### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

**УДК** 004.89

### А.В. Колесников, С.В. Листопад, Ф.Г. Майтаков

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО РАЗРАБОТКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ГЕТЕРОГЕННЫМ ВИЗУАЛЬНЫМ ПОЛЕМ

Рассматриваются архитектура, основные элементы и реализация прототипа инструментального средства разработки функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем. Такие системы способны одновременно моделировать коллективные вербально-символьные рассуждения и активизировать визуально-образные рассуждения пользователей. Применение подобных систем в практике решения проблем, в частности, при управлении региональными электрическими сетями, позволит пользователям «увидеть» проблемную ситуацию и ее возможные приближенные решения, которые впоследствии могут быть обоснованы и уточнены методами логико-математических рассуждений.

The article presents the architecture, basic elements and implementation of the prototype of the tool for the development of functional hybrid intelligent systems with a heterogeneous visual field. Such systems are capable of simultaneously simulating collective verbal-symbolic reasoning and activating the visual-figurative reasoning of users. The use of such systems in the practice of solving problems, in particular when managing regional electric networks, will allow users to «see» the problem situation and its possible approximate solutions, which can subsequently be justified and refined by the methods of logical-mathematical reasoning.

**Ключевые слова:** гибридная интеллектуальная система, гетерогенное визуальное поле, визуальный язык, визуальные рассуждения.

**Keywords:** hybrid intelligent system, heterogeneous visual field, visual language, visual reasoning.

### Введение

Гибридные интеллектуальные системы (ГиИС) были анонсированы в 1994—1995 гг. Л. Медскером [1]. На рубеже XX—XXI вв. знания о системах гибридного и синергетического искусственного интеллекта были изучены, обобщены и опубликованы в работах А.Н. Борисова, А.В. Гаврилова, И.А. Кирикова, А.В. Колесникова, Д.А. Поспелова, Г.В. Рыбиной, В.Б. Тарасова, И.Б. Фоминых, Н.Г. Ярушкиной, С. Гунэтилэйка и С. Хеббала. Многолетняя практика их разработки и применения, в том числе калининградской школой искусственного интеллекта [2—5],



показывает их сегодняшнюю проблематику: 1) противоречие между свойствами объективной реальности, процессами, явлениями и событиями окружающего мира и научной картиной мира как частью мировоззрения ученых и специалистов, работающих в информатике, управлении и проектировании; 2) незавершенность выработки принципов, переводящих создание гибридов из уникальной ремесленной мастерской в проектно-конструкторскую деятельность; 3) малочисленность конкурирующих методологий гибридизации в информатике; 4) неразвитость технологий гибридизации и инструментальных средств поддержки; 5) чрезвычайно узкий охват автоматизацией только задач пассивных фаз управления. Ключевой же недостаток современных ГиИС — нерелевантность их архитектур составу и структуре интеллекта человека, проявляющаяся в отображении, как правило, только логико-математического, левостороннего интеллекта.

В этой связи актуально расширение возможностей ГиИС отображением в них образных, визуальных, интуитивных, рефлексивных и эмоциональных механизмов мышления и поведения. Для этой цели в [6] предложена неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей на основе принципов теории систем и системного анализа. В работах [7; 8] рассмотрен метаязык для функциональных гибридных интеллектуальных систем (ФГиИС) управления электросетевым хозяйством, разработанного в соответствии с этой теорией. В настоящей работе представлено описание исследовательского прототипа инструментальной поддержки информационной технологии ФГиИС с гетерогенным визуальным полем для управления электросетевым хозяйством, позволяющего оперативно-диспетчерскому персоналу получать, понимать и высказываться о целостной картине ситуаций и состояний в электрической сети.

## Архитектура инструментального средства разработки функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем

Укрупненно, поэтапно разработку ФГиИС с гетерогенным визуальным полем можно представить следующим образом: 1) идентификация проблемы как неоднородной задачи; 2) редукция проблемы в декомпозицию; 3) спецификация однородных обслуживающих задач (подзападач) и связей между ними; 4) конструирование метода решения проблемы: выбор методов решения задач, разработка гетерогенного модельного поля, элементов ФГиИС и межмодельных информационных интерфейсов, выбор стратегии из таблицы гибридных стратегий; 5) инициализация ФГиИС и ее настройка; 6) имитация коллективного решения задач с помощью ФГиИС.

Для реализации перечисленных этапов предложена архитектура инструментального средства (ИС) синтеза ФГиИС «Графит» (рис. 1), в которой выделены и обведены штриховой линией четыре блока подсистем: моделирование проблемы, моделирование метода, визуализация и организация экспериментов.



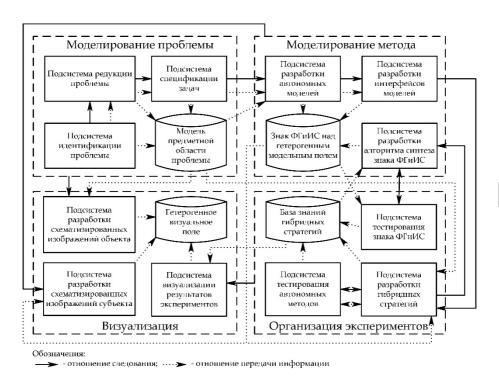


Рис. 1. Архитектура инструментального средства синтеза функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем

Блок моделирования проблемы предназначен для разработки описания модели предметной области, проблемы, ее задач и связей между ними. В него входят подсистемы идентификации проблемы, ее редукции и спецификации однородных задач. В подсистеме идентификации проблемы по схеме ролевых концептуальных моделей [3] определяются цель, исходные данные для решения, идентификатор и спецификатор. В подсистеме редукции проблемы продолжаются работы по ее системному анализу, но акценты при этом смещаются на состав и структуру. Исходная проблема редуцируется разработчиками в вариант системы обслуживающих однородных задач (декомпозиции), представляется на языке схематизированных изображений. Подсистема спецификации задач предназначена для идентификации однородных задач по схеме ролевых концептуальных моделей [3]. Определяются цель, исходные данные, классификатор, спецификатор, а также предварительно выбираются методы решения задач. По спецификации задач проверяется неоднородность, чтобы повысить у модельера степень уверенности в том, что проблема удовлетворяет модели «неоднородная задача» [3]. Это оправдывает дальнейшие работы по гибридизации и синтезу метода решения проблемы. Результат работы коллектива разработчиков с подсистемами данного блока - модель предметной области, включающая макромодель проблемы, множество ее декомпозиций (может быть, и одноэлементное) и модели однородных обслуживающих задач.



Блок моделирования метода предназначен для конструирования интегрированного метода решения проблемы, отображаемого знаками ФГиИС и ее элементов. Подсистема разработки автономных моделей предназначена для моделирования элементов ФГиИС и создания их программного кода с целью решения однородных задач из декомпозиции проблемы. Элементы включаются в ГМП наряду с созданными ранее моделями. Работы этого этапа соответствуют методологиям автономного моделирования, итерационны, а качество ГМП зависит от опыта использования базисных математических и эвристических средств и инструментария. Интерфейсы автономных моделей преодолевают различия языков описания в схемах ролевых концептуальных моделей базисных методов и устанавливают отношения интеграции на элементах ГМП. Подсистема разработки алгоритма синтеза поддерживает конструирование алгоритма инициализации ФГиИС, порядка выбора стратегии из базы знаний гибридных стратегий, разрабатываемых в блоке организации экспериментов, и непосредственно генерацию знака ФГиИС по выбранной стратегии, интерпретация которого рассматривается как метод решения проблемы. Результат работы – ГМП и интегрированный метод решения проблемы, построенный над ним, релевантный сложившейся на текущий момент времени проблемной ситуации.

В блоке организации экспериментов тестируются ГМП и интегрированный метод, оценивается их эффективность, после чего результаты передаются в блок моделирования метода. В подсистеме разработки гибридных стратегий разработчики заменяют отношения декомпозиции между задачами на отношения интеграции и устанавливают отношения соответствия между исходными данными и целями проблемы, а также исходными данными и целями однородных задач соответственно. Работы заканчиваются построением таблицы гибридных стратегий, отображающей перечисленные выше связи между однородными задачами. Знания для таблицы могут быть получены в результате тестирования автономных методов и их комбинаций с использованием соответствующей подсистемы. Оценки каждого метода и каждой комбинации методов, полученные при использовании подсистемы тестирования автономных методов, вместе с таблицей гибридных стратегий заносятся в базу знаний гибридных стратегий, которая впоследствии используется для синтеза интегрированного метода решения проблемы. Разработка этого алгоритма выполняется в соответствующей подсистеме блока моделирования метода, после чего в подсистеме тестирования знака ФГиИС может быть получена его оценка, которая вместе с самим знаком заносится в базу знаний гибридных стратегий. Если оценка не устраивает разработчика, начинается итерационный процесс корректировки алгоритма синтеза и его оценки, что показано на рисунке 1 двунаправленной стрелкой. Полученный алгоритм синтеза встраивается в элемент, моделирующий работу ЛПР, для учета динамического характера проблем и синтеза знака ФГиИС, релевантного проблеме на момент ее решения.



Порядок работы подсистем показан на рисунке 1 сплошными стрелками. В случае обнаружения ошибок или неточности на любом из этапов возвращаются к одному из предыдущих. Подсистемы блока визуализации запускаются по окончании работы подсистем соответствующего им блока, что показано сплошными стрелками. Блок визуализации предназначен для визуального моделирования объектов внутреннего мира пользователей ФГиИС методами визуального управления. Он содержит три подсистемы: разработки схематизированных изображений объекта, разработки схематизированных изображений субъекта и визуализации результатов экспериментов. Они устанавливают соответствие между моделью предметной области, интегрированным методом решения проблемы, результатами тестирования ГМП и интегрированного метода и их визуальными представлениями, понятными конечному пользователю. Результат визуализации - гетерогенное визуальное поле, используемое для развития у пользователя образных представлений о проблеме, методах и результатах ее решения.

Применение ИС «Графит» автоматизирует все этапы проектирования по ПС-методологии [3]. Подсистемы ИС «Графит» (за исключением блока моделирования метода) — визуальные конструкторы, применяющие методы визуального управления для привлечения к разработке ФГиИС специалистов, не владеющих навыками программирования. Подсистемы блока моделирования метода наряду с визуальным конструированием предполагают написание программного кода вручную. Рассмотрим подробнее основное отличие предлагаемого ИС «Графит» от средств разработки традиционных ФГиИС — подсистему разработки схематизированных изображений.

## Подсистема разработки схематизированных изображений инструментального средства «Графит»

Подсистема разработки схем-изображений – графический конструктор, основное окно которого содержит набор стандартных меню в верхней части окна, строку состояния, инспекторы объектов и диаграммы, панель примитивов и рабочее поле (рис. 2). Меню в верхней части окна обеспечивает стандартный функционал визуального редактора, такой как сохранение и открытие модели, операции с буфером обмена, настройка интерфейса редактора и др. Строка состояния выводит информацию о текущем статусе разрабатываемого схематизированного изображения: число объектов, свойств, отношений и т.д. Инспектор объектов служит для навигации по списку разработанных ресурсов, действий, свойств и отношений между ними. Инспектор диаграммы позволяет изменять представление визуальных примитивов, устанавливая их геометрические размеры, цвета и другие характеристики. В панели примитивов представлены базовые формы, из которых конструируется схематизированное изображение. Перечень примитивов для языка оперативно-диспетчерского управления региональными



электросетями представлен в [9] на основе анализа работ по визуальному управлению, когнитивной графике, методам визуализации информации [10-13]. Рабочее поле разделено на пять частей и предназначено для конструирования схематизированных изображений из набора примитивов.

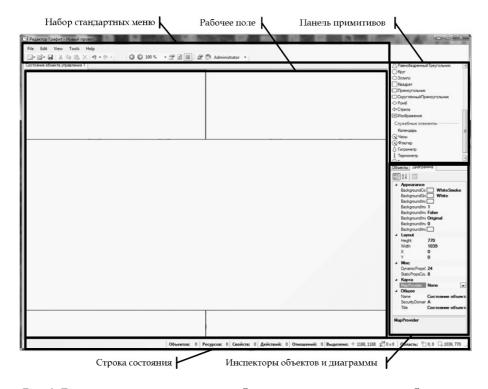


Рис. 2. Главное окно подсистемы разработки схематизированных изображений

Центральная часть рабочего поля предназначена для конструирования схематизированных изображений текущей р-ситуации. Р-ситуация (ситуация на ресурсах) — множество пространственных отношений на ресурсах производственных операций в данный момент времени и в контексте пространственной структуры объекта управления. На рисунке 3, a дано схематизированное изображение р-ситуации «нормальный режим передачи электроэнергии».

Сверху и снизу располагаются участки рабочего поля для построения изображений существенных для решаемой в момент t задачи параметров, о-ситуации и погодной ситуации.

Если в р-ситуации акценты сделаны на отображении ролевых пространственных отношений «ресурс — ресурс», то в представлении существенных для решаемой в момент t задачи параметров, качественных нечетких характеристик ресурсов на рисунке 3,  $\delta$  акценты смещены на ролевые отношения «свойство — ресурс». Это представление относится к внутреннему миру эксперта, поэтому для схематизации использованы четыре окружности. Между центральной и внешней по отношению



к ней окружностями показаны схемы-изображения свойств статичных ресурсов текущей р-ситуации. При решении задач на фазе контроля, то есть когда заданы нормативы на значения этих свойств, выход за пределы нормативов может символизироваться изменением цвета треугольников. В этом случае цвет центральной окружности может интегрированно показывать либо норму по свойствам, либо степень отклонения свойств статичных ресурсов от нормативных значений.

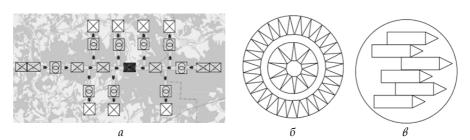


Рис. 3. Схематизированные изображения (схемы действий не детализированы): a- p-ситуации «нормальный режим передачи электроэнергии» и ее места (показано условно);  $\delta-$  существенных для решаемой в момент t задачи параметров, качественных нечетких характеристик ресурсов (ролевые визуальные отношения «свойство — ресурс»);  $\beta-$  ролевого визуального отношения «действие — действие» («быть одновременно»)

О-ситуация (ситуация на операциях) — отношение «одновременно» на множество операций с ресурсами объекта управления в данный момент времени в контексте производственной структуры (процесса). Поскольку сценарий операции — план, формирующий текущую р-ситуацию, то о-ситуация определяет и р-ситуацию. Графическое изображение ролевого визуального отношения «действие — действие» («быть одновременно») представлено на рисунке 3,  $\theta$ . Поскольку это отношение объектов внутреннего мира экспертов, оно изображено в окружности. Понимание схемы-изображения «о-ситуация» предполагает образное представление временной шкалы и вертикальной линии-отметки на этой шкале, символизирующей текущее время и пересекающей все действия, выполняемые в объекте управления одномоментно.

Как показано в [14], основное внимание оператор обращает на верхний левый квадрант рабочего окна, поэтому рекомендуется в этой части рабочего поля размещать схематизированное изображение текущей о-ситуации, в верхней правой части — схематизированное изображение прогнозируемой о-ситуации, в левой и правой нижних частях — схематизированные изображения текущей и прогнозной погодной ситуации соответственно (рис. 4). Перетаскивая визуальные примитивы на рабочее поле из панели примитивов, настраивая их с помощью инспектора свойств и устанавливая ролевые визуальные отношения (рис. 4), разработчик формирует схематизированные изображения состояния объекта управления, представляющие собой совокупность существенных для решаемой в момент t задачи параметров, качественных



нечетких характеристик ресурсов и операций, то есть о-ситуаций и р-ситуаций [9]. Причем первая рассматривается в контексте производственной структуры, а вторая — пространственной структуры объекта управления (рис. 5).

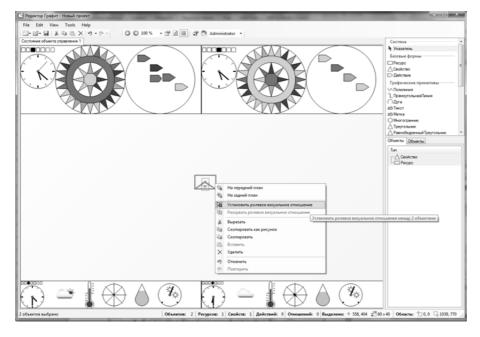


Рис. 4. Главное окно с разработанными схематизированными изображениями о-ситуации и двумя примитивами р-ситуации

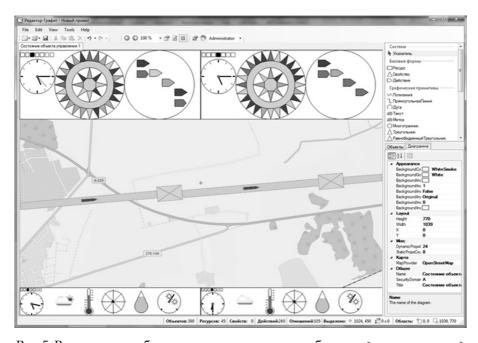


Рис. 5. Результат разработки схематизированных изображений р- и о-ситуаций



В результате компиляции формируется ФГиИС с гетерогенным визуальным полем, пользовательский интерфейс которой показан на рисунке 6. Данная ФГиИС предназначена для поддержки оперативнодиспетчерского управления региональными электрическими сетями. Она позволяет отображать текущие о- и р-ситуации в региональной электросети, моделировать ее функционирование и строить краткосрочные прогнозы развития этих ситуаций.

При отображении р-ситуации в мелком масштабе визуальные примитивы, изображающие линии электропередач, «сливаются» в сплошные синие (на рис. 6 — серые) линии, переток мощности по которым показывается движущимися красными (на рис. 6 — темно-серыми) сегментами линий.

Отображаемая в левом верхнем углу окна текущая о-ситуация взаимосвязана с р-ситуацией: при щелчке мышью на окружность, треугольник или стрелку схематизированного изображения о-ситуации масштаб и область видимости р-ситуации меняются таким образом, что в центре окна располагается ресурс, связанный с соответствующим визуальным примитивом.

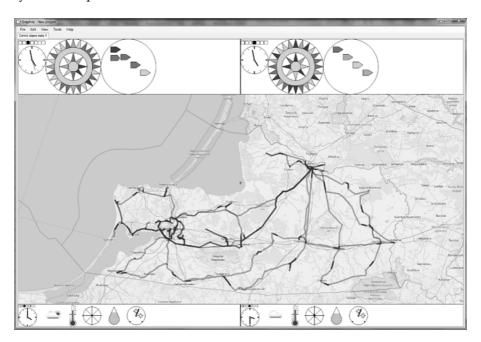


Рис. 6. Пользовательский интерфейс функциональных гибридных интеллектуальных систем с гетерогенным визуальным полем для оперативно-диспетчерского управления региональными электрическими сетями

Это особенно удобно, когда цвет треугольника меняется на обозначающий аварию или предаварийное состояние, что позволяет оператору мгновенно оценивать сложившуюся ситуацию и реагировать на нее



(рис. 7). По умолчанию в ФГиИС с гетерогенным визуальным полем для оперативно-диспетчерского управления региональными электрическими сетями используются следующие цвета визуальных примитивов о-ситуации (по аналогии с цветовой кодировкой уровней опасности): зеленый, желтый, оранжевый и красный. При этом пользователь может изменять настройки интерфейса и устанавливать их в соответствии со своими предпочтениями.

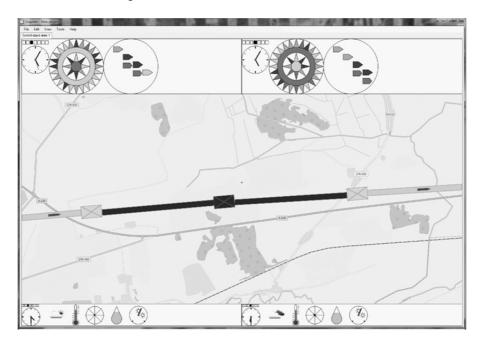


Рис. 7. Окно пользовательского интерфейса  $\Phi$ ГиИС с отображением аварийной ситуации на воздушной линии электропередач

Лабораторные исследования разработанного прототипа ИС синтеза ФГиИС с гетерогенным визуальным полем показали, что специалисты, хорошо знающие предметную область управления электросетями, но не владеющие навыками программирования, благодаря наличию визуальных конструкторов успешно конструируют модели объекта управления, а также схематизированные изображения его состояний и ситуаций на нем. Опыт разработки ФГиИС позволяет говорить о значительном сокращении сроков их создания с применением ИС «Графит».

Разработанные с применением ИС «Графит» ФГиИС позволят учитывать динамический характер сложных задач и синтезировать над гетерогенным визуальным полем релевантный на момент решения задачи интегрированный метод. Используя гетерогенное визуальное поле, устанавливающее взаимосвязь символьных и визуальных знаков, ФГиИС могут управлять имитационным процессом, подключая механизмы визуально-пространственного, образного мышления, когда возникает существенная неопределенность. Эти механизмы позволяют пользовате-



лю «увидеть» приближенное решение сложной задачи или ее подзадач, которое впоследствии может быть обосновано и уточнено методами логико-математических рассуждений.

Применяя ФГиИС с гетерогенным визуальным полем, оперативнодиспетчерский персонал имеет возможность наблюдать текущие о- и рситуации в электросетях, анализировать текущий режим их работы, по щелчку мыши получать подробную информацию о событиях, обуславливающих отклонение ситуации от нормальной, а также наблюдать краткосрочный прогноз развития ситуаций, составляемый ФГиИС на основе моделирования системы электроснабжения региона. Таким образом, оперативно-диспетчерский персонал переходит от управления по событиям к управлению энергосистемой по ситуации.

### Заключение

Нами были рассмотрены элементы визуального метаязыка гибридных интеллектуальных систем управления электросетями. Символизация и схематизация иерархий ресурсов, ситуативных отношений и состояния объекта управления воссоздает проблемные ситуации и качественно лучше воспринимается человеком, формирует опорные схемы для анализа и конструирования нового, сложного. ФГиИС, разрабатываемые с использованием ИС «Графит» и реализующие грамматику визуального метаязыка, существенно снизят нагрузку на оперативнотехнологический персонал, поскольку визуально-пространственное мышление отображает в сознании окружающий мир в той полноте, которая характерна для человека. Это позволит с одного взгляда понять условия возникновения проблемной ситуации в объекте управления и оценить степень риска перехода и (или) сохранения ненормативного поведения.

Также была представлена архитектура ИС разработки ФГиИС с гетерогенным визуальным полем. Большинство подсистем ИС — конструкторы, применяющие методы визуального управления для моделирования разработчиками внутренней структуры проблемы и метода ее решения. Реализация предложенной архитектуры ИС «Графит» позволит автоматизировать проектирование ФГиИС с гетерогенным визуальным полем в соответствии с ПС-методологией. Процесс решения проблем в ФГиИС с гетерогенным визуальным полем имеет гетерогенный характер: когда область явлений формализована, для поиска решений применяются символьные модели знаний из гетерогенного модельного поля, а когда есть существенная неопределенность, не снимаемая точным анализом и логико-математическим рассуждениями, включаются в действие механизмы визуально-пространственного, образного мышления экспертов-операторов.



### Список литературы

- 1. Medsker L. R. Hybrid Intelligent Systems. Boston, 1995.
- 2. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под ред. А.М. Яшина. СПб., 2001.
- 3. *Колесников А.В., Кириков И.А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М., 2007.
- 4. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / под ред. А.В. Колесникова. М., 2011.
- 5. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М., 2014.
- 6. Колесников А.В., Листопад С.В., Руновская С.Б., Данишевский В.И. Неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей // Информатика и ее применения. 2016. Т. 10, вып. 4. С. 114—120.
- 7. Колесников А.В., Листопад С.В., Майтаков Ф.Г. Метаязык для гибридных интеллектуальных систем визуального управления электрическими сетями: ресурсы, свойства и действия // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28, №3. С. 153-164.
- 8. Колесников А.В., Листопад С.В., Майтаков Ф.Г. Метаязык для гибридных интеллектуальных систем визуального управления электрическими сетями: иерархии, структуры, ситуации и состояния // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2018. № 2. С. 47 58.
- 9. Колесников А.В. Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: матер. IV Всерос. Поспеловской конференции с междунар. участием. Калининград, 2018. С. 18-81.
  - 10. Bowman W. J. Graphic Communication. N. Y., 1968.
- 11. *Sibbet D.* Visual Leaders: New Tools for Visioning, Management, and Organization Change. Hoboken, 2013.
- 12. Fitrianie S., Rothkrantz L.J.M. Two-Dimensional Visual Language Grammar. URL: http://mmi.tudelft.nl/pub/siska/TSD%202DVisLangGrammar.pdf (дата обращения: 15.07.2018).
- 13. *Kremer R.* Visual Languages for Knowledge Representation. URL: http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/kremer (дата обращения: 15.07.2018).
- 14. Oшанин  $\mathcal{A}$ . A. Предметное действие и оперативный образ. Воронеж ; M., 1999.

#### Об авторах

Александр Васильевич Колесников — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; ст. науч. сотр., Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Россия.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Сергей Викторович Листопад — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Россия.

E-mail: ser-list-post@yandex.ru



61

Федор Георгиевич Майтаков — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: maitakov@mail.ru

### The authors

Prof. Alexander V. Kolesnikov, I. Kant Baltic Federal University; Senior Research Fellow, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Dr Sergey V. Listopad, Senior Research Fellow, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: ser-list-post@yandex.ru

Fedor G. Maitakov, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: maitakov@mail.ru