

# МУЛЬТИДОМЕННЫЙ ПОДХОД И МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА В ЗАДАЧАХ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Г.Г. Рогозинский<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: gleb.rogozinsky@gmail.com

## Информация о статье

УДК 004.62

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Рогозинский Г.Г. Мультидоменный подход и модели объектов киберфизического пространства в задачах отображения информации // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 88–93.

**Аннотация:** *Использование методов отображения информации в киберфизических системах сопряжено с рядом проблем в силу значительных объемов информации и нагрузки на человека-оператора. Одним из способов решения этой проблемы является использование полимодальных интерфейсов представления информации. Статья рассматривает общий подход к киберфизическим системам на основе мультидоменной модели, а также ряд моделей киберфизического пространства.*

**Ключевые слова:** *мультидоменная модель, киберфизические системы, сложные системы, системы отображения информации.*

## Введение

Киберфизические системы – новая технологическая парадигма, объединяющая различные информационно-телекоммуникационные системы с позиций выделения и интеграции в единое целое слоя физических элементов и их информационных (кибернетических) отображений (цифровых теней). Наряду с Интернетом вещей, технологиями *BigData* и всепроникающими сенсорными сетями киберфизические системы образуют технологическую платформу для *Industry 4.0* или Четвертой промышленной революции, с приходом которой связывают большие надежды не только специалисты информационно-телекоммуникационной сферы, но и представители экономики, медицины, экологии, транспорта и других сфер [1], [2].

С учетом всепроникающего распространения киберфизических систем разработчики специализированных программно-аппаратных решений занимаются поиском унифицированных подходов, которые позволили бы упростить разработку различных решений в области киберфизических систем и сократили бы затраты на создание специализированных систем контроля и мониторинга. Кроме того, существование унифицированного подхода позволит упростить проблемы, связанные с масштабированием, которое возникнет при

дальнейшем расширении рассматриваемых систем в обозримом будущем технологий *Industry 4.0* на пути к предполагаемой технологической сингулярности. Данные обстоятельства обуславливают необходимость разработки методов описания элементов киберфизических систем.

С ростом увеличивающейся информационной нагрузки одним из наиболее слабых звеньев сложных систем становится человек-оператор. Полное исключение человеческого фактора по-прежнему невозможно в силу очевидных причин. При этом в условиях современной высокотехнологичной среды взаимодействие человека с информационными системами становится все более сложным и многообразным, что может привести к значительной нагрузке на оператора системы и к ошибочным реакциям и действиям в контуре управления.

Рассматриваемые в статье проблемы актуализируют класс задач, направленных на разработку полимодальных интерфейсов, которые позволяют обеспечить близкое к оптимальному распределение информационных потоков между различными сенсорными системами оператора, отвечающими за восприятия различных типов сигналов (модальностей). На сегодняшний день кроме «традиционной» зрительной модальности и, в некоторых

случаях, аудиальной модальности, появляются приложения, использующие тактильные ощущения и ольфакторную компоненту (запахи) [3].

Одной из проблем разработки полимодальных систем представления данных является отсутствие интегрирующих моделей и средств универсального описания процессов, происходящих в различных средах – в физической среде, в среде кибернетической (или информационной) и в когнитивной области. В данной статье мы рассмотрим несколько моделей, формирующих теоретическую основу для будущих исследований в области полимодальных систем.

### 1. Мультидоменная модель коммуникаций

Проектирование эффективных (с точки зрения оптимального демультимплексирования информационных потоков между органами чувств человека – оператора системы) полимодальных интерфейсов взаимодействия в человеко-машинных системах требует разработки соответствующих методов описания, анализа и конструирования представлений, свойств и характеристик объектов и процессов в киберфизических системах.

В качестве фундаментальной основы для описания и анализа проблемы предлагается использовать модифицированную доменную модель инфокоммуникаций [4], [5], позволяющую формально описать процессы информационного взаимодействия, обслуживаемые соответствующими интерфейсами участников процесса.

Рассматриваемая модель инфокоммуникаций предполагает разделение пространства взаимодействия на три уровня (домена), каждый из которых связан с группами объектов общей природы – физическими, информационными (кибернетическими) и когнитивными. Перечисленные выше объекты представляют сущности соответствующих доменов – физического (ФД), информационного (ИД) и когнитивного (КД).

На границах доменов реализуются соответствующие интерфейсы, позволяющие осуществ-

лять взаимодействие между элементами системы. Каждый элемент системы обладает конечным упорядоченным набором состояний, определяющих собственный тезаурус элемента.

Для объекта  $A$ , принадлежащего физическому домену и обладающего множеством состояний собственного тезауруса  $\langle A \rangle^{\xi^A}$ , существует множество информационных представлений в тезаурусе  $\xi^B$ , являющихся сущностями информационного домена. Информационное взаимодействие состоит в изменении состояния объекта-приемника в ответ на воздействие сигнала, сформированного в соответствии с изменением состояния объекта-передатчика:

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{\text{Signal}} \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^B} \quad (1)$$

Возникающее в процессе функционирования системы взаимодействие человека с информационной средой и, через нее, с физической средой, затрагивает все три домена. Выражение (1) в этом случае принимает вид (2):

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{Q_1} \langle C \rangle^{\xi^B} \xrightarrow{Q_2} \langle \langle \langle A \rangle^{\xi^A} \rangle^{\xi^B} \rangle^{\xi^C}, \quad (2)$$

где  $Q_1, Q_2$  – операторы преобразования представлений объекта ФД при формировании сигнала, его трансформациях в процессе передачи и приема;  $\xi^B, \xi^C$  – тезаурусы сигнала и приемника.

На рисунке 1 представлена обобщенная интерпретация мультидоменной модели, в которой отдельно выделена подсистема мониторинга внутри информационного домена, где:  $Q_1$  и  $Q_2$  – операторы преобразования представлений на границах физического и информационных доменов, а также информационного и когнитивного доменов, соответственно;  $Q^j$  – оператор сокращения тезауруса на входе в систему мониторинга;  $M$  – блок мэппинга;  $N_1 - N_i$  – набор интерфейсов (полимодальный мультиплекс), представляющих данные в той или иной модальности.

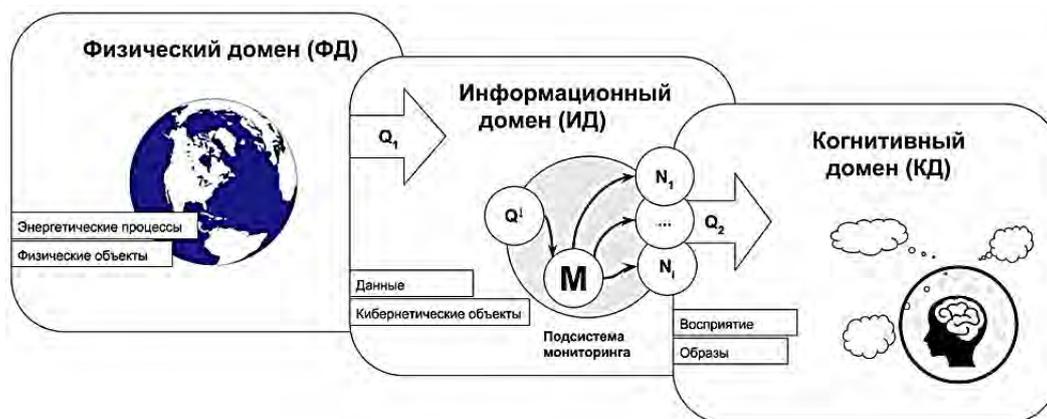


Рис. 1. Мультидоменная модель с выделенной подсистемой мониторинга

В соответствии с рассматриваемой моделью объектами подсистемы мониторинга являются сущности информационного (кибернетического) домена, являющиеся отображениями физических объектов или существующие только в виртуальном пространстве. Очевидно, любая система мониторинга будет использовать тезаурус, меньший, чем общий тезаурус информационного домена, так как среди всего множества возможных параметров, описывающих состояние некой наблюдаемой системы, человеку-оператору для решения задач мониторинга требуется только определенное подмножество параметров.

Для дальнейшего формального описания будем использовать оператор *редукции* или сокращения тезауруса, такой, что:

$$Q^{\downarrow}: \xi^C \subset \xi^{\bar{C}}, \quad (3)$$

то есть сокращенный тезаурус  $\xi^{\bar{C}}$  будет являться подмножеством тезауруса системы в информационном домене  $\xi^C$ .

В терминах доменной модели редукция тезауруса объекта будет записана формально в виде выражения:

$$\langle A \rangle^{\xi^A} \xrightarrow{Q^{\downarrow}} \langle A \rangle^{\xi^{\bar{A}}}, \quad (4)$$

что эквивалентно выражению (5):

$$\langle C \rangle^{\xi^C} \xrightarrow{Q^{\downarrow}} \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}}, \quad (5)$$

где  $C$  – кибернетический объект, являющийся цифровой тенью физического объекта  $A$ .

В обобщенном случае полимодального представления информации введем векторный оператор  $\bar{Z}$ , каждым элементом которого является оператор преобразования тезауруса объекта ИД к тезаурусу соответствующего интерфейса представления информации.

Для четырехмодального случая, включающего, зрительную  $Q^V$ , аудиальную  $Q^A$ , тактильную  $Q^T$  и ольфакторную  $Q^O$  компоненты, имеем:

$$\bar{Z} = \{Q^A; Q^V; Q^O; Q^T\}. \quad (6)$$

В результате воздействия векторного оператора  $\bar{Z}$  на тезаурус объекта в информационном домене в общем случае имеем:

$$\langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \xrightarrow{\bar{Z}} \left\{ \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}}^{\xi^{M_i}}, \quad (7)$$

где  $M_i$  –  $i$ -ая модальность;  $M_{\max}$  – максимальное количество модальностей данных в рассматриваемой системе.

В соответствии с выражением (7) переход от объектов ИД к КД для восприятия сенсорными органами человека-оператора будет записано следующим выражением (8):

$$\left\{ \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}}^{\xi^{M_i}} \xrightarrow{Q_i^N} \left\{ \left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}}^{\xi^{U_i}}, \quad (8)$$

где  $\xi^{U_i}$  – тезаурус оператора в когнитивном домене.

Раскрывая выражение (8), имеем:

$$\left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle_{i=1 \dots M_{\max}}^{Q^{\downarrow}} \xrightarrow{\bar{Z}} \left\{ \left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}} \Big|_{ID} \xrightarrow{Q_i^N} CD \left\{ \left\langle \left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle^{\xi^{M_i}} \right\rangle^{\xi^{U_i}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}} \Big| \quad (9)$$

где  $ID$  – информационный (кибернетический) домен;  $CD$  – когнитивный домен.

Для какой-либо отдельной модальности, например, аудиальной, выражение (9) преобразуется к следующему виду (10):

$$\left\langle \langle C \rangle^{\xi^C} \right\rangle_{i=1 \dots M_{\max}}^{Q^{\downarrow}} \xrightarrow{\bar{Z}} \left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle_{i=1 \dots M_{\max}}^{Q^A} \Big|_{ID} \xrightarrow{Q_i^N} CD \left\{ \left\langle \left\langle \langle C \rangle^{\xi^{\bar{C}}} \right\rangle^{\xi^A} \right\rangle^{\xi^{U_A}} \right\}_{i=1 \dots M_{\max}} \Big| \quad (10)$$

На рисунке 2 представлена модель полимодального мультиплекса данных в киберфизической системе, базирующаяся на модифицированной мультидоменной модели.

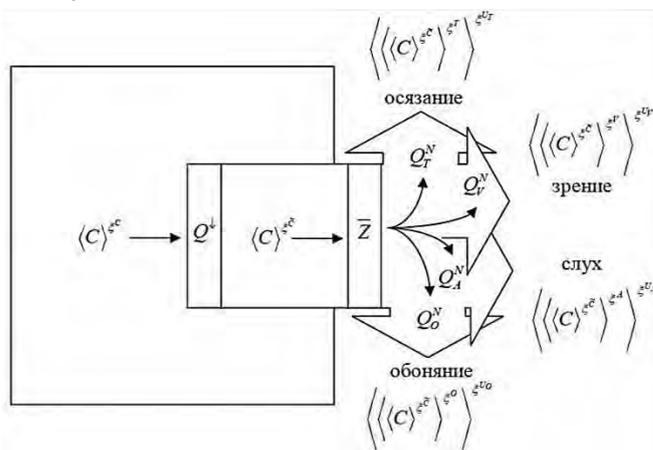


Рис. 2. Модель полимодального мультиплекса данных в киберфизической системе

Представленные выше выражения (7)–(10) дают формальное описание процессам, имеющим место в различных доменах и позволяют использовать единый символичный аппарат, что важно с позиций разработки методов и теоретических моделей, формирующих унифицированный комплекс средств проектирования полимодальных интерфейсов представления данных.

Двигаясь от общего к частному и имея наиболее общую модель междоменного взаимодействия,

нам необходимо далее сфокусироваться на построениях в физическом и информационном доменах, описывающих в терминах мультидоменной модели ряд моделей киберфизических систем.

Введем понятие киберфизического пространства (КФП) для обозначения условной среды, в которой существуют в неразрывной связи физические тела (элементы физического домена) и их информационные сущности (элементы информационного домена) и представим ниже четыре типа киберфизических объектов (КФО), начиная с наиболее простого типа и заканчивая более сложными.

## 2. Четыре типа киберфизических объектов

### 2.1. Киберфизический атом

Модель киберфизического атома (КФА или А-модель) лежит в основе любой киберфизической системы. Атом, как следует из названия, представляет собой наименьший неделимый элемент системы. Соответственно, КФА описывает одну (неделимую с точки зрения киберфизического пространства) сущность физического домена и соответствующую ей кибернетическую часть (цифровую тень), относящуюся к информационному домену. Обе эти сущности образуют единый комплекс, существующий в ФД и ИД.

Здесь можно отметить интересную параллель с множеством комплексных чисел, каждое из которых может быть представлено в виде реальной (*Re*) и мнимой (*Im*) части. При этом в отдельных случаях возможно наличие только мнимой или только реальной компоненты, как и в киберфизической системе, где ряд компонентов могут не иметь цифровых теней, или некоторые кибернетические сущности не имеют физического тела, а лишь выполнять ряд программных задач в ИД.

Пусть  $X$  – киберфизический атом. Тогда  $\langle X \rangle^{\xi^X}$  это данный киберфизический атом, представленный в собственном тезаурусе  $\xi^X$ . Введем два оператора – *Ph* и *Cy*, которые выделяют физическую часть тезауруса и информационную, соответственно:

$$Ph[\langle X \rangle^{\xi^X}] = \langle X \rangle^{Ph(\xi^X)}, \quad (11)$$

$$Cy[\langle X \rangle^{\xi^X}] = \langle X \rangle^{Cy(\xi^X)}. \quad (12)$$

Таким образом,  $\langle X \rangle^{Ph(\xi^X)}$  – физический объект, или часть киберфизического атома, представленная в физическом домене, и  $\langle X \rangle^{Cy(\xi^X)}$  – кибернетическая сущность, или часть КФА, представленная в информационном домене.

На рисунке 3 дано графическое изображение описываемой А-модели. Переход из физического домена в информационный реализуется с помощью различных устройств-сенсоров (*sensor*). Обратный переход выполняется устройствами-актуаторами (*actor*).

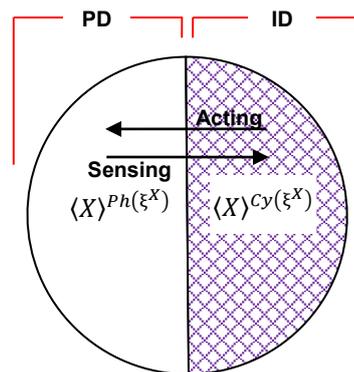


Рис. 3. А-модель. Киберфизический атом

А-модель необходимо рассмотреть для формального описания поведения или состояния отдельного киберфизического объекта, например, в случае, если оператор системы ставит перед собой цель проанализировать отдельный объект, действующий внутри системы. Тем не менее, киберфизическая сеть традиционно представляется сетью взаимодействующих КФО, и в этом случае А-модель будет являться основой для дальнейших, более сложных абстракций.

### 2.2. Киберфизическая топология

Вторая модель, рассматриваемая нами, описывает киберфизическую топологию и называется Т-модель или КФТ. В основе данной модели лежит топологическое описание сети КФА. Т-модель определяет граф сети киберфизического атома. Основной дескриптор Т-модели – матрица связности, в которой главная диагональ содержит единичные элементы. Связи между *i*-ым и *j*-ым КФА, отображаемые в рассматриваемой модели, описываются операторами связи  $Q^{C-C}$ ,  $Q^{P-P}$  и  $Q^{P-C}$ . Нулевые элементы в матрице связности означают отсутствие связи в соответствующем домене (информационном или физическом) между рассматриваемыми киберфизическими атомами.

Оператор физической связи  $Q^{P-P}$  определяет связь типа «физический объект – физический объект», или обмен тезаурусами, происходящий только в ФД. Отметим, что на практике любой из операторов  $Q^{C-C}$ ,  $Q^{P-P}$  или  $Q^{P-C}$  может являться макрооператором и включать в себя последовательность преобразований в соответствующих доменах:  $Q = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_N$ .

Обмен тезаурусами в физическом домене подразумевает физический контакт между физическими компонентами КФА  $\langle X_1 \rangle^{Ph(\xi^{X_1})}$  и  $\langle X_2 \rangle^{Ph(\xi^{X_2})}$ :

$$\langle \langle X_1 \rangle^{Ph(\xi^{X_1})} \rangle^{Ph(\xi^{X_2})} \xleftrightarrow{Q_{1-2}^{P-P}} \langle \langle X_2 \rangle^{Ph(\xi^{X_2})} \rangle^{Ph(\xi^{X_1})}. \quad (13)$$

Кибернетический или информационный обмен реализуется посредством различных протоколов и его особенности описываются оператором инфор-

мационной связи типа «кибер-объект – кибер-объект». По аналогии с выражением (13) имеем:

$$\langle \langle X_1 \rangle_{Cy(\xi^{X_1})} \rangle^{Cy(\xi^{X_2})} \xleftrightarrow{Q_{1-2}^{C-C}} \langle \langle X_2 \rangle_{Cy(\xi^{X_2})} \rangle^{Cy(\xi^{X_1})}. \quad (14)$$

Третий оператор,  $Q^{P-C}$ , является оператором междоменной связи, т. е. описывающим смешанное взаимодействие типа «физический объект – кибер-объект». Здесь мы должны исключить практический смысл объекта другого междоменного объекта  $Q^{C-P}$ , так как прямое взаимодействие типа «кибер-объект – физический объект», при условии, что речь идет о разных объектах, невозможно. Что касается оператора  $Q^{P-C}$ , то примером такого воздействия может служить работа различных датчиков, например, видеокамеры.

На рисунке 4 приведено графическое отображение описываемой Т-модели.

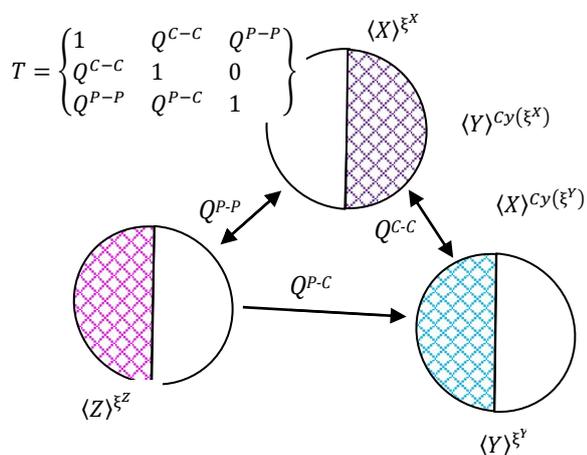


Рис. 4. Т-модель. Киберфизическая топология

Т-модели совместно с набором А-моделей теоретически способны полностью описать любую киберфизическую сеть, однако может потребоваться еще несколько абстракций для удобства моделирования.

### 2.3. Киберфизический кластер

Следующая модель описывает киберфизический кластер (КФК) и называется по аналогии с предыдущими К-моделью. Данная модель проявляет свои полезные свойства в задачах масштабирования сетей КФО. В случае если требуется оперировать значительным числом киберфизических атомов и киберфизической типологии, когда целые созвездия КФА и сегменты общей киберфизической типологии требуется рассматривать как единую сущность, целесообразно использовать К-модель. Соответственно, сложная сеть киберфизического объекта может быть упрощена до описания соединения между несколькими киберфизическими кластерами (рисунок 5).

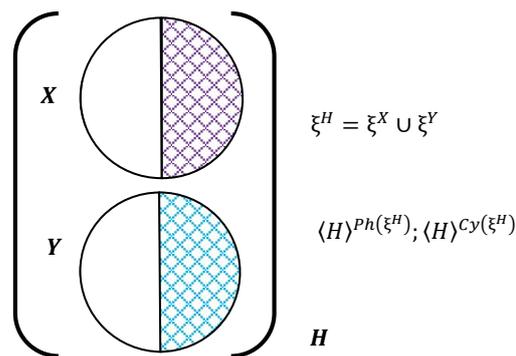


Рисунок 5. К-модель. Киберфизический кластер

### 2.4. Киберфизическая иерархия

Хотя любая КФС может быть описана в терминах киберфизической топологии или с использованием базиса Т-моделей, данный подход не позволит отразить наследственные связи внутри киберфизической сети, а также процессы эволюционных переходов, подпроцессы и т.д. Одновременно с этим, такая информация является существенной, так как выделение классов и экземпляров классов позволит установить соответствующие параллели в тезаурусе подсистемы мониторинга и структурировать процесс представления информации оператору. Таким образом, для описания наследственных связей внутри КФС будем использовать киберфизическую иерархию или Х-модель (рисунок 6).

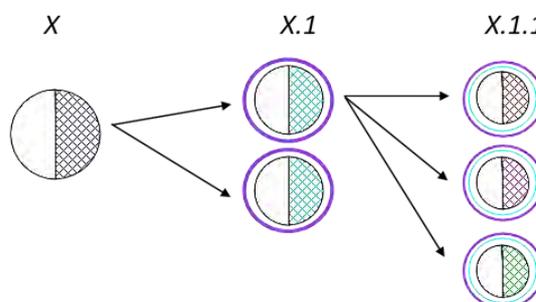


Рис. 6. Х-модель. Киберфизическая иерархия

Х-модель завершает комплекс моделей, используемых для описания КФС. Тем не менее, дальнейшие исследования, направленные на моделирование КФС, могут привести к необходимости создания дополнительных классов моделей.

### Заключение

Подводя итог и обобщая представленные положения, следует сформулировать следующие основные задачи при разработке человеко-машинных интерфейсов.

Во-первых, это определение набора характеристик объектов, как источников информационных потоков, и анализ, включающий в себя выявление диапазонов их изменения, характерных особенностей изменения и т.д.

Во-вторых, это определение параметров и характеристик различных сенсорных систем человека, образующих полисенсорный комплекс. Данная задача представляется в значительной степени решенной, если опираться на существенный объем исследований в физиологии. Тем не менее, ряд вопросов, касающихся психологических аспектов восприятия по-прежнему нельзя считать полностью исследованными.

И в-третьих, это адекватное и корректное отображение множества элементов тезауруса киберфизических объектов (ФД-ИД компоненты) на множество элементов тезауруса системы отображения информации (ИД) для последующего отображения на множество образов когнитивного домена. Следует отметить, что последняя задача не может быть эффективно решена формальным соотносе-

нием элементов двух тезаурусов, так как не учитывает психоэмоциональных аспектов восприятия сигналов различной природы, и, в силу этого, требует специфических междисциплинарных подходов и формирования нетривиальных критериев оценки возможных решений.

Доменная модель инфокоммуникаций обеспечивает общую методологию, которая включает в себя методы формального описания физических, кибернетических и киберфизических процессов, а также способы количественного анализа параметров и характеристик используемых систем. В то же время данная модель инфокоммуникаций предоставляет возможность учитывать слабо формализованные компоненты интерфейсов, связанные с психофизиологическими и эмоциональными аспектами восприятия.

#### Список используемых источников

1. Малыгин, И.Г., Комашинский В.И., Королев О.А. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 8. С. 3–12.
2. Киберфизическая система управления стивидорным предприятием CPS Stevedore Eye. URL: <http://www.plm.pw/2017/06/cps-stevedore-eye.html>
3. Basov O., Ronzhin A., Budkov V., Saitov I. Method of Defining Multimodal Information Falsity for Smart Telecommunication Systems // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9247. PP. 163–173.
4. Sotnikov, A.D., Rogozinsky G.G. The Multi-Domain Infocommunication Model as the Basis of an Auditory Interfaces Development for Multimedia Informational Systems // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. № 5. С. 77–82.
5. Сотников А.Д. Принципы анализа прикладной области в инфокоммуникационных системах здравоохранения // Труды учебных заведений связи. 2004. № 171. С. 174–183.

\* \* \*

## MULTI-DOMAIN APPROACH AND MODELS OF CYBER-PHYSICAL OBJECTS IN INFORMATION REPRESENTATION SYSTEMS

G. Rogozinsky<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences,  
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

#### Article info:

Article in Russian

**For citation:** Rogozinsky G. Multi-Domain Approach and Models of Cyber-Physical Objects in Information Representation Systems // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 88–93.

**Annotation:** *The usage of information representation methods in cyber-physical systems features several problems due to a large amount of data and informational overload. One possible solution is the polymodal representation of the information. The paper reviews a generalized approach to the cyber-physical systems, which is based on multi-domain model and several models in cyber-physical space.*

**Keywords:** *multi-domain model, cyber-physical systems, complex systems, information representation systems.*