

# Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени<sup>1</sup>

**Аннотация.** Решается задача когнитивного отображения состояний динамических систем со сложной иерархической структурой, предназначенного для поддержки принятия решений человека-оператора, осуществляющего мониторинг и управление в режиме реального времени. Выполнен обзор методов образного графического представления информации о состоянии многомерных объектов и систем. Основные характеристики рассмотренных методов визуализации сведены в обобщающую таблицу. Разработан когнитивный образ, основанный на методе трехуровневого интегрального контурного представления информации, и рассмотрен пример его практического применения в задаче обнаружения аномального поведения датчиков космических аппаратов.

**Ключевые слова:** когнитивный образ, комплексная система, космический аппарат, диагностика, динамическая система.

## Введение

В настоящее время нет единых принципов построения когнитивных образов, способных нести в сжатой и одновременно с этим доступной для пользователя форме информацию, достаточную для принятия адекватного решения. Как правило, образы создаются индивидуально с учетом конкретной прикладной области и интерпретируются экспертом на основе накопленных знаний. Многомерные данные с помощью ЭВМ могут быть соотнесены в когнитивный графический образ в виде интегральных функциональных профилей или сцен, отражающих особенности состояния объекта [1]. Однако существующие математические методы анализа и визуализации многомерных данных плохо применимы к динамическим системам реального времени (ДСРВ) и не обладают достаточной универсальностью, что препятствует их широкому внедрению в различные прикладные области.

Целью настоящей работы является разработка нового метода визуализации для отображения состояний сложной динамической системы, обладающей следующими особенностями:

- основным звеном управления системой является человек-оператор;
- функционирование происходит в режиме реального времени;
- архитектура системы является иерархической;
- применяются различные шкалы и диапазоны изменений контролируемых параметров,
- имеют место пропуски в потоках данных и сбои в работе [2];

Для визуализации текущего состояния в системе указанного типа необходим когнитивный графический образ, соответствующий следующим требованиям [3,4]:

- наличие математического аппарата преобразования пространства признаков в пространство образов;
- выразительность образов, ускоряющая понимание оператором текущей ситуации;

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках СЧ НИР шифр «Мониторинг-СГ-1.2.5.1» по Программе Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-29-06945-офи\_м «Развитие моделей, методов и программных средств обработки мультиспектральных снимков, видео-потоков и данных телеметрии для задач космического мониторинга арктической зоны»).

- однозначное и точное отображение класса ситуации «normal» («норма»), «anomaly» («аномалия»), «critical» («критическая»), «no info» («отсутствие информации»);

- возможность отображения состояния системы в целом и состояний отдельных ее подсистем на всех уровнях иерархии;

- возможность отображения параметров с указанием уровня отклонения от среднего значения на допустимом рабочем диапазоне;

- наличие единого формализма описания отношений, важных для принятия решений в признаковом пространстве большой размерности.

В данной работе выполнен аналитический обзор и дана классификация готовых решений в области образного анализа данных. Разработан метод построения когнитивного образа, соответствующего перечисленным требованиям.

## 1. Обзор методов представления информации о состоянии многомерных объектов и систем

Рассмотрим различные типы графических представлений, предложенные исследователями для мониторинга сложных объектов. Обобщение подобных представлений, очевидно, может быть полезным для решения поставленной задачи.

### 1.1. Способы визуализации и классификации $n$ -мерного объекта

Самым распространенным способом представления  $n$ -мерного объекта является точка, спроецированная в двумерное или трехмерное пространство. Например, в диссертационном исследовании [5] предложен способ диагностики состояния сердечно-сосудистой системы путем формирования и визуализации многомерного образа. Двумерные модели болезней формируются путем отображения на плоскость точек  $n$ -мерного пространства заболевания. Цвет двумерной области соответствует определенному виду заболевания, а степень патологии характеризуется величиной, обратно пропорциональной длине волны соответствующего диапазона. Описанный подход не применим к ДС РВ, так как требует от оператора существенных временных затрат для понимания ситуации.

В работах [3,4] описан логико-вероятностный подход к формированию когнитивного образа, который позволяет визуально определить близость ситуации к аномальной. Коэффициенты сходства (близости к образам) отображаются с использованием  $n$ -симплекса [6], граням которого сопоставляются образы (классы), а каждому образу ставится в соответствие определенный цвет. Для отображения параметров исследуемых процессов и сравнения их между собой предложен образ «мишень» в виде круговой диаграммы, разбитой на сектора. Предложенный метод применим для экспресс-анализа и не рассчитан на длительный мониторинг объекта.

Термином «интегральное контурное представление» называют взаимно-однозначное отображение вектора в односвязный контур, при котором положение большинства его точек определяется значениями всех координат этого вектора [7]. Один из вариантов такого представления реализуется следующим образом:  $\rho(\varphi) = \left| \sum_{k=1}^D x_k \sin k\varphi \right|$ , где  $\rho$  и  $\varphi$  – полярные координаты точек контура, а  $x_k$  – координаты отображаемого вектора. Согласно указанной формуле формируется односвязный контур, называемый «звезда», все точки которого видны из начала координат. Каждая точка когнитивного образа представляет линейную комбинацию всех или части  $x_k$  [8].

Для визуализации многоуровневых иерархий используют корневые деревья, круговые диаграммы и фракталы. В работе [9] представлен метод 3D-визуализации иерархических структур, имеющий название «ботаническое дерево». Пятнами на «фруктах» дерева предлагается отображать значения контролируемых параметров, а размером и цветовым кодом «фруктов» – состоянием подсистем. Трехмерная модель дерева вынуждает оператора манипулировать образом вручную, чтобы увидеть полную картину происходящих в системе изменений, что не всегда возможно в реальном времени.

Методы визуализации, предложенные в работах [5-9], обладают достаточной выразительностью, позволяющей понять состояние отдельного объекта. Однако указанные способы не предназначены для отображения состояния комплексной системы в целом и состояний отдельных ее подсистем, меняющихся в процессе их функционирования. Следовательно, рассмотренные когнитивные образы не применимы для визуализации состояний сложной ДС РВ.

## 1.2. Методы визуализации аномальных событий в работе сложных динамических систем реального времени

Фрактальный метод удобен для сигнализации об аномалиях, которые можно отображать цветовым кодом в узлах и листьях графа, как это сделано в работе [10]. Автором создан когнитивный образ для диагностики систем энергетического реактора. Разработан метод формирования цветового режима, распределяющий все возможные состояния сегментов когнитивного образа по четырем цветовым категориям. Интерфейс, содержащий когнитивную поддержку принятия решений, позволяет вручную просматривать состояния системы во времени, что является преимуществом данного подхода. Образ подходит для иерархии с размерностью кратной четырем, поэтому он не применим для отображения подсистем с большей степенью вложений.

В работе [11] предлагается набор графических динамических компонент и правил, описывающих их технологическое взаимовлияние в различных ситуациях. Когнитивный образ электростанции в целом представляет собой вращающийся глобус. Переменными состояниями глобуса являются параллели, меридианы, оси по полюсам и экватору, скорость вращения глобуса относительно осей и маркировки на глобусе. Искажения глобуса свидетельствуют о проблемных ситуациях, для преодоления которых необходимы управляющие действия. Когнитивный образ энергоблока при нормальном режиме работы состоит из зеленого креста и четырех зеленых кругов. При аномальных явлениях происходит изменение размеров и цвета креста и соответствующих секторов.

В интерфейсе [12] предлагается когнитивное представление ситуации на контролируемых трансформаторах. В целом, структура рассмотренного интерфейса соответствует трехуровневому способу представления информации о состоянии сложных систем: линий электропередачи, шин и трансформатора.

Предлагаемая в работе [13] трехуровневая система представления информации о контролируемом объекте включает уровни системы, подсистемы и параметров. Обобщенный динамический образ, соответствующий уровню системы, представляет собой круговую диаграмму, разбитую на сектора, в которой каждый сектор соответствует отдельному процессу.

Аварийные процессы отмечаются красным цветом сектора, неактивные процессы – светло-зеленым, активные – ярко-зеленым. Для отображения состояния подсистем предлагается использовать сегментное представление и полярную развертку полученных двоичных векторов. Для отображения уровня параметров использован интегральный контурный метод. Диапазон допустимых значений параметров задает ограничивающее кольцо.

Когнитивные образы, представленные в работах [11-13], соответствуют почти всем требованиям, но привязаны к конкретным системам. Поэтому их достаточно сложно адаптировать для других сложных ДС РВ.

## 1.3. Когнитивные образы для прогнозирования и визуализации отклонений

В работе [14] рассмотрен пример цветового кодирования для отображения контролируемого параметра телеметрической информации на основе оценочной функции. Предлагается вычислять нелинейную оценочную функцию, которая показывает степень отклонения параметра от состояния «норма» и приближение его к состоянию «аномалия». Представлен пример нелинейной оценочной функции для температуры на контролируемом блоке. Показано, что при изменении температуры на одну и ту же величину значимости ситуаций и величины изменений оценочных функций могут существенно отличаться. В качестве практического применения оценочной функции для поддержки принятия решений по состоянию объекта предложен способ цветового кодирования на средствах отображения информации, предназначенных для специалистов оперативной группы управления космическими аппаратами (КА). Такой способ позволяет визуально прогнозировать влияние изменений параметра на состояние системы. Однако цветовое кодирование на основе оценочной функции не предусмотрено для предоставления информации о состоянии на более высоких уровнях иерархии сложного объекта.

Когнитивные образы получили широкое распространение в экономических исследованиях, например в работе [15] обоснованы методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе нечетких когни-

тивных карт. В общем случае когнитивная карта представляет собой причинно-следственную сеть, отражающую какую-либо область знаний и допускающую следующее формальное представление:  $G = \langle E, W \rangle$ , где  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – множество концептов,  $W$  – бинарное отношение на множестве  $E$ , задающее связи между его элементами. Для изменения значений концептов разработан интерактивный интерфейс с возможностью непосредственного изменения цветографических изображений. Интерфейс позволяет отслеживать прямое влияние управляемых концептов на целевые с учетом того, что они не имеют прямой взаимосвязи. Предложенный способ подходит для научного анализа данных, но не применим для ДС РВ.

#### 1.4. Сравнительные характеристики когнитивных образов

Из обзора методов построения когнитивных образов следует, что для мониторинга сложных ДС РВ наиболее эффективны многоуровневые способы представления ситуации. Число уровней в практических приложениях не превышает трех, так как их увеличение усложняет восприятие и снижает оперативность анализа состояний. Результаты обзора сведены в таблицу.

Анализ таблицы показывает, что сформулированным требованиям наилучшим образом удовлетворяют методы визуализации, предложенные в работах [10-13]. Самым универсальным способом следует признать когнитивное

Сравнение характеристик методов когнитивного представления ситуаций

№	Название	Назначение	Виды контролируемых систем		Уровень отклонения	Универсальность
			ДС РВ	Сложные иерархии		
1	2	3	4	5	6	7
1	Многомерный образ сердечно-сосудистой системы [5]	Диагностика сердечно-сосудистой системы	-	-	+	-
2	n-симплекс [3, 4]	Распознавание образов	-	+	+	+
3	Мишень [3]	Распознавание образов	-	+	+	-
4	Звезда [7]	Графическое представление многомерных данных	+	-	-	+
5	Ботаническое дерево [9]	Визуализация сложных иерархий	-	+	-	-
6	Фрактал Новоселова [10]	Диагностика и визуализация для сложного технического объекта	+	+	-	+
7	Образ для системы поддержания избыточного давления в баке [13]	Диагностика и визуализация для сложного технического объекта	+	+	+	-
8	Образ для операторов атомных электростанций [11]	Отображение аномалий и текущей ситуации при работе сложного объекта	+	+	+	-
9	Цветовое кодирование на основе оценочной функции [14]	Оценка соответствия состояния КА плановому на определенный момент времени	+	-	+	-
10	Образ электрической сети большого размера [12]	Диагностика и визуализация для сложного технического объекта	+	+	+	-
11	Образ барабана-сепаратора [16]	Поддержка принятия решений операторов атомных электростанций	+	-	+	-
12	Интеграл Шоке [17]	Выбор ограничений на параметры нечеткого оператора агрегирования взаимосвязанных критериев	-	-	+	-
13	Нечеткие когнитивные карты [15]	Поддержка принятия решений аналитика	-	-	+	-

представление информации с помощью фрактала [10]. Тем не менее, он имеет несколько недостатков, которые снижают его эргономические качества, а именно: большое количество мелких деталей, малая допустимая кратность вложения и отсутствие числовой информации на слайде когнитивного образа.

## 2. Метод построения универсального когнитивного образа

Для формирования образа, соответствующего указанным требованиям, будем использовать трехуровневую систему отображения информации, предложенную в работе [13]. За основу преобразования пространства параметров в пространство графических образов возьмем метод интегрального контурного представления [7, 8, 13]. Следует отметить, что «звезда», предложенная в работе [7], имеет в своей основе «полярную розу», которая относится к классу замечательных кривых [18]. Проведем поиск и выполним исследование других замечательных кривых, пригодных для отображения состояний сложных систем в виде интегрального контурного представления. Рассмотрим эпициклоиду и гипоциклоиду [19]. На основе их свойств получим параметрические уравнения для частных видов: обыкновенной эпициклоиды

$$\begin{cases} x = (R + d) \cos \varphi - d \cos(m + 1) \varphi \\ y = (R + d) \sin \varphi - d \sin(m + 1) \varphi \end{cases} \quad (1)$$

и обыкновенной гипоциклоиды

$$\begin{cases} x = (R - d) \cos \varphi + d \cos(m - 1) \varphi \\ y = (R - d) \sin \varphi - d \sin(m - 1) \varphi \end{cases} \quad (2)$$

где  $R$  – радиус неподвижной окружности;  $r$  – радиус катящейся окружности;  $d = r$  – расстояние точки  $M$  от центра  $C$  производящего круга;  $\varphi$  – параметр, обозначающий угол наклона отрезка между центрами окружностей к оси  $OX$ ;  $m$  – целое число,  $m = R/r$ .

При повороте около центра  $O(x_0, y_0)$  на угол, кратный  $\frac{2\pi r}{R}$ , эпициклоида (гипоциклоида) совмещается сама с собой. Как эпициклоида, так и гипоциклоида состоят из  $m$  конгруэнтных ветвей. Пусть  $j$  – номер ветви и  $j = 1, \dots, m$ , тогда из формул (1) и (2) получим параметрические уравнения для  $j$ -ой конгруэнтной ветви эпициклоиды:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + d) \cos \psi - d \cos(m + 1) \psi \\ y = y_0 + (R + d) \sin \psi - d \sin(m + 1) \psi \end{cases} \quad (3)$$

и гипоциклоиды:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R - d) \cos \psi + d \cos(m - 1) \psi \\ y = y_0 + (R - d) \sin \psi - d \sin(m - 1) \psi \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_0$  и  $y_0$  – координаты центра неподвижной окружности,  $\psi \in [j\alpha, (j + 1)\alpha]$ ,  $\alpha = \frac{2\pi}{m}$ . Из уравнений (3) и (4) получим обобщенную формулу для ветвей эпициклоиды и гипоциклоиды:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + \xi d) \cos \psi - \xi d \cos(m + \xi) \psi \\ y = y_0 + (R + \xi d) \sin \psi - \xi d \sin(m + \xi) \psi \end{cases} \quad (5)$$

где  $\xi = 1$  для эпициклоиды и  $\xi = -1$  для гипоциклоиды.

Пусть контролируемая система характеризуется множеством параметров  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_m\}$ . Предлагается использовать формулу (5) как основу интегрального контурного представления для решения задачи обнаружения выхода значений параметров  $z_j$  за пределы допустимого рабочего диапазона  $[z_{j \min}, z_{j \max}]$ . Примем  $d$  равным значению параметра  $z_j$ , нормализованного в интервал  $[-\delta, \delta]$ . Для нормализации будем использовать формулу:

$$\bar{z}_j = \delta \left( 2 \left( \frac{z_j - z_{j \min}}{z_{j \max} - z_{j \min}} \right) - 1 \right), \quad \text{где } \delta = \frac{R}{2\Phi^2},$$

$\Phi$  – коэффициент золотого сечения [20]. Тогда, если параметр  $z_j$  равен среднему значению в допустимом диапазоне, то  $d = \bar{z}_j = 0$  и кривая (5) является частью окружности. Если  $\bar{z}_j < 0$ , то кривая (5) является конгруэнтной ветвью гипоциклоиды. Если  $\bar{z}_j > 0$ , то кривая (5) является конгруэнтной ветвью эпициклоиды.

Заменим в формуле (5)  $\xi d$  на  $\bar{z}_j$ , а  $d$  на  $|\bar{z}_j|$ , тогда вид кривой (5) будет определяться отклонением контролируемого параметра от среднего значения на допустимом диапазоне:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + \bar{z}_j) \cos \psi - \bar{z}_j \cos(m + \eta) \psi \\ y = y_0 + (R + \bar{z}_j) \sin \psi - |\bar{z}_j| \sin(m + \eta) \psi \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{где } \eta = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{z}_j > 0 \\ -1, & \text{если } \bar{z}_j < 0 \\ 0, & \text{если } \bar{z}_j = 0 \end{cases}$$

В случаях, если  $z_j = q_1 z_{j \min}$ ,  $q_1 > 1$  или когда  $z_j = q_2 z_{j \max}$ ,  $q_2 > 1$ ,  $\{q_1, q_2\} \in R$ , то  $d$ , соответствующее  $|\bar{z}_j|$ , будет больше  $r$ , а кривая (6) будет являться ветвью удлиненной эпициклоиды.

лоиды или гипоциклоиды и образовывать «петли». Для исключения «петель» заменим ветвь эпициклоиды на эллиптическую дугу, если  $\bar{z}_j > r$ , а ветвь гипоциклоиды – на ветвь гиперболы, если  $\bar{z}_j < -r$ . Скорректируем формулу (6) согласно введенным уточнениям:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + \bar{z}_j) \cos \psi - \bar{z}_j \cos(m + \eta) \psi \\ y = y_0 + (R + \bar{z}_j) \sin \psi - |\bar{z}_j| \sin(m + \eta) \psi \end{cases} \quad \text{если } -r \leq \bar{z}_j \leq r$$

$$\begin{cases} x = x_0^e + a^e \cos \beta \cos \tau - b^e \sin \beta \sin \tau \\ y = y_0^e + a^e \cos \beta \sin \tau + b^e \sin \beta \cos \tau \end{cases} \quad \text{если } \bar{z}_j > r, \quad (7)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + a^h \cosh \theta \cos \tau - b^h \sinh \theta \sin \tau \\ y = y_0 + a^h \cosh \theta \sin \tau + b^h \sinh \theta \cos \tau \end{cases} \quad \text{если } \bar{z}_j < -r$$

где  $\tau = j\alpha + \frac{\alpha}{2}$  – угол поворота эллипса или гиперболы вокруг точки  $O(x_0, y_0)$ ,  $x_0^e = x_0 + R \cos \frac{\alpha}{2} \cos \tau$ ,  $y_0^e = y_0 + R \cos \frac{\alpha}{2} \sin \tau$ ,  $a^e = 2\bar{z}_j + R - R \cos \frac{\alpha}{2}$  – большая полуось эллипса,  $b^e = R \sin \frac{\alpha}{2}$  – малая полуось эллипса,  $a^h = R + 2\bar{z}_j$  – действительная полуось гиперболы,  $b^h = \frac{a^h R \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{(R \cos \frac{\alpha}{2})^2 - (a^h)^2}}$  – мнимая полуось гиперболы,  $\theta \in [-2\pi, 2\pi]$ ,  $\beta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ .

### 3. Практическое применение когнитивного образа для контроля состояний подсистем космического аппарата

В качестве практического применения когнитивного образа, описываемого формулой (7), рассмотрим задачу обнаружения аномалий при диагностике данных с датчиков КА, составляющих группировку целевого назначения. На Рис. 1 показана иерархия в группировке космических аппаратов.

Сформулируем постановку задачи в математической форме. Будем называть группировку КА комплексной системой  $S$ . Пусть  $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_t, \dots, \zeta_n\}$  – множество состояний  $S$  в дискретные отсчеты времени  $t$ . Система  $S$  включает  $\mu$  контролируемых объектов, т.е.  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_\omega, \dots, S_\mu\}$ . Объект  $S_\omega$  состоит из  $k$  подсистем, т.е.  $S_\omega = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_k\}$ . Состояние подсистемы  $s_i$  характеризуется набором из значений  $m$  параметров, т.е.

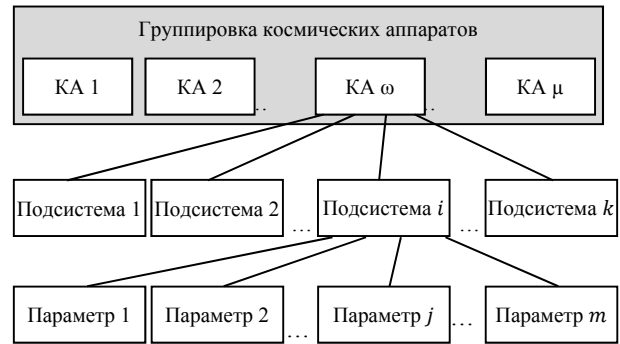


Рис. 1. Схема иерархии в группировке космических аппаратов

$s_i(t) = \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ij}(t), \dots, p_{im}(t)\}$ , где  $p_{ij}(t)$  – значение  $j$ -го параметра подсистемы с номером  $i$  в дискретный отсчет времени  $t$ . Каждый параметр  $p_{ij}$  имеет допустимый рабочий диапазон  $[p_{ij \min}, p_{ij \max}]$ . Обозначим  $Classes = \{\text{«normal»}, \text{«anomaly»}, \text{«critical»}, \text{«no info»}\}$  – множество классов параметров, подсистем и объектов в дискретные отсчеты времени  $t$ .

Для решения задачи когнитивного отображения аномалий при диагностике данных с датчиков КА, составляющих группировку целевого назначения, предлагается разработать образы для трех уровней комплексной системы: параметры, подсистемы КА, группировка КА.

#### 3.1. Разработка образа для уровня параметров

На данном уровне анализируются данные, полученные от большого количества датчиков, и отображаются отклонения параметров от заданного рабочего диапазона. Найдем для каждого параметра  $p_{ij}$  значение  $p_{ij \text{ mean}} = (p_{ij \max} + p_{ij \min})/2$ . Будем называть  $p_{ij \text{ mean}}$  средним допустимым значением.

Обозначим:

- $P = \|p_{ij}(t)\|$  ( $j = \overline{1, m}; t = \overline{1, n}$ ) – матрица значений, которые принимают  $j$ -е параметры подсистемы  $s_i$  в дискретные отсчеты времени  $t$ ;

- $\bar{P} = \|\overline{p_{ij}(t)}\|$  ( $j = \overline{1, m}; t = \overline{1, n}$ ) – матрица нормированных значений параметров, где  $\overline{p_{ij}(t)} = \delta \left( 2 \left( \frac{p_{ij}(t) - p_{ij \min}}{p_{ij \max} - p_{ij \min}} \right) - 1 \right)$ .

Тогда получим:  $\overline{p_{ij \min}} = -\delta$ ,  $\overline{p_{ij \max}} = \delta$ ,  $\overline{p_{ij \text{ mean}}} = 0$ .

Воспользуемся формулой (7). Выполнив подстановку  $\bar{z}_j = p_{ij}(t)$ , получим способ отоб-

ражения параметров в дуги кривых. Присвоим каждому классу параметров цвет, опознаваемый с высокой точностью и имеющий однозначную интуитивную интерпретацию:

- *LightGreen*, если  $p_{ij}(t) \in \langle \text{normal} \rangle$ ;
  - *Red*,
- если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{anomaly} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) > p_{ij \max})$ ;
- *DarkBlue*,
- $(p_{ij}(t) \in \langle \text{anomaly} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) < p_{ij \min})$ ;
- *Yellow*,
- если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{critical} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) = p_{ij \max})$
- *RoyalBlue*,
- если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{critical} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) = p_{ij \min})$ ;
- *LightGray*, если  $p_{ij}(t) \in \langle \text{no info} \rangle$ .

Затем выполним закраску фигуры, ограниченной дугой окружности и кривой (7), тем цветом, который соответствует параметру  $p_{ij}(t)$ , по вышеуказанным правилам. В результате произведенных вычислений были получены образы для групп контролируемых параметров КА «Юбилейный», представленные на

Рис. 2. Пунктирной линией темно-зеленого цвета обозначена окружность (средняя) радиуса  $R$ , задающая средние допустимые значения. Диапазон допустимых значений параметров представлен графически как кольцо, ограниченное окружностями радиусов  $R + \delta$  и  $R - \delta$ . Ограничивающие окружности (внутренняя и наружная) обозначены пунктирными линиями коричневого цвета. Назначение предложенного когнитивного образа состоит в следующем. Если параметры принимают значения из допустимого диапазона, то в ограничивающем кольце когнитивного образа появляются лепестки (темно-серые) эпициклоид и гипоциклоид, заполненные зеленым цветом (Рис.2, а). Размер лепестков соответствует величине отклонения параметра от среднего значения на допустимом диапазоне. Лепестки эпициклоид соответствуют параметрам, превышающим свои средние допустимые значения ( $p_{ij}(t) > p_{ij \text{mean}}$ ). Лепестки гипоциклоид – параметрам, значения которых меньше их средних допусти-

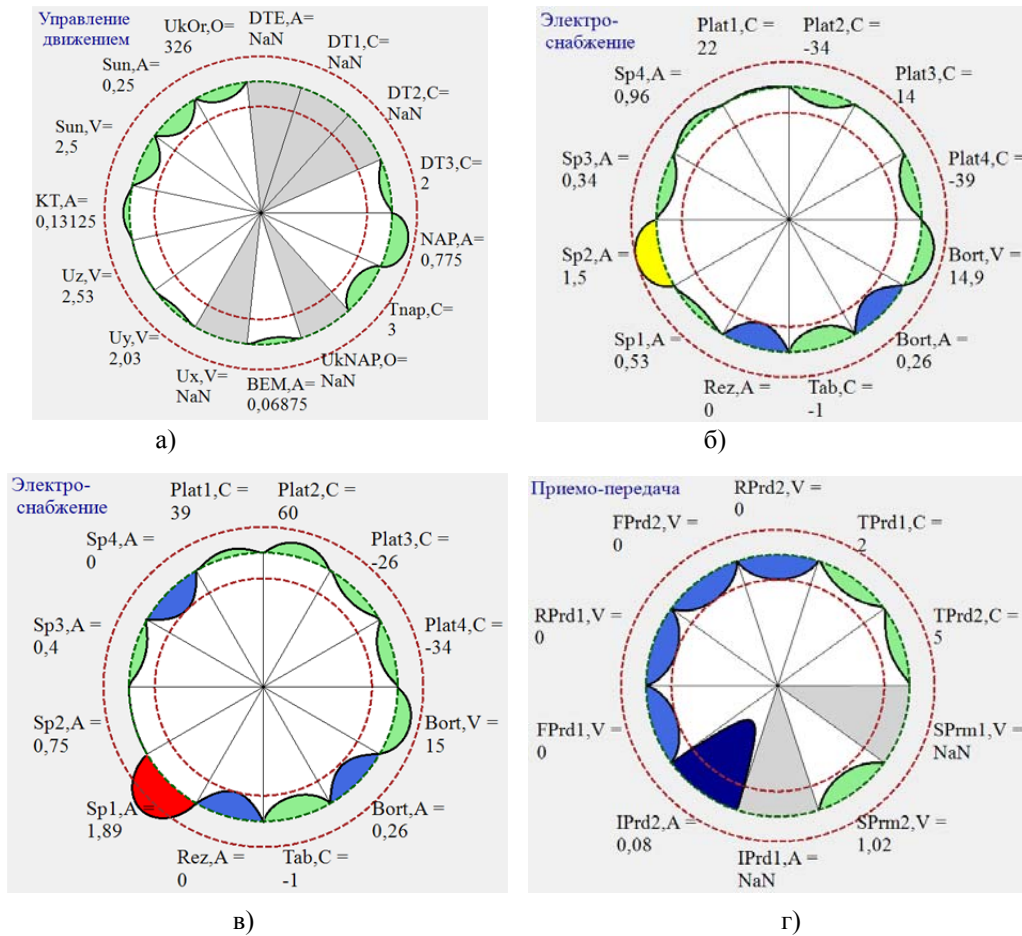


Рис. 2. Отображение параметров, сгруппированных в подсистемы

мых значений ( $p_{ij}(t) < p_{ij\text{mean}}$ ). Если какой-либо лепесток окрасился в голубой цвет (два внизу), то значит соответствующий параметр достиг допустимого нижнего предела (Рис.2, б). Если в желтый (один слева) – достиг верхнего предела. Если в когнитивном образе лепесток приобрел красный цвет (внизу слева), то это говорит о превышении параметром допустимого максимального значения (Рис.2, в). Если синий (выступ темного цвета) – значение параметра меньше допустимого нижнего предела (Рис.2, г).

### 3.2. Разработка образа для подсистем космического аппарата

Для всех уровней иерархии в сложной системе предлагается формировать единообразные когнитивные образы. На когнитивном изображении, представляющем отдельный объект, следует отмечать в каких его подсистемах параметры вышли за пределы допустимых значений. Для этой цели предлагается визуализировать информацию одновременно о максимальном и минимальном значениях в каждой подсистеме наблюдаемого объекта. Сформулируем решение второй подзадачи в математической форме. Пусть  $p_{i\text{min}}(t)$  – минимальное среди нормированных отрицательных значений параметров подсистемы  $s_i$ , зафиксированных в момент времени  $t$  и  $p_{i\text{min}}(t) \in \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ij}(t), \dots, p_{im}(t)\}$ ;  $p_{i\text{max}}(t)$  – максимальное значение среди нормированных положительных параметров,  $p_{i\text{max}}(t) \in \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ij}(t), \dots, p_{im}(t)\}$ . Выполним подстановки:  $\bar{z}_j = p_{i\text{min}}(t), j = i, m = k$ , получим кривую для минимального значения параметра в подсистеме:

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + p_{i\text{min}}(t)) \cos \psi - p_{i\text{min}}(t) \cos(k-1) \psi \\ y = y_0 + (R + p_{i\text{min}}(t)) \sin \psi + p_{i\text{min}}(t) \sin(k-1) \psi' \end{cases} \text{ если } -r \leq p_{i\text{min}}(t) \leq 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + a^h \cosh \theta \cos \tau - b^h \sinh \theta \sin \tau \\ y = y_0 + a^h \cosh \theta \sin \tau + b^h \sinh \theta \cos \tau' \end{cases} \text{ если } p_{i\text{min}}(t) < -r$$

Выполним подстановки:  $\bar{z}_j = p_{i\text{max}}(t), j = i, m = k$ , получим кривую для максимального значения параметра в подсистеме:

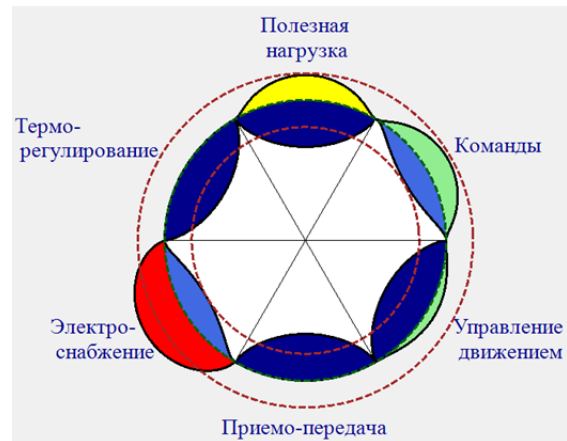


Рис. 3. Когнитивный образ космического аппарата «Юбилейный»

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + p_{i\text{max}}(t)) \cos \psi - p_{i\text{max}}(t) \cos(k+1) \psi \\ y = y_0 + (R + p_{i\text{max}}(t)) \sin \psi - p_{i\text{max}}(t) \sin(k+1) \psi' \end{cases} \text{ если } 0 < p_{i\text{max}}(t) \leq r \quad (9)$$

$$\begin{cases} x = x_0^e + a^e \cos \beta \cos \tau - b^e \sin \beta \sin \tau \\ y = y_0^e + a^e \cos \beta \sin \tau + b^e \sin \beta \cos \tau' \end{cases} \text{ если } p_{i\text{max}}(t) > r$$

Выполним закраску фигур, ограниченных дугами окружности и кривыми (8) и (9), тем цветом, который по вышеуказанным правилам соответствует параметрам  $p_{i\text{min}}(t)$  и  $p_{i\text{max}}(t)$ . В результате применения перечисленных действий для контроля телеметрии КА «Юбилейный» получен образ, представленный на Рис. 3.

### 3.3. Разработка образа для группировки космических аппаратов

Предлагается для визуализации уровня комплексной системы формировать такое же когнитивное графическое изображение, как и для уровня подсистем. Для этого в формулы (8) и (9) подставим вместо  $p_{i\text{min}}(t)$  и  $p_{i\text{max}}(t)$  параметры  $p_{\text{min}}$  и  $p_{\text{max}}$  – минимальное и максимальное из всех значений параметров объекта  $S_\omega$ , зафиксированных в момент времени  $t$ . На Рис. 4 представлен когнитивный образ для группировки космических аппаратов, где видно, что один из космических аппаратов, входящих в наблюдаемую группу, работает в нештатном режиме. У всех остальных КА значения параметров находятся в пределах допустимых рабочих диапазонов.



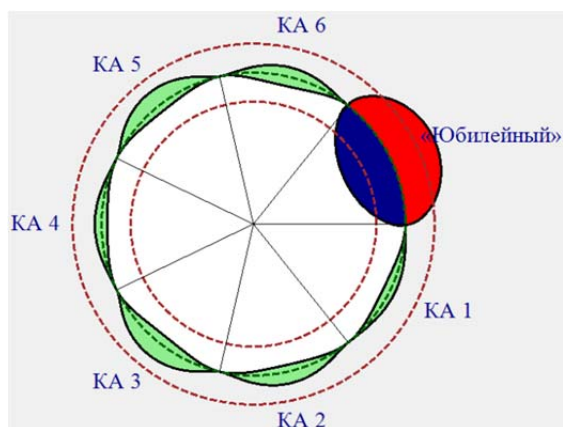


Рис. 4. Когнитивный образ группировки космических аппаратов

### 3.4. Отображение тенденции изменений в значениях наблюдаемых параметров

Во время работы ДС РВ возможны краткосрочные выбросы в значениях параметров, которые могут остаться незамеченными лицом, принимающим решение, при большой скорости изменений в графических изображениях. Поэтому в каждом секторе когнитивного образа предлагается отмечать классы нескольких предыдущих состояний той части системы, которую представляет данный сектор (параметр, подсистема объекта, объект). Количество предыдущих состояний выбирает оператор. Для каждого класса предыдущего состояния в образе параметров приняты следующие цветовые обозначения:

- *DarkGreen*, если  $p_{ij}(t) \in \langle \text{normal} \rangle$ ;
- *Firebrick*,

если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{anomaly} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) > p_{ij \max})$ ;

- *MidnightBlue*,

если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{anomaly} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) < p_{ij \min})$ ;

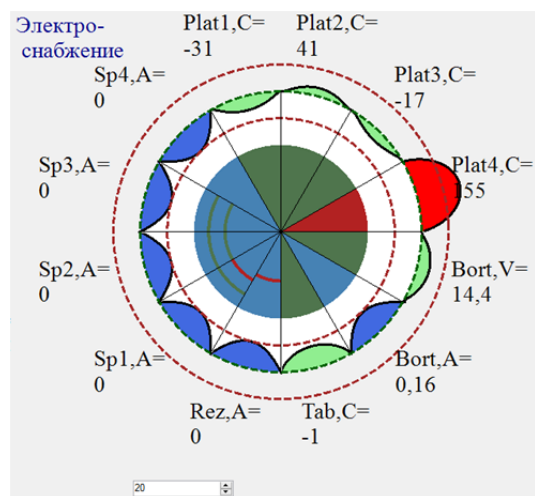
- *Gold*, если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{critical} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) = p_{ij \max})$ ;
- *SteelBlue*,

если  $(p_{ij}(t) \in \langle \text{critical} \rangle) \wedge (p_{ij}(t) = p_{ij \min})$ ;

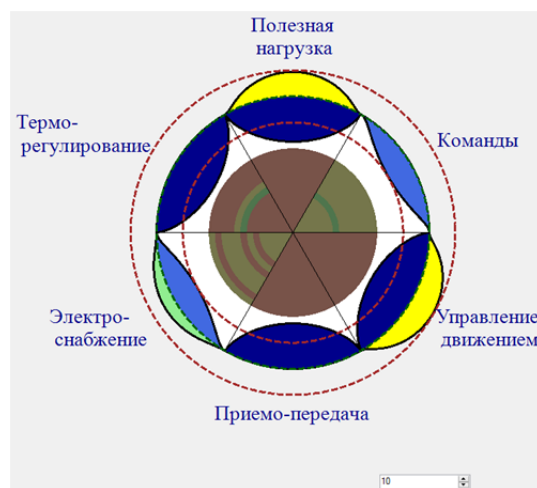
- *DarkGray*, если  $p_{ij}(t) \in \langle \text{no info} \rangle$ .

Полученный образ представлен на Рис.5,а. Для каждого класса предыдущего состояния подсистемы и объекта приняты следующие цветовые обозначения:

- *DarkGreen*, если  $\langle \text{normal} \rangle$ ;
- *Brown*, если  $\langle \text{anomaly} \rangle$ ;
- *Olive*, если  $\langle \text{critical} \rangle$ ;
- *DarkGray*, если  $\langle \text{no info} \rangle$ .



а)



б)

Рис. 5. Когнитивные образы с отображением классов предыдущих состояний

Когнитивный образ объекта, включающий представление нескольких предыдущих состояний его подсистем, приведен на Рис.5, б.

На Рис.5, а видно, что за предыдущие 20 временных отчетов сила тока на первой панели солнечной батареи (Sp1,A) и на аккумуляторной батарее (Rez,A) совершила скачки, превышающие заданное максимальное допустимое значение. На Рис.5, б отражена тенденция изменений в состояниях подсистем КА за предыдущие 10 временных отчетов.

### Заключение

С целью улучшения эргономических качеств интерфейса для оператора сложной ДС РВ разработана трехуровневая система универсальных

когнитивных образов, соответствующих заявленным требованиям. Предложенный метод когнитивного представления ситуации сочетает графическое и числовое отображение контролируемых параметров. Данная визуализация позволяет оператору моментально обнаружить объект системы, работающий в аномальном режиме, и контролировать приближение значений параметров к границам допустимого рабочего диапазона. Информативность образа увеличена путем одновременного отображения, как класса текущего состояния, так и классов нескольких предыдущих состояний параметров, подсистем объектов и объектов контролируемой системы. Для преобразования пространства параметров в пространство когнитивных образов используется представление числовой информации формой, размером и цветом. Основные достоинства разработанного метода графической поддержки: наглядность интерпретации и надежность контроля телеметрии; возможность автоматического определения состояний объектов по многомерным параметрам.

## Литература

1. Хачумов В.М. Введение в распознавание образов. Учебное пособие. – М.: РУДН, 2015. – 150 с.
2. Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П. Интеллектуальный анализ телеметрической информации для диагностики оборудования космического аппарата//Информационные технологии и вычислительные системы. №1, 2016, с.64-75.
3. Янковская А.Е., Ямшанов А.В. О развитии инвариантных к проблемным областям средств когнитивной графики, их кроссплатформенной программной реализации и их интеграции в интеллектуальные динамические системы (Ч.1). – Материалы трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, 22-25 апреля 2015 г., с.717-719.
4. Янковская А.Е., Ямшанов А.В., Кривдюк Н.М. 2-симплекс призма – когнитивное средство принятия и обоснования решений в интеллектуальных динамических системах. – Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 17-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Светлогорск. – М.: ТОРУС-ПРЕСС, 2015. – 82 с.
5. Кочеткова И.А. Способы и алгоритмы обработки информации и принятия решений о сердечно-сосудистой патологии на основе механизмов визуализации и теории нечетких множеств. Автореферат дис. канд. техн. наук. [Место защиты: Юго-Зап. гос. ун-т]. – Курск, 2014. – 18 с.
6. Александров П.С. Комбинаторная топология. – М.: ГИТТЛ, 1947. – 672 с.
7. Гришин В.Г. Образный анализ экспериментальных данных. – М.: Наука, 1982. – 237 с.
8. Емельянова Ю.Г., Теплоухова Н.Е. Моделирование и когнитивно-графическое представление радиотехнических сигналов в системах обучения эксплуатирующего персонала// Авиакосмическое приборостроение. №9, 2011, с.21-30.
9. Kleiberg E., H. van de Wetering, J.J. van Wijk. Botanical Visualization of Huge Hierarchies. – Proceedings of the Symposium on Information Visualization (InfoViz'01), 2001, pp.87-94.
10. Новоселов Ю.В. Методы и программные средства когнитивной графики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Автореферат дис. Канд. техн. наук. [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ]. – М., 2013. – 20 с.
11. Башлыков А.А. Образное представление состояния сложных технологических объектов управления// Искусственный интеллект и принятие решений. №3, 2012, с.9-18.
12. Marmaras N., Drivalou S. Design and Evaluation of Ecological Interfaces. “THALES Basic Research Program”. – Project Results Demonstration, 2005.
13. Хачумов В.М., Ксенофонтова Е.В. Образный анализ и диагностика сложных процессов. – Доклады 11-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» (ММО-11, 23-29 ноября 2003 г., Пушкино). – М., 2003, с.201-204.
14. Матюшин М.М., Саркисян Х.В. Построение оценочной функции для поддержки принятия оперативных решений при контроле параметров состояния космического аппарата. – Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. №4, 2011. – 15 с.
15. Путько М.М. Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных карт. Автореферат дис. Канд. техн. наук. [Место защиты: Кубан. гос. технол. ун-т]. – Краснодар, 2011. – 24 с.
16. Анохин А.Н., Ивкин А.С. Визуальная поддержка когнитивной деятельности операторов АЭС на примере представления состояния барабана-сепаратора на АЭС с РБМК. – Безопасность АЭС и подготовка кадров 2013. Сборник трудов XIII Международной конференции (Обнинск, 1-5 октября 2013). – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2013, с.18-24.
17. Сакулин С.А. Анализ состояния технологических процессов на основе нечетких экспертных знаний. Автореферат дис. канд. техн. наук. [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. – М., 2009. – 169 с.
18. Магия функций и интегралов. Замечательные кривые. Часть 2. URL: <http://wordslan.ru/mfi/zamkr2.php> (дата обращения: 19.04.2016), 2015.
19. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. 11-е издание. – М.: Наука, 1976. – 872 с.
20. Савин А. Число Фидия – золотое сечение. – «Квант»: Научно-популярный физико-математический журнал. №6, 1997, с.32-33.

**Емельянова Юлия Геннадиевна.** Инженер-исследователь Лаборатории интеллектуального управления Института программных систем (ИПС) им. А.К. Айламазяна РАН. Окончила ИПС в 2009 году. Автор 19 печатных работ. Область научных интересов: когнитивная графика, искусственный интеллект, математическое моделирование, человеко-машинный интерфейс. E-mail: yuliya.emeluanowa2015@yandex.ru