

УДК 519.7+681.51

Т. Л. Качанова, Б. Ф. Фомин, О. Б. Фомин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Цифровые двойники открытых систем

Рассматривается область физики открытых систем, в рамках которой открытые природные, антропогенные, кибер-физические, общественные и технические системы исходно заданы их полными и предствительными (насколько это возможно) эмпирическими описаниями, полученными из больших массивов полимодальных гетерогенных данных, накопленных эмпирической наукой. В этой области становления и развития физики открытых систем созданы научные методы и компьютерные технологии, обеспечившие познание, научное понимание и рациональное объяснение состояний, свойств и закономерностей изменчивости открытых систем с сотнями, тысячами и десятками тысяч показателей без обращения к экспертному знанию, субъективному анализу и интерпретациям. На этой основе возникла многомерная знание-центрическая аналитика открытых систем в их естественных масштабах и реальной сложности, идет становление новой парадигмы системных исследований и разработок. Статья содержит обзор возможностей применения этой парадигмы для автоматической генерации умных моделей и цифровых двойников открытых систем в сложных предметных областях.

Открытые системы, физика открытых систем, собственные качества систем, состояния систем, реконструкции состояний систем, цифровые двойники

Физика открытых систем (ФОС) возникла на базе статистической физики и *синергетической парадигмы* [1], [2]. Открытые системы в ФОС – математические динамические модели. ФОС понимает открытость систем как принцип, их сложность рассматривает как сложность движения. Предметом ФОС является теория сложности, а сверхзадачей – научное понимание взаимосвязи сложности систем и законов природы.

В середине 1990-х появилось новое направление ФОС, в рамках которого идет становление киберфизической парадигмы познания открытых систем, заданных эмпирическими описаниями [3], [4].

Объектами ФОС являются открытые системы (природные, антропогенные, общественные, технические). ФОС исследует их в естественных масштабах и реальной сложности. ФОС извлекает научно-достоверное знание о системе из больших многомерных массивов слабоструктурированных полимодальных гетерогенных данных. ФОС обеспечивает научное понимание и рациональное объяснение полученного знания, исследует его ценность (правильность, полноту, завершенность), выполняет на основе знания исследование свойств, состояний и эволюции открытых систем [5].

Началом ФОС стало решение общей задачи реконструктивного анализа систем [6]–[8]. Оно

открыло широкие возможности для получения научно-достоверного знания об онтологии систем. Принципиальное значение для развития ФОС имело создание языка систем. Благодаря языку удалось понять внутренний код систем, проявленный в онтологическом знании [9], [10]. Через язык реконструктивный анализ систем приобрел статус научной теории. Еще одним ключевым результатом ФОС стал дизайн состояний систем, обеспечивший рациональное объяснение онтологического знания и научный ответ на вопрос: «каким образом онтологическое знание связано с ключевыми понятиями действительного мира систем – показателями, состояниями, свойствами показателей, свойствами состояний, изменчивостью показателей, изменчивостью состояний, изменчивостью свойств?» [9], [11], [12].

Эти три основополагающих результата ФОС (реконструктивный анализ, язык систем, дизайн состояний) обеспечили возможность построения цифровых двойников (ДТ) открытых систем [13].

Система в данных. В каждой исследуемой системе отображается эмпирически наблюдаемая действительность. Будучи вовлеченной в познавательный процесс, она порождает онтологическое знание на основе общих методологических инструментов ФОС. Формы и объем этого знания детерминированы имеющимся эмпирическим

описанием системы [6]. Система в ее естественном масштабе, реальной сложности и реальном окружении исходно представляется таблицей «Объект–свойство» как система в данных. Каждая строка таблицы (объект) – одно отдельно взятое актуальное состояние системы. Каждый столбец таблицы (свойство) – показатель с уникальным именем, характеризующий одно отдельно взятое свойство системы или свойство ее окружения. Количество строк (десятки, сотни, тысячи) – представительное выборочное множество актуальных состояний системы. Количество столбцов (сотни, тысячи, десятки тысяч) – полный набор свойств, характеризующих состояние системы с учетом ее окружения. Систему характеризуют ее эмпирический и статистический портреты. Эмпирический портрет содержит общие внешние оценки исходного представления системы, статистический портрет интегрально характеризует изменчивость всех показателей системы и ее окружения.

Система в отношениях. Система в целом представляется графом связей (ГС) как система в отношениях [6]. Вершины графа – все показатели системы, ребра – все парные статистические связи показателей. Каждая связь рассматривается независимо и является смысловой частью системы в целом. Каждая связь имеет атрибуты: знак, силу, значимость, сложность. Систему в отношениях характеризует ее структурный портрет. В нем содержатся интегральные оценки качества форм выражения и полноты проявления сущности системы через множества атрибутов – считаемых величин, интегрально характеризующих все структурные элементы ГС (парные связи, звездные подграфы ГС, специальные двухслойные подграфы ГС), и оценки, характеризующие ГС в целом.

Система в качествах. Система во всей ее сложности и единстве целого представляется как система в качествах [6]–[8]. Она задается полным реконструктивным семейством системных моделей (СМ) и полным множеством моделей внутрисистемных взаимодействий (МВ). Каждая СМ является моделью какого-то одного отдельно взятого собственного качества системы. В каждом своем собственном качестве система является частью целого и всем целым в условиях этой части. Семейство СМ задает полный спектр ее собственных качеств. Внутрисистемные отношения на множестве качеств системы представляются моделями семейства МВ. Они описывают механизмы формирования единства и целостности

системы. Система в качествах выражает научно-достоверное знание об общей онтологии системы и раскрывает сложность системы через совокупность ее уникальных собственных качеств. Знание об онтологии системы содержит ее системный портрет. В нем представлены интегральные оценки раскрытой сложности системы.

Система в эталонах. Научное понимание знания об онтологии системы обеспечивает язык систем [9]. Научно понятое знание содержит представление системы в эталонах. В этом представлении системы задаются образы всех ее собственных качеств, способных воплощаться в актуальных состояниях [10], [11]. Свойство системы передавать и актуализировать свои смыслы выражается через абсолютные оценки оформленности и однородности ее собственных качеств. Такие оценки получаются при сопоставлении каждой СМ с базовым образцом, в котором интегрированы лучшие свойства всех моделей семейства СМ. Предельные смысловые формы каждого собственного качества задаются эталонами состояния системы. Результаты научного понимания качества знания о системе в целом, объема знания и главных аспектов знания содержатся в отчетах «Полнота знания» и «Суть знания». Отчет «Полнота знания» характеризует: возможность генерации завершеного знания об общей онтологии системы (оценки неоднородной сущности системы); способность раскрывать и правильно переносить на эмпирический факт все смысловые формы системы (оценки многокачественной сущности системы). Отчет «Суть знания» характеризует: способность передавать вовне понятия смыслы системы (оценки понятий типов качеств); завершенность устройства смысловых форм системы (оценки эталонных состояний); законченность верификации эталонов системы (оценки смысловых носителей).

Система в моделях форм воплощения эталонов. Переход от смысла к факту и актуализация смысла в эмпирическом факте выражается через смысловые фигуры факта. Каждое собственное качество системы проявлено в любом ее актуальном состоянии и представлено в нем каким-то одним эталоном состояния этого качества. Воплощения эталонов могут блокироваться характерными формами типов МВ. Каждому эталону отвечает кластер актуальных состояний системы, любое из этих состояний усвоило смысл данного эталона. Показатели объектов кластера оцениваются по их способности проявлять смысл этало-

на. Каждый эталон проявлен в факте множеством форм его воплощения. Системный смысл, усвоенный фактом, выражается через представление системы в моделях форм воплощения эталонов [11], [12]. Отчет о таком представлении системы содержит интегральные оценки: кластеров эталонов; областей изменчивости воплощенных эталонов; многообразий смысловых форм системы; фактической воплощенности и потенциальной реализуемости смысловых форм; согласованности системных и конкретно-предметных смыслов показателей системы.

Система в состояниях. Любое отдельно взятое актуальное состояние системы представляется сборкой эталонов. Каждая сборка есть реконструкция конкретного состояния, его формальная модель, носитель знания о состоянии и эмерджентных свойствах системы в этом состоянии. Реконструкция объясняет закономерность совместной согласованной изменчивости показателей состояния системы [5], [11], [12]. Показатели в реконструкциях состояний детерминированы определенными системными механизмами, формирующими уровни значений показателей и потенциалы их изменчивости. Через реконструкции состояний система в целом представляется как система в состояниях. В этом представлении системы содержится полный объем знания о системе в целом, об эталонах системы, о состояниях системы. Система в состояниях – завершённый оформленный образ сущности системы, в котором:

- закончен синтез смысла и факта, обеспечена соразмерность смысла и факта;
- значения всех показателей во всех состояниях детерминированы, проявлены главные механизмы, ответственные за формирование и подвижность состояний;
- все актуальные состояния, исходно заданные системой в данных, описаны формальными реконструкциями состояний;
- полученные реконструкции интегрально характеризуются: числом реконструкций; средним количеством эталонов на одно состояние; долями показателей, охваченных реконструкциями; качеством моделирования реальных значений показателей уровнями их значений; классами механизмов, формирующих уровни значений показателей и изменчивость состояний; распределением реконструкций по характерным группам состояний и параметрам порядка.
- научное понимание и рациональное объяснение актуальных состояний выражены общими итоговыми оценками.

Ценностно-оценочный процесс. Знание об онтологии системы подвергается исследованию его ценности. Активности ценностно-оценочного процесса формируют оценочные суждения относительно всех форм представления системы, полученных при производстве системного знания. Оценочные суждения обеспечивают всесторонний анализ законченности форм представления, оценивают полноту переноса смыслов из одной формы представления в другую, исследуют истинность, определенность, теоретическую и эмпирическую обоснованность онтологического знания [9]–[12]. На их основе формируются и выполняются улучшающие изменения форм представления системы, вырабатываются рекомендации по совершенствованию полного системного контекста.

Квалиметрия системного знания. Ценность знания выражается в оценочных высказываниях [12]. Каждое высказывание характеризуют: объект (элемент знания); тип оценки (абсолютная / сравнительная); основание оценки (аспект сущности ценности объекта); субъект оценивания (метод ФОС). Абсолютная оценка применяется к одному объекту, использует понятие идеала (нормы). Сравнительная оценка применяется, по крайней мере, к двум объектам или к двум состояниям одного и того же объекта. Оценки ценности имеют качественную или количественную природу. Для каждого аспекта оценивания и каждой оценки применяется особая шкала (лингвистическая, порядковая (ранговая), количественная (метрическая)). Все объекты, оцениваемые по одному и тому же аспекту, сопоставимы. Оценки характеризуют завершенность ценностно-оценочного процесса и качество полученного системного знания. Для их вычисления применяется собственный аппарат предобработки, шкалирования, агрегирования, визуализации. Оценки ценности связывают научный метод ФОС и практику его применения. Акцент сделан на практике.

Ресурсы системного знания. Степень доверия к результатам когнитивных процессов производства онтологического знания формируется ценностно-оценочным процессом, наделяющим все элементы знания атрибутами правильности, завершенности, полноты, качества, значимости, применимости. Итоги анализа ценности знания представляются в отчетах об информационном, интеллектуальном и технологическом ресурсах системного знания [12].

В каждом отчете оценочные суждения представлены критериями оценивания и семантикой языка систем. Критерии возникают в результате шкалирования оценок качеств понятий, заданных категориями ТехноКубов когнитивных процессов научного понимания и рационального объяснения полученного онтологического знания [6], [11]. При формировании ресурсов знания шкалируются оценки изменчивости, многовидности, системной предназначенности показателей, выраженности структур отношений, структурных инвариантов, смыслового носительства; свойств показателей, форм воплощения эталонов, состояний, внутрисистемных взаимодействий. Через слова и семы языка систем оцениваются уровни проявления и раскрытия смыслов, ранги показателей, ранги СМ.

Единая технология. Для построения ДТ создана единая технология (ЕТ) ФОС. В ее состав вошли:

- система сопряженных информационных и когнитивных технологий ФОС;
- комплекс программ для автоматического производства и эксплуатации научно-достоверного знания об открытых системах технологиями ФОС;
- комплекс программ многомерной знаниецентрической системной аналитики ФОС;
- компетенции, методики и лучшие практики применения научных методов, технологий и программных комплексов ФОС в исследовательской, аналитической и проектной деятельности.

Технологическая платформа. Создание и апробация ЕТ ФОС шли параллельно с разработкой технологической платформы (ТП) ФОС. На разных этапах этого проекта проводились испытания и экспертизы в рамках НИОКР, выполнявшихся в перспективных приложениях.

К концу 2019 г. ТП обладает следующими возможностями:

- автоматически извлекает из больших многомерных массивов полимодальных гетерогенных эмпирических данных научно-достоверное знание об онтологии открытых систем;
- автоматически обеспечивает научное понимание и рациональное объяснение полученного онтологического знания о свойствах, состояниях и механизмах изменчивости открытых систем сотнями и тысячами показателей;
- автоматически исследует ценность полученного знания (его правильность, полноту, завершенность, качество, значимость);

- автоматически генерирует ресурсы системного знания (информационный, интеллектуальный, когнитивный, технологический) для аналитической, исследовательской и проектной деятельности;

- автоматически формирует нормативные документированные отчеты о результатах познания, научного понимания и рационального объяснения онтологического знания;

- автоматически оформляет полученное знание;

- автоматически проводит предметную экспертизу ресурсов системного знания и на этой основе автоматически генерирует ресурсы решений конкретно-предметных системных проблем;

- поддерживает разработку программ-решателей общих системных проблем и создание RTD-кластеров для целевых доменов исследований и разработок.

ТП работает по единому сценарию, охватывает полный цикл автоматической генерации и верификации научного знания о системах, формирует на основе полученного знания адекватные ДТ и применяет их для решения сложных научных и прикладных системных проблем.

Цифровой двойник системы. ТП ФОС поддерживает совместную работу системных аналитиков и экспертов-предметников по формированию многомерных массивов эмпирических данных для создания исходного эмпирического контекста системы, отвечающего требованиям ФОС. На этой основе ТП ФОС автоматически генерирует цифровой двойник системы (DTS) без обращения к экспертному знанию, субъективному анализу и интерпретациям.

Понятие DTS означает полную завершенную компьютерную модель системы, основанную на научном знании. Компонентами модели являются: эмпирическая реальность системы (DTS-reality), цифровые двойники собственных качеств системы (DTS-quale), состояний системы (DTS-state), внутрисистемных взаимодействий (DTS-interaction), системы в целом (DTS-whole).

DTS-reality. Компонент DTS-reality имеет своими образующими систему в данных, систему в отношениях, а также информационный ресурс системного знания. Компонент DTS-reality определяет, оформляет и предоставляет научно-достоверное знание о показателях, характеризующих феномен системы как эмпирическую реальность. Это знание выражается через:

– выборочные множества наблюдаемых (измеряемых) значений показателей системы и ее окружения; дескриптивные статистики распределений показателей; оценки представительности, которые совместно с оценками представительности типичного и особенного характеризуют способность показателей проявлять сложность системы в эмпирическом факте;

– элементы вектора состояния; оценки осуществленности и опознания состояний, характеризующие полноту, представительность, уникальность и воспроизводимость системы в данных;

– показатели, участвующие в атрибутированных бинарных отношениях; оценки коррелятивности и выражения внутрисистемных взаимодействий, характеризующие атрибутированные структуры отношений как источники информации о взаимодействиях в системе.

DTS-quale. Компонент DTS-quale имеет своими образующими систему в качествах, систему в эталонах, а также интеллектуальный ресурс системного знания. Компонент определяет, оформляет и предоставляет научно-достоверное знание о собственных качествах системы, рассматриваемых как независимые сущности. Это знание выражается через:

– системные роли показателей; смысловые активности показателей; оценки системной обусловленности, многовидной изменчивости, системной различимости, предпочтения и нагруженности показателей как носителей системных смыслов;

– полный спектр собственных качеств системы; оценки выраженности системных смыслов, координированной раздельности, завершенности устройства, характеризующие правильность, полноту, завершенность оформления смыслов в структурных инвариантах системы;

– квалитетические оценки оформленности и однородности каждой СМ;

– инварианты структур и состояний (стереотипы поведения, эталоны состояний); оценки системной и предметной определенности, области изменчивости и нагруженности, характеризующие качество и потенциал верификации инвариантов.

DTS-state. Образующими компонента DTS-state являются система в моделях форм воплощения эталонов, система в состояниях, а также технологический ресурс системного знания. Компонент определяет, оформляет и предоставляет

научно-достоверное знание о реконструкциях актуальных состояний системы. Это знание выражается через:

– кластеры носителей воплощенного смысла собственных качеств системы (представительность кластеров, системные и предметные роли показателей); полный объем воплощенного смысла, оценки близости носителей смысла к эталонам, оценки реализации потенциала верификации; оценки гетерогенности ядер эталонов состояний;

– реконструкции актуальных состояний системы; атрибуты показателей и эталонов состояния собственных качеств системы; оценки полноты описания состояний, объема реконструкций, объяснимости уровней значений показателей.

DTS-interaction. Образующими компонента DTS-interaction служит семейство МВ (синглетные, дублетные, триплетные виды внутрисистемных взаимодействий, возникающих в условиях неравновесия, метастабильности и резонанса). Компонент определяет, оформляет и предоставляет научно-достоверное знание о внутрисистемных механизмах. Это знание выражается через:

– виды моделей взаимодействия (синглеты, дублеты, триплеты) каждой СМ, в которой она участвует; оценки участия СМ в различных типах взаимодействия; среда проявления и среда распространения взаимодействия;

– актуальные формы видов моделей взаимодействия, оценки чистоты проявления типов взаимодействия каждого вида, форм взаимодействия каждого типа, способов реализации системных механизмов взаимодействия каждой формы (подобие, переключение, обратная связь, блокировка, ограничение, колебательность, влияние параметров локального и глобального действия и др.).

DTS-whole. Компонент DTS-whole представляет систему как организованное целое. Он определяет, оформляет и предоставляет научное знание о системе в целом как о феномене реального мира и оценивает полноту этого знания. Знание выражается через:

– «сборки» механизмов внутрисистемного взаимодействия, детерминирующих изменчивость уровней значений каждого центра порядка целой системы;

– «сборки» моделей механизмов внутрисистемного взаимодействия, объясняющих все актуальные

состояния целой системы в условиях равновесия ее центров порядка при неравновесных ограничениях с учетом влияния окружения системы.

Кибер-физическая парадигма ФОС открыла реальные возможности для автоматического производства DTS прямо из эмпирических описаний открытых природных, общественных, антропогенных и технических систем с сотнями, тысячами и десятками тысяч переменных. ТП ФОС автоматически преобразует большие многомерные массивы эмпирических данных в «умные» модели (виртуальные аналоги) систем, предоставляющие исследователям и аналитикам полное завершённое научное знание о раскрытой, понятой и объясненной сложности систем [5].

Исследователи, работающие в разных областях науки с большими массивами данных, могут прямо применять DTS для познания, понимания и объяснения на строгой научной основе устройства, состояний, внутрисистемных механизмов изменчивости и эмерджентных свойств изучаемых систем [14]–[18].

Исследователи и аналитики, использующие продвинутое методы науки о данных (machine learning, predictive models, statistical learning, deep learning, нейронные и вероятностные сети) [19]–[25], получили благодаря ФОС новую, не имеющую аналогов многомерную системную аналитику. Она возникла в результате выполнения в ТП ФОС автоматической предметной экспертизы знания из DTS, автоматической экспликации этого знания на уровне предметных онтологий и онтологий предметных задач, автоматической генерации информационного, интеллектуального и технологического ресурсов решения системных задач на основе DTS и его расширения конкретно-предметным знанием о системе и системных проблемах [5]. В настоящее время многомерная аналитика ФОС имеет лидирующие методы естественной системной классификации; типизации системных эффектов многофакторных воздействий; идентификации событий, состояний, ситуаций и прогноза эволюции открытых систем; системной компаративистики [5], [26]–[30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем. М.: Janus-K, 2002
2. Klimantovich Y. L. Statistical Theory of Open Systems. Vol. 1: A Unified Approach to Kinetic Description of Processes in Active Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
3. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Основания системологии феноменального. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999.
4. Kachanova T., Fomin B. Physics of Systems is a postcybernetic paradigm of systemology // Intern. Symp. «Science 2.0 and Expansion of Science: S2ES» in the context of the 14th World-Multi-Conf. «Systemics, Cybernetics and Informatics»: WMSCI 2010. Orlando, 2010. P. 244–249.
5. Kachanova T., Fomin B., Fomin O. Generating scientifically proven knowledge about ontology of open systems. Multidimensional knowledge-centric system analytics // *Ontology in Information Science* / ed. by T. Ciza. Rijeka: InTech, 2018. P. 169–204.
6. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Технология системных реконструкций. СПб.: Политехника, 2003
7. Kachanova T., Fomin B. Physics of open systems: Generation of system knowledge // *J. Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2013. № 11(2). P. 73–82.
8. Kachanova T., Fomin B. Cognition of ontology of Open Systems // *Procedia Computer Science* J. 2017. № 103. P. 339–346.
9. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Введение в язык систем. СПб.: Наука, 2009.
10. Scientific understanding of ontological knowledge about open systems that is automatically mined from big data / B. F. Fomin, K. A. Turalchuk, T. L. Kachanova, O. B. Fomin // *Proc. of the 33rd Intern. Business Information Management Association Conf., IBIMA 2019*. Granada, 2019. P. 8870–8876.
11. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Методы и технологии генерации системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.
12. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Квалитология системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.
13. Fomin B. F., Kachanova T. L., Fomin O. B. Digital twins of open // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019. Vol. 95. P. 305–314.
14. Global system reconstructions of the models of solar activity and related geospheric and biospheric effects / B. Fomin, T. Kachanova, M. Khodachenko, N. Belisheva, H. Lammer, A. Hanslmeier, H. Biernat, H. Rucker // *Proc. of 39th ESLAB Symp. «Trends in Space Science and Cosmic Vision 2020»*. Noordwijk, 2006. P. 73–82.
15. Physics of open systems: A new approach to use genomics data in risk assessment / V. Ageev, B. Fomin, O. Fomin, T. Kachanova, C. Chen, M. Spassova, L. Kopylev // *The Continuum of Health Risk Assessments* / ed. by M. Tyshenko. InTech, 2012. P. 135–160.
16. Physics of open systems: Effects of the impact of chemical stressors on differential gene expression /

V. Ageev, B. Fomin, O. Fomin, T. Kachanova, C. Chen, M. Spassova, L. Kopylev // J. Cybernetics and Systems Analysis. 2014. № 50(2). P. 218–227.

17. Генерация системного знания по проблемам социальной напряженности в регионах России / В. О. Агеев, А. В. Арасланов, Т. Л. Качанова, К. А. Туральчук, Б. Ф. Фомин, О. Б. Фомин // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 2–1 (147). С. 300–308.

18. Аналитическая подготовка реинжиниринга производства металлопродуктов на основе системного знания / В. О. Агеев, Т. Л. Качанова, Б. Ф. Фомин, О. Б. Фомин // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 4 (159). С. 141–155.

19. Murphy K. P. Machine learning: A probabilistic perspective. The MIT Press Cambridge. Massachusetts, London, 2012.

20. Forrester A., Sobester A., Keane A. Engineering Design via Surrogate Modeling. A Practical Guide. New-York: Wiley, 2008.

21. Бернштейн А. В., Кулешов А. П. Математические методы построения метамоделей // Тр. 3-й Междунар. конф. «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2009). Звенигород, 2009. С. 756–768.

22. Vapnik V. The nature of statistical learning theory. New-York: Springer, 2000.

23. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. MIT Press, 2016.

24. Jensen F. V., Nielsen T. D. Bayesian networks and decision graphs. New-York: Springer, 2001.

25. Pearl J. Causality: Models, reasoning, and inference. New York: Cambridge University Press, 2000.

26. Kachanova T., Turalchuk K., Fomin B. Class Reconstruction in the space of natural system classification // Procedia Computer Science. 2019. № 150. С. 140–146.

27. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Системная онтология классов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 7. С. 25–36.

28. Естественная классификация острых отравлений фосфорорганическими веществами / В. О. Агеев, Т. Л. Качанова, Б. Ф. Фомин, К. А. Тральчук // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 8–17.

29. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Системные эффекты многофакторных воздействий в открытых системах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 1. С. 28–37.

30. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Применение метода определения системных эффектов многофакторных воздействий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 2. С. 19–29.

T. L. Kachanova, B. F. Fomin, O. B. Fomin
Saint Petersburg Electrotechnical University

DIGITAL TWINS OF OPEN SYSTEMS

Considers a field of Physics of open systems, where open natural, anthropogenic, cyber-physic, social, and technical systems initially given by their complete and representative (as far as possible) empirical descriptions, obtained from huge amount of multimodal heterogeneous data collected by empirical science. Within this field where Physics of open systems forms and develops, the scientific methods as well as computer technologies were created to support the processes of cognition, scientific understanding and rational explanation of the states, properties, and variability regularities inherent in open systems that can be represented through hundreds, thousands, and tens of thousands of variables without resorting to experts knowledge, subjective analysis, and interpretations. On this basis a multidimensional knowledge-centric analytics of open systems has arisen. In doing so, these systems are considered at their natural scale and real complexity. At present time, a new paradigm of system research and development continues to form. This paper contains a review of possibilities of how to apply this paradigm in complex subject matter areas for automatic generating the smart models and digital twins of open systems.

Open systems, physics of open systems, systems' eigen qualities, systems' states, reconstructions of systems' states, digital twins of systems
