

Ю.Г. ЕМЕЛЬЯНОВА
(ИПС им. А.К. Айламазяна
РАН, Ярославская обл.),
В.М. ХАЧУМОВ,

д-р техн. наук
(ФИЦ ИУ РАН, Москва;
ИПС им. А.К. Айламазяна
РАН, Ярославская обл.;
РУДН, Москва)

yuliya.emelyanowa2015@yandex.ru

Когнитивные графические дополнения к интерфейсам командно-измерительных систем авиакосмического назначения

Рассматриваются методы когнитивного графического представления информации для поддержки принятия решений в наземных станциях командно-измерительных систем. Выполнена работа по преобразованию в визуальные образы данных телеметрии, показаний датчиков подсистем космического аппарата и наземной станции.

Когнитивная графика, визуализация, телеметрия, космический аппарат

Одна из важных задач обработки телеметрической информации, поступающей от систем авиакосмического назначения, – оперативная оценка контролируемых ситуаций для поддержки принятия решений человека-оператора. Перспективным направлением исследований является когнитивная визуализация многомерных данных специальными средствами интерфейса командно-измерительных систем (КИС), позволяющая оперативно обнаруживать нештатные ситуации. Человеко-машинное взаимодействие осуществляется на базе технологий образного представления больших объемов информации контролируемых объектов, способствующих быстрому принятию решений. В настоящее время нет единых принципов построения системы когнитивных образов, способных нести пользователям в обобщенных, наглядных, легко и надежно воспринимаемых формах большие объемы и интенсивные потоки информации. Как правило, образы создаются индивидуально с учетом конкретной прикладной области и интерпретируются экспертом на основе накопленных знаний. Существующие математические методы анализа и визуализации многомерных данных плохо применимы к динамическим системам реального времени (ДС РВ) со сложной иерархической структурой и не обладают достаточной универсальностью, что препятствует их внедрению в рассматриваемой прикладной области. Целью исследования является повышение эффективности информационной поддержки лица, принимающего решения (ЛПР), за счет разработки методов и алгоритмов образного представления больших объемов многомерных данных. Это достигается средствами когнитивной машинной графики в составе интеллектуальных интерфейсов.

Приведем основные понятия и определения.

Когнитивная графика – совокупность методов обработки и визуализации многомерной информации в виде компактных изображений и виртуальных сцен, предназначенных для облегчения и ускорения понимания текущей ситуации.

Назначение когнитивной графики применительно к наземной станции командно-измерительных систем (НС КИС) – преобразование вида $f: C \rightarrow G$, где C – множество контролируемых данных или ситуаций; G – множество графических образов, описывающих ситуации в удобной для восприятия ЛПР форме.

Когнитивно-графический интеллектуальный интерфейс – универсальная программная среда, ориентированная на поддержку человеко-машинного взаимодействия и отображение преобразованных данных посредством когнитивных графических образов.

В нашем случае источниками данных для разработанных когнитивных образов служат космический аппарат (КА) и НС КИС (рис. 1).

Когнитивно-графическое представление ситуации определяется $G = \langle V, D, L \rangle$, где V – множество индикаторов (визуальных сигналов); D – взаимное расположение индикаторов; L – множество уровней иерархии в системе когнитивных образов, соответствующее уровням иерархии подсистем в наблюдаемом объекте. Визуальный сигнал есть $V = \langle \text{Color}, \text{Form}, \text{Size}, \text{Position}, H \rangle$ (т.е. цвет, форма, размер, позиция, изменение во времени).

Преобразование ситуации f в когнитивный образ G должно удовлетворять требованию максимизации функционала $\Phi(G) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \Phi_i(G) \rightarrow \max$, где $\Phi_i(G) = \Phi_i(f(C))$ – числовые оценки качественных показателей когнитивного образа (нормированные частные критерии); λ_i – весовые коэффициенты критериев, $\lambda_i \geq 0$; $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$.



Рис. 1. Функции когнитивной визуализации информации в НС КИС

Качественными показателями когнитивного графического образа являются наглядность, коммуникативность, информационная открытость, метафоричность, многомерность, воспринимаемость, целостность, структурность, селективность и др. [1–3]. Числовые значения качественных показателей и весовых коэффициентов устанавливаются экспертами в соответствии с их предпочтениями. Для повышения объективности работы экспертов используются специальные методы рейтинговой оценки критериев качества. Это методы ранжирования и парных сравнений [4], учитывающие мнения большинства. Рассмотрение данного вопроса требует дополнительного изучения и выходит за рамки настоящей работы.

Когнитивная визуализация данных с датчиков положения

Одной из задач НС КИС является контроль датчиков положения и ориентации КА, к которым предъявляются жесткие требования по точности и надежности в условиях высокого уровня помех [5, 6]. В настоящей работе предлагается подход, основанный на корреляционном анализе показаний датчиков с КА. Пусть имеется набор показаний датчиков КА: D – дальность, км; V – скорость, м/с; UKP – курсовой угол по первой линии связи; UTP – тангажный угол по первой линии связи; UKA – курсовой угол по второй линии связи; UTA – тангажный угол по второй линии связи; $B1$ – угол крена; $INTV$ – интеграл от скорости. Системе мониторинга НС КИС требуется выявить ситуации отказов и сбоев в работе датчиков, визуализировать состояние КА. Будем рассматривать показания датчиков ориентации КА как случайные величины. Степень взаимосвязи величин X и Y будем измерять коэффициентом корреляции

$$\rho = \frac{\text{cov}[X, Y]}{\sqrt{D[X]D[Y]}}, \quad (1)$$

где $\text{cov}[X, Y]$ – ковариация случайных величин X и Y ; $D[X]$ – дисперсия X ; $D[Y]$ – дисперсия Y . Результат вычисления парной корреляции показаний датчиков (для одного из КА, по данным РКК «Энергия» (Королев)) представлен в табл. 1.

Таблица 1

Датчики положения и ориентации КА	Датчики положения и ориентации КА							
	D	V	UKP	UTP	UKA	UTA	$B1$	$INTV$
D	1	0,7072	0,1494	0,0925	0	0,1021	0,0336	0,1499
V	0,7072	1	-0,2903	-0,1742	0,1962	-0,3608	-0,0395	-0,3267
UKP	0,1494	-0,2903	1	0,3347	-0,4685	0,5678	0,1619	0,9705
UTP	0,0925	-0,1742	0,3347	1	-0,8372	-0,1917	0,0049	0,4001
UKA	0	0,1962	-0,4685	-0,8372	1	0,269	-0,0621	-0,4901
UTA	0,1021	-0,3608	0,5678	-0,1917	0,269	1	0,1212	0,5481
$B1$	0,0336	-0,0395	0,1619	0,0049	-0,0621	0,1212	1	0,2344
$INTV$	0,1499	-0,3267	0,9705	0,4001	-0,4901	0,5481	0,2344	1

При внесении помех наблюдается снижение значения модуля корреляции в показаниях датчиков. Наличие корреляционных связей в показаниях положения и ориентации, с одной стороны, объясняет поведение 3D-модели КА. С другой стороны, поведение созданной когнитивной графической модели подтверждается наличием корреляционных зависимостей в показаниях датчиков КА. Динамическая

3D-визуализация модели КА по данным телеметрии позволяет воспроизводить в удобной форме его относительное движение во времени и пространстве, а ЛПР – анализировать ситуации, визуально оценивая поведение модели. Так, наблюдаемые резкие кратковременные изменения и потеря ориентации модели при нормальном поведении КА свидетельствуют о наличии сбоев в датчиках в результате воздействия внешних помех. Устойчивое аномальное положение модели указывает на неисправность. По результатам исследований разработана программа, способная выполнять предобработку показаний датчиков и обеспечивать анимационный графический вывод данных в составе универсального интерфейса НС КИС.

Корреляционный анализ данных в сочетании с простой 3D-моделью летательного аппарата служит хорошим инструментом для анализа состояния датчиков.

Методы когнитивного представления состояний КА

По результатам обзора требований к когнитивным графическим образам [7] для операторов ДС РВ разработана трехуровневая система универсальных когнитивных образов. Первый уровень представляет собой образ для группы контролируемых объектов, составляющих в своей совокупности комплексную ДС РВ. На втором уровне отображается состояние отдельного объекта, на третьем – визуализируются параметры рассматриваемого объекта, сгруппированные в подсистемы.

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 μ контролируемых объектов, т.е. $S = \{S_1, S_2, \dots, S_\omega, \dots, S_\mu\}$. Объект S_ω 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. $s_i(t) = \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ij}(t), \dots, p_{im}(t)\}$, 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 $\text{Classes} = \{\text{«normal»}, \text{«anomaly»}, \text{«critical»}, \text{«no info»}\}$ – множество классов параметров, подсистем и объектов в дискретные отсчеты времени t . Требуется разработать метод отображения состояний системы S . Для преобразования пространства параметров в пространство когнитивных образов используется представление числовой информации формой, размером и цветом. За основу взят метод интегрального контурного представления [8]. В секторах когнитивного образа располагаются фигуры, ограниченные дугой окружности и какой-либо из кривых: ветвь эллипсоиды, ветвь гипотенузы, эллиптическая дуга или ветвь гиперболы. Цветовое кодирование фигур имеет однозначную интуитивную интерпретацию. Размер фигуры соответствует величине отклонения параметра от среднего значения на допустимом рабочем диапазоне. Отображение значений параметров в дуги кривых выполняется по формуле

$$\begin{cases} x = x_0 + (R + \overline{p_{ij}(t)}) \cos \psi - \overline{p_{ij}(t)} \cos(\psi(m + \eta)) \\ y = y_0 + (R + \overline{p_{ij}(t)}) \sin \psi - \overline{p_{ij}(t)} \sin(\psi(m + \eta)) \end{cases}, \text{ если } -r \leq \overline{p_{ij}(t)} \leq r; \\ \begin{cases} x = x_0^e + a^e \cos \beta \cos \tau - b^e \sin \beta \sin \tau \\ y = y_0^e + a^e \cos \beta \sin \tau + b^e \sin \beta \cos \tau \end{cases}, \text{ если } \overline{p_{ij}(t)} > r; \\ \begin{cases} x = x_0 + a^h \cosh \theta \cos \tau - b^h \sinh \theta \sin \tau \\ y = y_0 + a^h \cosh \theta \sin \tau + b^h \sinh \theta \cos \tau \end{cases}, \text{ если } \overline{p_{ij}(t)} < -r, \end{cases} \quad (2)$$

где $\overline{p_{ij}(t)}$ – нормированное значение j -го параметра подсистемы с номером « i » в дискретный отсчет времени t , $\overline{p_{ij}(t)} = \delta \left(2 \left(\frac{p_{ij}(t) - p_{ij \min}}{p_{ij \max} - p_{ij \min}} \right) - 1 \right)$, $\delta = \frac{R}{2\Phi^2}$, Φ – коэффициент золотого сечения, R – радиус окружности; x_0 и y_0 – координаты центра окружности; $r = R/m$, m – количество параметров в i -й подсистеме; $\psi \in [j\alpha, (j+1)\alpha]$, $\alpha = \frac{2\pi}{m}$; $\tau = j\alpha + \frac{\alpha}{2}$ – угол поворота эллипса или гиперболы вокруг точки $O(x_0, y_0)$; $x_0^e = x_0 + R \cos \frac{\alpha}{2} \cos \tau$; $y_0^e = y_0 + R \cos \frac{\alpha}{2} \sin \tau$; $a^e = 2\overline{p_{ij}(t)} + R - R \cos \frac{\alpha}{2}$ – большая полуось эллипса;

$b^e = R \sin \frac{\alpha}{2}$ – малая полуось эллипса; $a^h = R + 2\overline{p_{ij}(t)}$ – действительная полуось гиперболы;

$$b^h = \frac{a^h R \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\left(R \cos \frac{\alpha}{2}\right)^2 - (a^h)^2}} - \text{мнимая полуось гиперболы}; \theta \in [-2\pi, 2\pi]; \beta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]; \eta = \begin{cases} 1, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} > 0; \\ -1, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} < 0; \\ 0, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} = 0. \end{cases}$$

Области, ограниченные дугой окружности и кривой, определяемой формулой (2), закрашиваются тем цветом, который соответствует параметру $p_{ij}(t)$ по определенным правилам. Представим образы для групп контролируемых параметров КА «Юбилейный» (по данным центра управления полетом (ЦУП) малых КА МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва)). На рис. 2, а отображено состояние подсистемы электро-снабжения, на рис. 2, б – состояние подсистемы приемопередачи.

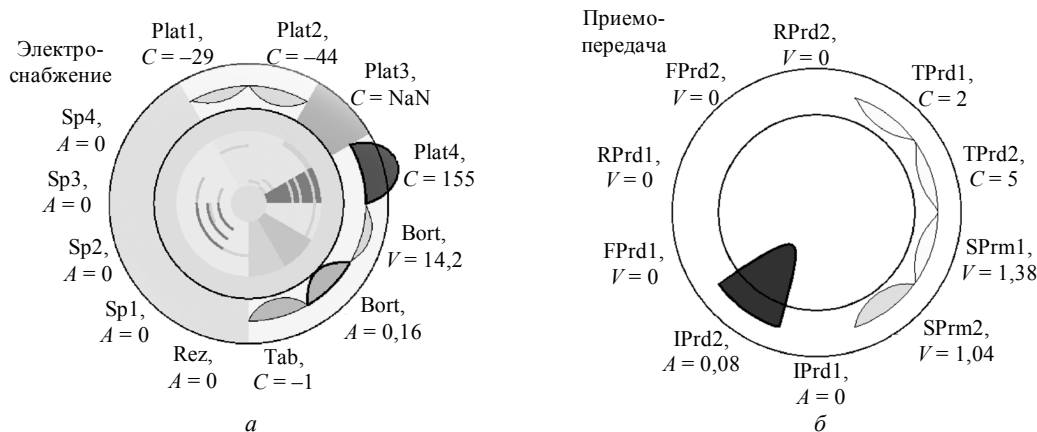


Рис. 2. Отображение параметров, сгруппированных в подсистемы

В каждом секторе когнитивного образа предлагается отмечать классы нескольких предыдущих состояний той части системы, которую представляет данный сектор (параметр, подсистема объекта, объект). Как видим (см. рис. 2, а), за предыдущие двадцать временных отчетов сила тока на первой и второй панелях солнечной батареи (Sp1,A и Sp2,A) совершила скачки, превышающие заданное максимальное допустимое значение.

На когнитивном изображении, представляющем отдельный объект, визуализируется информация одновременно о максимальном и минимальном значениях в каждой подсистеме. Пусть $p_{i \min}(t)$ – минимальное среди нормированных отрицательных значений параметров подсистемы s_i , зафиксированных в момент времени t , и $p_{i \min}(t) \in \{\overline{p_{i1}(t)}, \overline{p_{i2}(t)}, \dots, \overline{p_{ij}(t)}, \dots, \overline{p_{im}(t)}}\}$; $p_{i \max}(t)$ – максимальное значение среди нормированных положительных параметров, $p_{i \max}(t) \in \{\overline{p_{i1}(t)}, \overline{p_{i2}(t)}, \dots, \overline{p_{ij}(t)}, \dots, \overline{p_{im}(t)}}\}$, k – количество подсистем в объекте. Выполнив подстановки $\overline{p_{ij}(t)} = p_{i \min}(t)$ и $\overline{p_{ij}(t)} = p_{i \max}(t)$, $j = i$, $m = k$, получим кривые для минимального и максимального значений параметра в подсистеме. Для контроля телеметрии КА «Юбилейный» получен образ (рис. 3, а). Предлагается для визуализации уровня комплексной системы формировать такое же когнитивное графическое изображение, как и для уровня отдельного объекта (рис. 3, б).

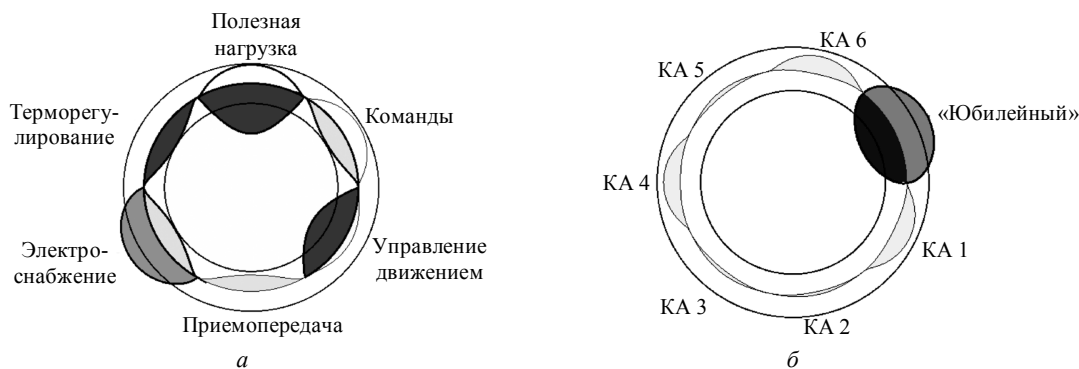


Рис. 3. Когнитивный образ: а – КА «Юбилейный»; б – группировки КА

Как видим, один из КА, входящих в наблюдаемую группу, работает в нештатном режиме, причем имеются проблемы с электроснабжением.

Методы когнитивной визуализации состояний НС КИС

В табл. 2 представлена часть перечня граничных значений параметров подсистем НС КИС. Для каждого параметра в текущей ситуации автоматически выбирается когнитивная характеристика (цвет, форма, размер, позиция). Разработано обобщенное когнитивное представление состояния системы космического назначения. Когнитивный образ является модификацией круговой диаграммы, разбитой на секторы. Каждый сектор отвечает за один из пунктов контролируемых данных. Для удобства отображения и восприятия введены условные знаки (табл. 3).

Таблица 2

№ п/п	Название	Единица измерения	Аномалия	Нижняя граница критической ситуации	Нижняя граница нормы	Середина нормы	Верхняя граница нормы	Верхняя граница критической ситуации	Аномалия
Параметры антенной системы									
1	Уровень сигнала	дБ	-300	-260	-200	-128	-121	-117	-115
2	Точность наведения антенной системы	град	-7	-5	-4	0	4	5	7
3	Расхождение во времени	мкс	-400	-350	-300	0	300	350	400
Метеопараметры									
4	Температура	°С	-50	-40	-20	0	30	40	45
5	Давление	мм рт. ст.	150	300	450	640	830	970	1100
6	Влажность	%	0	30	60	70	85	92	100
7	Направление ветра	град	-370	-1	350	0	350	361	370
8	Скорость ветра	м/с	37	20	17	0	17	20	37
Передатчик									
9	Аттенюатор	0,1 дБ	10	30	40	45	50	70	75
10	Температура	°С	-50	-18	-15	0	60	65	70
11	Мощность	Вт	0	55	80	120	350	375	1000

Появление аномального значения какого-либо из контролируемых параметров влечет изменение яркости сектора, отвечающего за соответствующую этому параметру подсистему (последний столбец в табл. 3, рис. 4). События (ошибки, предупреждения и сведения) записываются в когнитивной форме в журнал.

Таблица 3

Символ	Смысловое значение	Символ	Смысловое значение	Когнитивные образы при аномальных значениях параметров
	Телеметрия		Установки из ЦУП	
	Метеоинформация		Расхождение между фактическим временем и временем навигационного приемника	
	Антенная система		Уровень давления в баках	
	Передатчик		Связь ЦУП	
	Аппаратура системы		Показания датчиков положения КА	
	Уровень и мощность сигнала	—	—	

Разработанные когнитивные образы предназначены для реализации в составе интеллектуальных интерфейсов НС КИС.

Построение интеллектуальных интерфейсов

По результатам исследований разработаны когнитивные компоненты к графическому интерфейсу. При выборе одного из секторов появляются уточняющие образы, на которых можно просмотреть информацию о его работе. Если какой-либо из параметров отклонился от нормы, то изменение яркости сектора сигнализирует о том, где произошли аномалии. В качестве примера (см. рис. 4) рассмотрена ситуация, при которой наведение антенной системы нуждается в поправке из-за больших отклонений в положении в режиме «Подготовка».

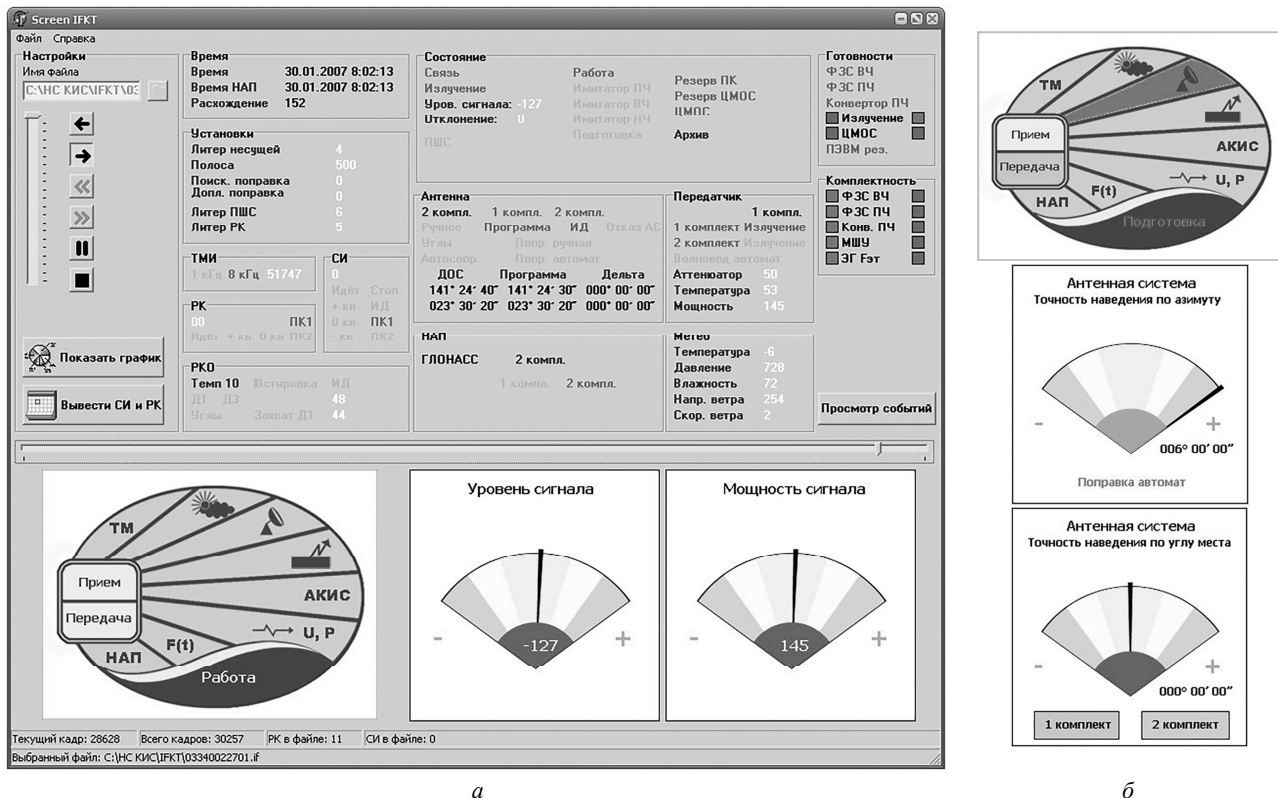


Рис. 4. Интерфейс НС КИС с когнитивным дополнением:
а – при нормальном состоянии НС КИС; б – визуализация аномального состояния

К универсальному интерфейсу НС КИС подключается дополнительно когнитивная модель КА, средства отображения процесса выполнения программы на основе сетей Петри [9] и программное обеспечение для визуализации процессов настройки нейронных сетей, предназначенных для решения задач распознавания и прогнозирования ситуации [10].

Общая оценка качества предлагаемых когнитивных образов характеризуется тремя наиболее важными параметрами – наглядностью, структурностью и селективностью. Для разработанного когнитивного дополнения к интерфейсу НС КИС их значения оцениваются как 0,8; 0,9; 0,73.

Приведем основные преимущества когнитивного дополнения, подтвержденные тестовыми (стендовыми) испытаниями графического интерфейса НС КИС в АО «Российские космические системы» (Москва), а также информацией, предоставленной НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина (Звездный городок).

Обобщение в виде когнитивных образов показаний датчиков КА и параметров телеметрии позволяет преодолеть рассеивание и ослабление внимания ЛПР из-за наличия в интерфейсах НС КИС и «АРМ-Арктика 1.0» большого числа (порядка 100) динамических текстовых и цифровых сообщений. При этом скорость восприятия и понимания общей текущей ситуации возрастает примерно в 2-5 раз.

Опыт разработки тренажерных комплексов в НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина (Москва) показал, что текстовое и формульное описание относительного движения КА воспринимаются значительно дольше и труднее, чем соответствующие анимационные модели и другие когнитивные изображения с четким физическим смыслом. Когнитивная графика обеспечивает повышение скорости обучения персонала служб навигационно-баллистического обеспечения космических полетов примерно в 5-10 раз.

Таким образом, полученные когнитивные образы позволяют улучшить эргономические качества интерфейсов для объектов авиакосмической отрасли и повысить эффективность работы ЛПР. Основные достоинства разработанных методов графической поддержки – это наглядность интерпретации и надежность контроля телеметрии, возможность автоматического определения состояний объектов по многомерным параметрам на всех уровнях иерархии ДС РВ, легкость восприятия больших объемов и интенсивных потоков информации в реальном масштабе времени. Когнитивная визуализация позволяет контролировать приближение значений параметров к границам допустимого рабочего диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ №15-29-06945 «Развитие моделей, методов и программных средств обработки мультиспектральных снимков, видеопотоков и данных телеметрии для задач космического мониторинга арктической зоны».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsvetkov V.Ya.* The Cognitive Modeling with the Use of Spatial Information // *European Journal of Technology and Design*. 2015. № 4. Vol. 10. Iss. 4. P. 149–158.
2. *Цветков В.Я.* Когнитивные образовательные модели // *Управление образованием, теория и практика*. 2014. № 1. С. 32–42.
3. *Бойченко Г.Н.* Графические органайзеры как средство обучения: дидактические функции и перспективы применения [Электронный ресурс]. URL: <http://ito.su/main.php?pid=26&fid=9278> (дата обращения: 28.02.2017).
4. Автоматизированное управление технологическими процессами / Под ред. В.Б. Яковлева. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. 224 с.
5. *Чернов В.Ю.* Полетный контроль датчиков угловых скоростей с принудительным вращением // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2006. № 1. С. 43–47.
6. *Чернов В.Ю.* Полетный контроль датчиков системы управления с функциональным тестированием // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2005. № 2. С. 52–55.
7. *Емельянова Ю.Г.* Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. № 3. С. 21–30.
8. *Гришин В.Г.* Образный анализ экспериментальных данных. М.: Наука, 1982. 237 с.
9. *Емельянова Ю.Г., Талалаев А.А.* Сетевые модели функционирования прикладных параллельных систем обработки потоков данных // *Авиакосмическое приборостроение*. 2012. № 5. С. 10–19.
10. *Емельянова Ю.Г., Малышевский А.А., Хачумов В.М.* Визуализация процессов обучения нейронных сетей // *Математические методы распознавания образов: Сб. докл. 13-й Всерос. конф., г. Зеленогорск, 30 сент. – 6 окт. 2007. М.: МАКС Пресс, 2007. С. 586–588.*

Поступила в редакцию 3.03.17

Cognitive Graphical Additions to the Interfaces of Command Measurement Systems for Aerospace Application

YU.G. EMEL'YANOVA AND V.M. KHACHUMOV

The methods of cognitive graphical information presentation are considered to support decision-making in earth stations of command measurement systems. The work is performed on transforming telemetric data, readings of the sensors of space module and earth station into visual images.

Cognitive graphics, visualization, telemetry, space module