}, \eta'_{11}), Q'_{2i}(\xi'_{12}, \eta'_{12}), Q'_{3i}(\xi'_{21}, \eta'_{21}), Q'_{4i}(\xi'_{22}, \eta'_{22}).$$

Следовательно, синтез (пересчет) всех бинарных полей (ГАБП)  $(\beta_i, \beta_{i+1})$  в  $(\beta_i, \beta_{i+1})'$  поведенческих моделей ЭСМСУ ОИС можно представить следующей последовательностью выполнения этапов, объединенных в цикл по  $i$ , а именно: для  $i = 1$  с шагом 1 до  $\ell$  (где  $\ell$  число пересчитываемых ГАБП ЭСМСУ ОИС бинарных полей) выполнить: – ввести  $Q_{vi}, Q'_{vi}$ ,  $v = \overline{1,4}$ ; – вычислить  $a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}$ ,  $k = \overline{1,3}$ ; – пересчитать в соответствии с уравнением (12) и вычисленными коэффициентами  $a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}$  координатные точки  $(\beta_i, \beta_{i+1})$  из системы координат  $\eta O \xi$  и  $\eta' O' \xi'$ .

При этом в таблице 1 сведены основные группы геометрических преобразований, используемые в процессе синтеза графических отображений бинарных полей (11) в процессе функционирования ЭСМСУ ОИС. Таким образом, каждому проективному преобразованию  $g$  вида (12) или его подмножеству можно сопоставить матрицу  $A(g(t))$  размерности  $3 \times 3$ ,  $\forall t \in [t_0, t_k] \subset R_+$ . При этом произведению (суперпозиции) двух проективных преобразований или его подмножеств  $g_1$  и  $g_2$  соответствует матрица  $A(g_1)A(g_2)$ .

Каждая из подгрупп  $g_1, g_2 \in G_p$  (см. таблицу 1) состоит из преобразований (12) с теми или иными ограничениями на коэффициенты матрицы  $A(g(t))$ .

Основные группы геометрических преобразований, приведенные в таблице 1, действуют в некотором множестве изображений ( $M$ ) искомым образом многомерных данных. Кроме этого, принято считать [11], что группа действует в множестве  $M$ , если каждому элементу  $m \in M$  и каждому элементу группы  $g \in G_p$  соответствует новый элемент  $M$ , обозначаемый обычно  $gm$ , и при этом выполнены следующие условия:

1. Для любых  $g_1, g_2 \in G_p$  и любого  $m \in M$   $(g_1 g_2)m = g_1(g_2 m)$ .

2. Если  $e$  - единица  $\in G_p$ ,  $m \in M$ , то  $em = m$ . Элемент  $gm$  называется результатом применения  $g$  к  $m \in M$ .

Условие 1 означает, что реализация произведения элементов группы равносильна применению второго элемента группы к результату действия первого элемента. Условие 2 означает, что применение единичного элемента группы не меняет элементов  $M$  в процессе функционирования ЭСМСУ ОИС.

## Заключение

Рассмотренные в настоящей работе методы и модели доведены до программных и конструктивных реализаций. При этом показано, что на основе применения предлагаемых разработок представляется возможным осуществлять моделирование и исследование многомерных параметрических зависимостей на плоскости, а также осуществлять фиксацию исследуемых вариантов систем управления различной физической природы в виде проблемно-ориентированных графоаналитических объектов – бинарных вычислительных таблиц.

Основное преимущество предлагаемых методов и моделей синтеза поведенческих моделей СнК ЭСТЗ состоит в гибком сочетании эвристических способностей ЛПР на основе использования визуальных интерпретаций ГАБП в процессе оптимизации сложных систем программного управления прямыми (ситуационными и т.п.) поисковыми методами, кроме этого предоставлена возможность осуществлять фиксацию процедур принятия решений на всех этапах жизненного цикла СнК ЭСТЗ в виде графоаналитических вычислительных таблиц, каждая из которых представляет уникальную визуальную составляющую поведенческих моделей сложно-функциональных блоков эргатических систем многоагентного управления сетевыми субъектами и объектами интеллектуальной собственности (ОИС) ЭКБ ЭСТЗ в целом.

В результате в работе рассмотрены методы и модели последовательного синтеза поведенческих моделей сложно-функциональных блоков (СФ-блоков) систем на кристалле (СнК) человеко-машинных (эргатических) систем многоагентного ситуационного управления (ЭСМСУ) субъектами и объектами интеллектуальной собственности (ОИС). Процессы наблюдения за поведением СФ-блоков в составе СнК могут поддерживаться агентами ЭСМСУ не только на уровне контроля функций взаимодействия между субъектами и объектами ИС, но и на уровне мониторинга (оценки) физических характеристик (вектора состояния) СнК. При этом применение разработанного аппарата

графоаналитического исчисления ГАБП обеспечивает обработку (фиксацию, сжатие и отображение) многомерных данных (МД, числовых массивов и т.п.) вектора состояния СнК ЭСМСУ ОИС на основе использования подвижно-взаимосвязанной системы координат, у которой в качестве основного графического примитива использованы не точечные объекты, а основные объекты проективной геометрии – прямые линии и соответствующие рекурсивные выражения и функции. Синтез приемлемых для зрительного восприятия ЛПР отображений МД на плоскости монитора осуществляется на основе использования графоаналитических объектов (графических вычислительных таблиц, графоаналитических бинарных полей и т.п.) и применения аппарата проективных групп Ли. Разработанные методы позволяют осуществлять синтез поведенческих моделей СФ-блоков эргатических систем многоагентного ситуационного управления сетевыми субъектами и объектами интеллектуальной собственности в реальном масштабе времени на всех этапах жизненного цикла СнК ЭСМСУ ОИС, при этом реализации СнК могут быть выполнены в виде специализированных микросхем (Application Specific Integrated Circuit, ASIC).

## Литература

1. *Ботуз С.П.* Методы и модели виртуальной цифровой платформы проектирования и сопровождения субъектов и объектов сетевых нематериальных активов / В наст. сб. докл.
2. *Ботуз С.П.* Аппаратно-программный комплекс многоагентного синтеза патентоспособных эргатических систем технического зрения / Секция 2: Методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами / Труды Тринадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2020), Под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, ИПУ РАН, 2020, с. 286-297.
3. *Адамов Ю.Ф.* Проектирование систем на кристалле [Электронный ресурс] / Ю.Ф. Адамов. Режим доступа: <http://os.x-pdf.ru/20raznoe/497624-1-proektirovanie-sistem-kristalle-moskva-oglavlenie-oglavlenie-sov.php> (дата обращения: 10.03.2021).
4. *ASTM F 978-02* : Standard test method for characterizing semiconductor deep levels by transient capacitance techniques // Annual Book of ASTM Standards. 2002. Vol. 10.05. P. 489-496.
5. *AS6171-2018* : Test Methods Standard; General Requirements, Suspect/Counterfeit, Electrical, Electronic, and Electromechanical Parts [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/557367151> (дата обращения: 10.03.2021).
6. *Ботуз С.П., Крылов В.П.* Методы и модели радиационно-стойкого проектирования бортовых систем технического зрения / Научно-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления – 2021», сб. тез. ИКИ РАН, ИПМ РАН, ГосНИИАС. – М.: ИКИ РАН, 2021, с. 25 – 26.
7. *Ботуз С.П., Крылов В.П., Пронин Т.Ю. и др.* Программный комплекс интеллектуальной системы интерактивного синтеза семантических моделей поискового проектирования и экспертизы радиационно-стойких электронных средств беспилотных космических аппаратов / Ботуз С.П., Крылов В.П., Пронин Т.Ю., Немытова О.А., Летникова М.Н., Догадкин А.В., Назимкин А.Е., Самошкин А.А., Шадрин Д.О. / РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2015617142 от 01.07.2015.
8. *Крылов В.П., Богачев А.М.* Релаксация глубоких центров в транзисторах и интегральных микросхемах / Известия высших учебных заведений. Электроника. 2020. Т. 25. № 6. С. 568-572.
9. *Берман Л.С., Лебедев А.А.* Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. 176 с.
10. *Солодовников В.В., Бирюков В.Ф., Тумаркин В.И.* Принцип сложности в теории управления (о проектировании технически оптимальных систем и проблеме корректности). – М.: Наука, 1977. 377с.
11. *Ботуз С.П.* Автоматизация исследования, разработки и патентования позиционных систем программного управления. – М.: Наука. Физматлит, 1999. – 316с.
12. *Ботуз С.П., Новиков Д.А.* Идентификация объектов и субъектов интеллектуальной собственности в сети Internet / Труды II междунар. научн. конф. “Идентификация систем и задачи управления” (SICPRO '03) 28–31 января 2003г. – М.: ИПУ РАН, 2003, – С. 2033 – 2041.