

**А. В. Колесников, С. Б. Румовская
Э. В. Ясинский, С. А. Солдатов**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ
ОПЕРАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКОЙ МЕТОДАМИ
КОГНИТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
Часть 1**

57

Оперативная работа с образом в интеллектуальных сложных динамических системах управления непосредственно не воспринимаемого объекта, проецирование на этот образ информации, поступающей извне, — трудная задача оператора. В связи с этим разработка компьютерной имитации когнитивных образований приведет к усилению человеческого интеллекта в оперативной работе путем дополнения естественных способностей оператора обрабатывать оперативно-технологическую информацию программно-аппаратными средствами (механизмами), расширяющими мыслительные процессы человека. В предлагаемой статье представлены результаты работы первого этапа второго года исследований по тематике когнитивных гибридных интеллектуальных систем, а именно результаты исследования системы оперативно-технологического управления региональной электроэнергетической системой, категоризации онтологической семантики объективной реальности и математической реальности объекта оперативно-технологической деятельности.

One of the most difficult task for an operator is the operational work with an image in intelligent complex dynamic control systems of a directly not perceptible object and projecting information from the outside onto this image. In this regard, the development of computer imitation of cognitive formations will lead to an increase in human intelligence in operational work, by supplementing the operator's natural abilities to process operational and technological information by software and hardware (mechanisms) that expand human thought processes. This paper presents the results of the work of the first stage of the second year of the research on the topic of cognitive hybrid intelligent systems. Namely, results of the study of the operational and technological control system of the regional electric power system, results of the categorization of the ontological semantics of the objective reality and the mathematical reality of the object of technology operations activities.

Ключевые слова: интеллектуальная электроэнергетическая система, система оперативно-технологического управления, онтологическая семантика объекта управления, объективная и математическая реальность объекта управления.

Keywords: intelligent power system, operational and technological control system, ontological semantics of a control object, objective and mathematical reality of the control object.



Человек — существо образное в реальности, в представлениях, в мечтаниях — в жизни и за пределами ее.

В. В. Козлов, И. А. Донченко

Введение

Российская Федерация обладает существенным потенциалом для того, чтобы стать одним из международных лидеров в развитии и использовании технологий искусственного интеллекта, чему способствует высокий уровень базового физико-математического образования, сильная естественнонаучная школа, наличие компетенций в области моделирования и программирования [2]. В Калининграде такая региональная школа сложилась и работает в рамках Российской ассоциации искусственного интеллекта под руководством доктора технических наук, профессора Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта А. В. Колесникова. В настоящее время работа школы сконцентрирована на интеллектуализации электроэнергетических систем и установок и медицинской диагностике методами гибридных интеллектуальных систем.

Искусственный интеллект — комплекс технологических решений для имитации когнитивных функций человека, включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма, для результативного решения конкретных задач не хуже человека [2].

Интеллектуализация электроэнергетики — применение новых информационных технологий для создания интеллектуальной энергосистемы (ЭС) с системой управления, располагающей совокупностью моделей мира и обладающей «мыслительными способностями» в отношении управления режимными изменениями, свойственными человеческому разуму [3]. Интеллектуальная деятельность единых центров управления сетями (ЕЦУС), центров управления сетями (ЦУС), оперативно-диспетчерских служб (ОДС) «оживляет», изменяет и приспособливает пассивные электрические сети к работе в условиях физической реальности. В составе интеллектуальной электроэнергетической системы (ИЭС) электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в зависимости от режимов работы энергосистемы [4].

Настоящая работа содержит результаты моделирования когнитивных механизмов схематизации предметно-изобразительных, образных представлений о событиях, ситуациях, режимах и состояниях объекта управления у оперативных работников ЕЦУС, ЦУС и ОДС и развивает труды Д. А. Поспелова и В. Н. Пушкина, которые неразрывно связывают качество и надежность диспетчерского труда с построением в структурах мозга посредством «языка» информационных аналогов ресурсов той среды, в которой живет и действует человек-оператор. Воссоздавая тот или иной ресурс окружающей среды, оператор фиксирует его свойства относительно времени и в своем сознании изменяет отражаемый ресурс, преобразует его. Благодаря способности строить информационные модели («внутренние образно-концептуальные модели обста-



новки», по Г. В. Дружинину [5], «образно-концептуальные модели обстановки», по С. И. Магиду [6], «концептуальные модели деятельности», по С. А. Дружилову [7]), которые следует отличать от информационных моделей-мнемосхем на «языке мнемонического изображения» (по Д. А. Ошанину), оператор апробирует варианты поведения «про себя», прежде чем начать действовать.

В настоящей статье представлена первая часть работы, проведенной группой исследователей под руководством А. В. Колесникова. В ней изложены результаты анализа особенностей и структуры системы оперативно-технологического управления региональными электроэнергетическими системами на примере Калининградской области, а также результаты исследования объекта оперативно-технологического управления с онтологической и математической точек зрения.

Система оперативно-технологического управления региональными электроэнергетическими системами

Слово «описание» применительно к природе на протяжении веков постепенно теряло свой первоначальный смысл и сменилось «математическим описанием природы». В ясную картину мира привносился элемент абстрактности, наглядность исчезла, и оказалось, что математически сформулированные в квантовой теории законы природы относятся не к элементарным частицам как таковым, а к нашему знанию о них [8]. Характер техники особенно резко изменился с развитием теории электричества, в значительной мере использующей природные силы, эмпирически не известные человеку, хотя они и окружают нас повсюду. Сегодня электротехника для многих таинственна, жутковата и по меньшей мере непонятна (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Электротехника и человек:

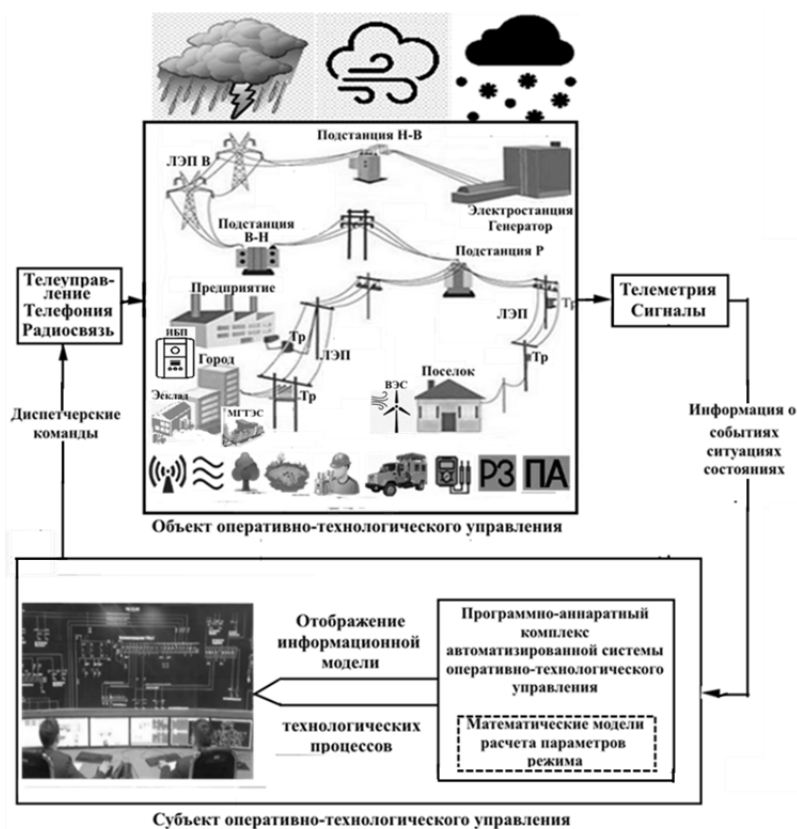
а — люминесцентная лампа, горящая под ЛЭП напряжением 500 кВ в подмосковном Красногорске; б — современный сложный электрический аппарат — подстанция закрытого типа мощностью 50 МВА и напряжением 110 кВ «Береговая» в Калининграде, работающая в автоматическом режиме

Изменения, глубоко затронувшие в электротехническую эпоху окружающий мир, угрожающе деформировали и мышление субъекта оперативной деятельности в ЭС. Еще древний китайский философ Чжуан-цзы определил, что технократии свойственна утрата целостного восприятия мира в технической деятельности людей [9]. Вот рассказ о встрече ученика Конфуция Цзы-гуна со стариком-садовником, черпавшим воду для полива из колодца и носившим ее в горшке. Когда Цзы-

гун посоветовал садовнику воспользоваться водочерпалкой, тот ответил: «Я слышал от своего учителя, что тот, кто пользуется механизмами, будет все делать механически, а тот, кто действует механически, будет иметь механическое сердце. Если же в груди будет механическое сердце, тогда будет утрачена первозданная чистота, а когда утрачена первозданная чистота, жизненный дух не будет покоен...» [9, с. 134].

Отмеченные выше обстоятельства имеют самое непосредственное отношение к системе оперативно-технологического управления региональной электроэнергетической системой, функционирующей в условиях внешней среды, схема которой дана на рисунке 2.

60



Н-В — низкое напряжение — высокое напряжение

В-Н — высокое напряжение — низкое напряжение

Р — распределительная

ЛЭП В — высоковольтная линия электропередачи

Тр — трансформатор

ИБП — источник бесперебойного питания

Эсклад — склад инструментов и электрооборудования оперативно-выездных бригад

МГЭС — мобильная газотурбинная электростанция

ВЭС — ветроэлектрическая электростанция

РЗ — релейная защита

ПА — противоаварийная автоматика

Рис. 2. Схема системы оперативно-технологического управления региональной электроэнергетической системой в условиях внешней среды



Эта схема, сохраняя в целом концептуализацию «объект управления», «субъект управления», «канал обратной связи», «регулятор», «внешняя среда», «вход», «выход», «управление», «информация» и др., общепринятую в теории управления, имеет следующие особенности:

- 1) ограничивается территориально-региональным уровнем ЕЭС;
- 2) специфицирует по отношению «род — вид» содержание концепта «управление» как оперативно-технологическое управление (ОТУ) / оперативно-диспетчерское управление (ОДУ);
- 3) разумно, в предметно-изобразительном и вербальном представлениях отображает состав и основную структуру объекта ОТУ региональной ЭС, актуальные для понимания онтологической семантики протекающих в нем микро- и макротехнологических процессов (при этом смысл части из них во избежание усложнения общего видения отражен изображениями-пиктограммами, расположенными в нижней части фигуры объекта ОТУ);
- 4) разумно, в тех же представлениях показан субъект ОТУ региональной ЭС (на рисунке 2 представлен фрагмент фотографии регионального центра управления сетями ОАО «Янтарьэнерго»: общая информационная модель-мнемосхема на видеостене из LCD-панелей и операторы за диспетчерским пультом);
- 5) терминология каналов прямой и обратной связи адаптирована к терминологии ОТУ и ОДУ региональной ЭС;
- 6) влияние внешней среды ограничено основными элементами природной среды, а также космическими, ионосферными и атмосферными воздействиями.

Онтологическая семантика объекта оперативно-технологического управления в региональной интеллектуальной электроэнергетике

В соответствии с определением ст. 3 ФЗ «Об электроэнергетике», *электроэнергетическая система* — совокупность объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, связанных общим режимом работы в едином технологическом процессе производства, передачи и потребления электрической энергии в условиях централизованного ОДУ [10]. *Объектами электросетевого хозяйства* (рис. 2) являются линии электропередачи, трансформаторные и иные подстанции, распределительные пункты и иное предназначенное для обеспечения электрических связей и осуществления передачи электрической энергии оборудование [10].

Производство электроэнергии в ЭС обладает особенностями, резко отличающими его от других отраслей промышленности:

- 1) производство электроэнергии, ее распределение и преобразование в другие виды энергии происходят одновременно, между мощностями энергосистемы оперативно поддерживается точный баланс;
- 2) относительная быстрота протекания переходных процессов составляет 10^{-4} — 10^{-3} доли секунды; короткие замыкания, включения и отключения, качания, нарушения устойчивости идут от долей секунды



до нескольких секунд; сложность и высокая скорость технологического процесса приводят к большим психофизиологическим нагрузкам на оперативный персонал энергопредприятий и органов диспетчерского управления;

3) тесное взаимодействие со всеми отраслями промышленности, связью, транспортом и т.п. и актуальность надежности и резерва мощности во всех элементах ЭС.

Применительно к производству, технике и технологиям в ЭС в теории систем и системном анализе используется широкий спектр категорий, понятий и терминов, из которых наиболее употребимы «сложная система», «большая система» и «техноценоз». Однако применительно к ИЭС категоризацию нельзя считать завершенной.

Более 2 тыс. лет прошло с момента изложения в аристотелевском «Органоне» онтологической «категориальной сетки» субъектов или предикатов суждения (сущность, количество, качество, отношение, пространство, время, состояние, обладание, действие, претерпевание), которую древний мыслитель забросил в безбрежное море когнитивных абстракций человечества, сложив из добытого фундамент логики западного мышления.

Почти 60 лет назад вышла книга «Вещи, свойства и отношения» философа и логика А.И. Уёмова, обосновавшего три «узловые точки сети понятий», путем наложения которой на объективную реальность человек получает возможность отобразить последнюю во всей противоречивой действительности ее организованного бытия [11]. С тех пор понятия вещи, свойства, отношения представляют основные определения движущейся материи, занимают центральное положение в категориальной структуре знания и выполняют особые методологические функции — обеспечения концептуального единства знаний, регулирования и направления процесса познания, организации реального мира как системы вещей.

Прошло около 30 лет с момента появления онтологической инженерии — междисциплинарной отрасли исследований на основе философской онтологии, теории искусственного интеллекта, экспертных систем и баз данных, получившей широкое практическое приложение в индустрии [12].

Онтология, по Р. Мизогучи, — теория концептов или понятий, используемых как элементы для построения информационных систем [13], это вершина системы философского знания, она «гармонизирует», выстраивает в единое пространство, в единую систему различные части этого мира [12].

Появление и широкое применение термина «инженерная онтология» неслучайно, оно обусловлено осознанием того, что одно из самых уязвимых мест проектов интеллектуальных информационных систем — передача прикладной программе необходимых для диалога «оператор — машина» сведений о реальном мире. «Сознательное» построение онтологии предполагает для технических наук некоторый общий взгляд на структуру языковых смыслов, неформальную систематизацию интуитивных представлений общей структуры понятийной системы,



неизбежно выходит за рамки узкопрофессиональных границ, требует философской культуры и целевого использования прикладных умозрительных построений [14].

Построение онтологии знаний, по В. А. Лапшину, — процесс моделирования этих знаний (концептуализации), то есть построения модели мира решаемой задачи [15].

Понятие реальности объекта управления используется в обыденных рассуждениях, в конкретных науках и в философии в различных значениях [16; 24], хотя смысл его прозрачен и вытекает из противопоставления реального иллюзорному. Реально то, что существует независимо от сознания субъекта-оператора.

Реальный (от позднелат. *realis* 'вещественный, действительный') — действительный, существующий в действительности в противоположность вымышленному, воображаемому, фантастическому, ирреальному, существующему только в сознании [17].

Реальность — существующее в действительности; различают объективную реальность (материю) и субъективную (психику, ощущения, восприятия, волю, эмоции и представления), то есть явления сознания [18]. Синонимами являются вещественность, выполнимость, действительность, достижимость, истинность, конкретность, материальность, материя, осуществимость, осязаемость, очевидность, подлинность, предметность, реалья, субстанция, факт, фактичность и явь [19].

Действительность (от «действие») — осуществленная реальность во всей своей совокупности, реальность не только вещей, но и овеществленных идей, целей, идеалов, общественных институтов, общепринятого знания. Понятие «действительность» противоположно понятию «возможность», а не «иллюзия», «фантазия», которые также могут быть осуществлены [20]. Оно тесно связано с понятием «деятельности» — основы категориального отражения мира. Человек-оператор — «предметное существо», действующее «предметным образом». Перерабатывая природу, он создает предметный мир, а природа становится миром человеческой деятельности. Язык формируется в процессе деятельности как предметный, вещный язык, что делает категорию вещи центральной в его категориальной структуре. Понять, то есть объяснить, бытие вещи — значит образовать понятие вещи [21].

Объективный мир (*объективная реальность*), по А. Я. Райбекасу, — мир вещей, попавших в сферу человеческой деятельности [21].

Объект-реальность, по А. Я. Райбекасу, — вещь сама по себе, в действительности своего системного бытия, ставшая объектом человеческой деятельности. Понятие вещи — самое конкретно-всеобщее во всей категориальной структуре знания [21].

Объективная реальность — мир, существующий независимо от субъекта оперативной деятельности (оператора) и его сознания, представление о мире как о внешней (окружающей) реальности, не зависящей от позиции, понимания и восприятия субъекта ОТУ [22; 23]. «Движение, пространство, время, жизнь и т. д. — всё это свойства или проявления свойств и взаимодействий различных по степени сложности видов материи, которые в совокупности и образуют мир в целом или всю объ-



ективную реальность (бытие). Реальность, существование, действительность — более конкретные и глубокие, чем бытие, характеристики объективных процессов и явлений» [23].

Однако категория «объективная реальность» не является исчерпывающей для представления всех видов и форм реальности, в частности для раскрытия форм реальности, изучаемых физикой. Поэтому на стыке физики и философии, в области оснований физики возникло мировоззренческое понятие «физическая реальность». Это понятие имеет объективный статус, но не совпадает с категорией материи, конкретизируется в физических исследованиях.

Физическая реальность — отражение объективной реальности, изучаемое физикой, когнитивный, материально-идеальный объект, содержание которого формируют объективная реальность и человеческий фактор (практика экспериментов и теоретико-конструктивная деятельность). Физическая реальность, в отличие от объективной, включает в себя и черты человеческой деятельности (материальной и идеальной).

Физическая реальность, по Э.М. Чудинову, — «теоретизированный мир», совокупность «теоретизированных» объектов. Понятие физической реальности характеризует объективно-реальный мир не сам по себе, но в том его виде, как он «просматривается» через призму понятий физической теории [23].

Физическая реальность, по А.Я. Райбекасу, — мир эмпирических физических объектов, физических вещей, физических явлений (предметов) [21].

Выделение материального физического мира связано с выделением физических форм движения материи, а отсюда следует необходимость не отождествлять понятия «материя» и «материальный физический мир» и понятия «материальный физический мир» и «физическая реальность».

Материальный физический мир, по А.Я. Райбекасу, — мир естественных физических объект-реальностей, физический мир как таковой (сам по себе). Теоретическое представление материального физического мира — физическая картина мира [21].

Физическая реальность квантовой теории — форма реальности, в которой реальность проявляется в макроприборе, то есть предполагается явное и однозначное указание на экспериментальную установку, с помощью которой получают результаты, относящиеся к данной физической реальности.

Физическая реальность объекта ОТУ региональной ЭС [25]. Движущийся электрический заряд порождает вокруг себя материальное магнитное поле. Сила, действующая на единичный заряд, принимается за количественную меру поля и называется напряженностью поля. Электрический ток обусловлен созданием и поддержанием напряжения (разности потенциалов) между двумя какими-либо точками, а также наличием проводящей цепи переноса зарядов между этими точками. Разность потенциалов создает электрическое поле, под действием которого в проводниках перемещаются электроны. С ним неразрывно связано электрическое поле, возникающее в результате изменения магнитного поля. Эти два вида материи — компоненты электромагнитных полей, заполняющих пространство вокруг заряженных частиц или за-

ряженных тел. Электрическое поле — самостоятельная физическая реальность, не сводимая ни к тепловым, ни к механическим явлениям [26]. Изменяющиеся во времени электрические и магнитные поля создают единое электромагнитное поле (электромагнитную волну, рис. 3, а), главная особенность которого — движение и перенос энергии.

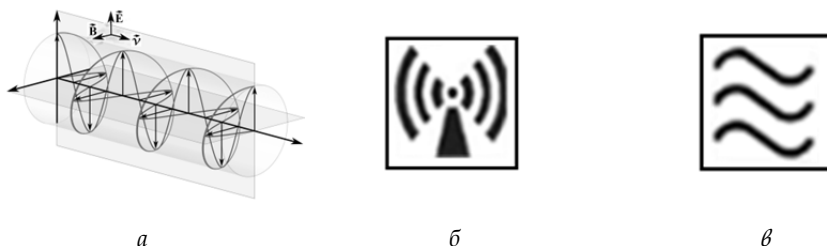


Рис. 3. Знаки-изображения основных антропогенных силовых элементов объективной реальности объекта ОТУ в ЭС:

- а — абстрактно-математическое представление электромагнитной волны как системы порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей ($\vec{E}$ — напряженность электрического поля; $\vec{B}$ — напряженность магнитного поля; $\vec{v}$ — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме); б — предметно-изобразительная пиктограмма электромагнитной волны (излучения); в — пиктограмма (условное графическое обозначения) трехфазного переменного электрического тока

Начавшееся в одном месте движение зарядов через изменение электрического поля распространяется по всей цепи. Одни за другими все более удаленные носители заряда вовлекаются в движение, и передача действий от одних зарядов к другим происходит со скоростью света. Количественная мера тока — сила тока, физическая величина, равная количеству электричества, проходящему через сечение проводника за единицу времени. Электрон или ион двигаются почти всегда очень медленно, со скоростью меньше 1 мм/с. Следует различать понятия «скорость тока» и «скорость движения носителей заряда». В образной форме можно сказать, что энергию «несет» электромагнитная волна, и мчится она от источника к потребителю в пространстве, окружающем провод, со скоростью света. Провода только направляют поток энергии электромагнитного поля, провода с током — не «трубы» с текущей по ним энергией, а «рельсы» для потока энергии электромагнитного поля. Вместо термина «энергия электромагнитного поля» в физике используют понятие плотности энергии электромагнитного поля в определенной точке пространства.

Основной ток, получаемый генераторами электростанций, преобразуемый, передаваемый и распределяемый потребителям, — переменный ток трехфазной системы электрических цепей, в которых действуют переменные электродвижущей силы (ЭДС) одной и той же частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на $1/3$ периода ($\varphi = 2\pi/3$). Каждую цепь называют фазой, а систему переменных токов — трехфазным током (пиктограмма трехфазного переменного тока изображена на рисунке 4, в). Технический ток в Российской Федерации меняет свое направление 100 раз в секунду и имеет частоту 50 Гц.

Объективная реальность объекта ОТУ в ЭС (антропогенные объекты – объекты, созданные человеком для обеспечения его социальных потребностей и не обладающие свойствами природных объектов) может быть специфицирована нижеследующим перечнем основных вещей, попавших в сферу электромеханической человеческой деятельности (рис. 3): основные (силовые) элементы; измерительные элементы – трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для подключения измерительных приборов, средств управления и регулирования; средства управления – релейная защита, регуляторы, автоматика, телемеханика и связь.

Например, объективная реальность энергосистемы Калининградской области состоит из западного (60 энергообъектов) и восточного энергорайонов. ОАО «Янтарьэнерго» обслуживает территорию площадью более 15 тыс. км², эксплуатирует более 14,7 тыс. км ЛЭП и включает более 4 тыс. подстанций напряжением 60, 110, 330 кВ и суммарной мощностью 3949 МВт [27].

Основными силовыми элементами являются следующие:

1. Электростанции и блок-станции (рис. 2; 4, а) – синхронные генераторы, сборные шины, коммутационные аппараты, вспомогательное оборудование измерения, сигнализации, защиты и автоматики. Например, суммарная установленная мощность электростанций ЭС Калининградской области по состоянию на 1 января 2020 г. составляет 1715,628 МВт.

2. Мобильная газотурбинная установка (рис. 4, б) – передвижные электростанции с электрической мощностью от 5 до 25 МВт обычно размещаются в городах.

3. Ветроэлектрическая электростанция (рис. 4, в) – установка для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора с последующим ее преобразованием в электрическую энергию (обычно размещаются в сельской местности).

4. Фотоэлектрический преобразователь (рис. 4, г) – объект гелиоэнергетики, полупроводниковое устройство, прямо преобразующее солнечную энергию в постоянный электрический ток.

5. Бензиновая переносная электростанция (рис. 4, д) – компактные автономные силовые установки для производства электрической энергии, используемые в качестве основного или резервного источника электроснабжения.

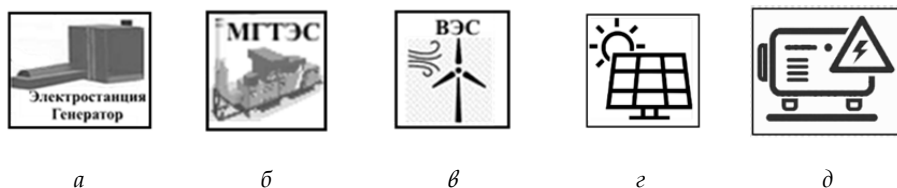


Рис. 4. Знаки-изображения основных антропогенных силовых элементов объективной реальности объекта ОТУ в ЭС:

- а – электростанция, генератор; б – мобильная газотурбинная электростанция;
 в – ветроэлектрическая электростанция; г – фотоэлектрический преобразователь
 (бытовой термин – «солнечная батарея», «солнечная панель»);
 д – бензиновая переносная электростанция

6. Кабельные и воздушные ЛЭП (рис. 2; 5, а, б) — сложные устройства для передачи энергии электромагнитного поля на расстояние, состоящие из многочисленных элементов с разными сроками службы: проводов, траверс, линейных изоляторов, арматуры (линейной, линейно-сцепной), опор, грозозащитных тросов, разрядников (молниезащиты), заземления, секционирующих устройств (пунктов секционирования или реклоузеров), волоконно-оптических линий связи. Во вспомогательное оборудование ЛЭП для нужд эксплуатации входят аппаратура ВЧ-связи, элементы маркировки для безопасных полетов воздушных судов, птицевозащитные устройства, устройства плавки гололеда, гасители вибрации. Например, на территории Калининградской области, имеющей максимальную протяженность с востока на запад 205 км, с севера на юг — 108 км, эксплуатируется более 2 тыс. км воздушных ЛЭП напряжением 60–330 кВ, действуют электрические сети напряжением 330 — 110 — 60 — 15 — 10 — 6 кВ. Перечень из 106 ЛЭП напряжением свыше 60 кВ и их сводные данные представлены в [27].

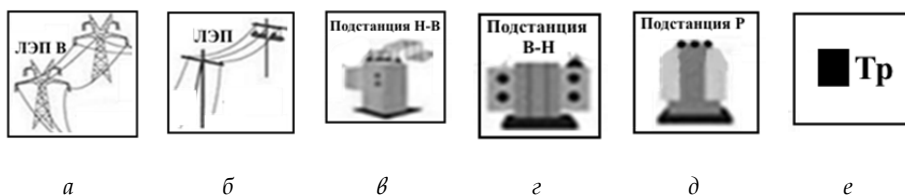


Рис. 5. Знаки основных антропогенных силовых элементов объективной реальности объекта ОТУ в ЭС:

а — высоковольтная ЛЭП; б — распределительная ЛЭП; в — электрическая подстанция «низкое — высокое» напряжения; г — электрическая подстанция «высокое — низкое» напряжения; д — распределительная электрическая подстанция; е — трансформатор

7. Электрические подстанции (центры питания, распределительные пункты, трансформаторные подстанции) (рис. 5, в–д) — сложные устройства для преобразования и распределения энергии магнитного поля. Термин «подстанция» возник на заре формирования больших сетей, когда каждая подстанция была частью своей электростанции и полностью от нее зависела. Подстанции состоят из многочисленных и, в свою очередь, сложных элементов: силовых трансформаторов (рис. 5, е) и автотрансформаторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения, фазоворотных трансформаторов, сборных шин, шинопроводов, коммутационных аппаратов (разъединителей, выключателей, заземлителей, короткозамыкателей, отделителей, дугогасителей, шунтирующих реакторов, ограничителей перенапряжений и предохранителей высоковольтных); устройств релейной защиты и автоматики, измерительных приборов, оборудования ВЧ-связи (конденсаторов связи, ВЧ-заградителей, фильтров присоединения); токоограничивающих, регулирующих устройств; преобразователей частоты, выпрямителей; системы заземления; молниезащитных сооружений; системы вентиляции, кондиционирования, обогрева; системы автопожаротушения; системы освещения территории; охранно-пожарной сигнализации; сис-

темы технологического видеонаблюдения; системы аварийного сбора масла; бытовой и ливневой канализации, водопровода; бытовых помещений; складов и мастерских. Например, первая в Калининградской области подстанция закрытого типа мощностью 50 МВА и напряжением 110 кВ ПС «Береговая», расположенная в Калининграде, существенно (в 5–10 раз) сокращает время оперативных переключений по сравнению с их выполнением сотрудниками оперативно-выездных бригад по голосовым командам оперативно-диспетчерского персонала.

Потребители электроэнергии (рис. 2, 6) сосредоточены «везде и всюду», в городах, поселках, на территории предприятий, на авто- и железных дорогах, газо- и нефтепроводах, в транспортных узлах и терминалах, на космодромах, территориях с ограниченным доступом. Кроме того, силовые элементы ЭС тратят электроэнергию на собственные нужды.



Рис. 6. Знаки-изображения основных потребителей электроэнергии объективной реальности объекта ОТУ в ЭС:

- а* — город со складами электрооборудования для обслуживания электросетевого хозяйства, городские электросети, инфраструктура городского хозяйства, электробытовое оборудование; *б* — поселок, деревня, сельскохозяйственная инфраструктура; *в* — предприятие, организация, испытательные полигоны, космодромы, железная дорога, транспортные магистрали; *г* — источники бесперебойного питания; *д* — установки и оборудование с электродвигателями

Электроприемник — устройство, преобразующее электрическую энергию в другие виды энергии для ее использования и характеризующееся различными параметрами. Режим его работы отражен в индивидуальном графике нагрузок [29].

Достигнув крупного потребителя (завод, населенный пункт), электроэнергия опять попадает на электроподстанцию, трансформируется в напряжение 6–10 кВ и передается по подземным кабелям.

Показательна структура потребления электроэнергии в Калининградской области по видам экономической деятельности за 2018 г.: население — 27,3 %, прочие виды деятельности — 27 %, промышленное производство — 24 %, потери в сетях — 14,2 %, транспорт и хранение — 3,0 %, сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбноводство — 2,8 %, строительство — 1,7 %. Перечень основных крупных потребителей электроэнергии включает 133 предприятия, 12 из которых имеют максимальную мощность от 6,2 до 25 МВт. Максимум потребления мощности энергосистемы Калининградской области в 2019 г. составил 755 МВт [28].

В случае сельского электроснабжения электроэнергия подводится к большому количеству сравнительно маломощных потребителей, рас-



положенных на большой территории, радиальным построением сетей с большой протяженностью линий, применением проводов меньших сечений и трансформаторов меньшей мощности в сравнении с городскими распределительными сетями, что приводит к повышенному расходу электрической мощности и увеличению падения напряжения в сетях низкого напряжения [30].

Стабильное электроснабжение — большая тема для человечества. Аварии в ЭС могут привести к поломкам дорогостоящего оборудования, простоям в производстве, нарушению цепочки поставок, огромным счетам за сорванные сроки работ и за ремонт [31].

С потребителями связано понятие качества электроэнергии, устанавливаемого в РФ ГОСТ 13109-97. В частности, в нем определены следующие «нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»: для напряжения (V) номинал $220 \text{ V} \pm 5\%$, предельно $220 \text{ V} \pm 10\%$; для частоты (Hz) номинал $50 \pm 0,2$, предельно $50 \pm 0,4$; для искажений (%) номинал 8, предельно 12; для провалов (с) номинал 3, предельно 30; для перенапряжений (V) номинал 280, предельно 380.

Источник бесперебойного питания — техническое средство с не менее чем двумя вводами от первичных источников тока и одним или несколькими выводами, обеспечивающими переход питания нагрузки с одного источника на другой для непрерывного питания потребителей в случае отключения или ухудшения качества электрической энергии на входе от первичного источника.

Качество электроэнергии ухудшают импульсные провалы, вызванные перегрузкой оконечных линий; постоянные провалы, низкое напряжение из-за перегрузки линии от подстанции до потребителя, плохого состояния трансформатора подстанции или соединительных кабелей; полные провалы (блекауты), пропадание напряжения в сети; постоянные перенапряжения, завышенное или циклично завышенное напряжение как следствие «перекоса фаз» — неравномерной нагрузки на разные фазы трансформатора подстанции; временное перенапряжение (импульсное, высокочастотное), возникающее при замыкании фазовых жил силового кабеля друг на друга и на нейтраль, при обрыве нейтрали, при пробое высоковольтной части трансформатора подстанции на низковольтную, при попадании молнии в кабель, подстанцию или рядом с ними [32].

Госдумой принят Федеральный закон №522-ФЗ, регулирующий развитие интеллектуальной системы учета электрической энергии (мощности) — компонентов и устройств для удаленного сбора, обработки, передачи показаний приборов учета электрической энергии.

Итак, мы рассмотрели основные структурные элементы объекта ОТУ в региональной ЭС, в большинстве своем и составляющие багаж когнитивных представлений и знаний об электрических системах и сетях. Если провести параллель с объектом ОТУ пилотируемого аппарата гражданской авиации (или, проще, пассажирского самолета — более знакомого и понятного большинству транспортного средства по сравнению с транспортом электроэнергии к потребителю), то выше разговор не коснулся полетной среды, обслуживания летательного аппарата на земле, воздействия на него погодных факторов (температуры, ветра,

дождя, снега, состава атмосферы, магнетизма, грозы и др.), да и в целом он шел о самолетах начала века воздухоплавания — без автопилота, противоаварийной автоматики, средств информатики и вычислительной техники на борту, с плохо оснащенной техникой наземными диспетчерскими центрами, с пилотами и операторами, багаж знаний которых соответствовал своему времени. Восполним существенный пробел и обратимся к онтологической семантике природной среды, человеческого фактора и специального транспорта оперативно-выездных бригад (ОВБ) в объекте ОТУ, приборов и устройств технической электродиагностики, релейной защиты и противоаварийной автоматики, чьи значки-пиктограммы изображены в нижней части фигуры объекта ОТУ на рисунке 2.

Природная среда (природа) — совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов. Компоненты природной среды — земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для функционирования ЭС.

Природный объект (рис. 7, а) — естественная экологическая система, природный ландшафт и составляющие их элементы, сохранившие свои природные свойства.

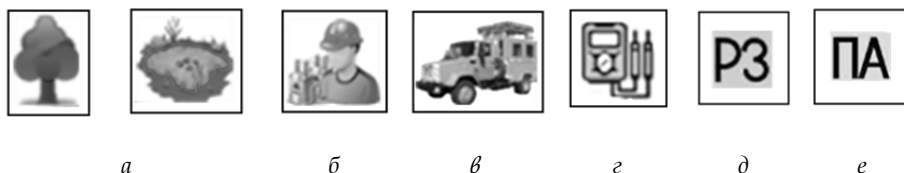


Рис. 7. Знаки-изображения основных элементов объективной реальности актуальных для эффективного и надежного функционирования объекта оперативно-технологического управления в электрических сетях и установках:

- а — компоненты природной среды; б — оперативно-выездные бригады электромонтеров; в — специальный автотранспорт, устройства и оборудование оперативно-выездных бригад; г — приборы и устройства технической диагностики состояния электрических сетей и установок; д — системы и устройства релейной защиты; е — системы и устройства противоаварийной автоматики

Природно-антропогенный объект — природный объект, измененный в результате хозяйственной и иной деятельности, и/или объект, созданный человеком, обладающий свойствами природного объекта и имеющий рекреационное и защитное значение.

Эксплуатация природно-антропогенных ЭС оказывает воздействие на природную среду: при сжигании топлива на тепловых и электростанциях загрязняет воздух, воду и почвы отходами в виде газов, золы, серы и др.; выделяет в окружающую среду неиспользованную энергию в виде теплоты отходящих газов и нагрева охлаждающей воды; влияет посредством электромагнитного поля на живые организмы (гибель



птиц и насекомых, аномалии развития растений) и атмосферу; увеличивает шум; отчуждает из пользования земли и воды; нарушает эстетическую привлекательность среды (ЛЭП). Другой стороной вопроса являются жесткие требования к качеству профессиональных знаний, опыта, умений и навыков электромонтеров, соблюдению ими правил электробезопасности, а также возникающие затруднения со связью, радиопомехи, изрезанный ландшафт местности, отсутствие дорог вдоль ЛЭП, что вынуждает ремонтников-электромонтеров ОВБ в буквальном смысле бегать с грузом, инструментами по полям, лесам и болотам в любое время суток и усложняет исполнение оперативных диспетчерских команд и доклады, заставляют работать в условиях физических нагрузок и стресса.

Человеческий фактор и специальный транспорт оперативно-выездных бригад (рис. 7, б, в). Оперативно-выездные бригады — команды быстрого реагирования, которые создаются для оперативного обслуживания распределительной сети и состоят, как правило, из двух человек — дежурного электромонтера и электромонтера-водителя. Электромонтеры работают по сменам, в любое время дня и ночи может поступить сигнал об аварийной ситуации. Место базирования ОВБ имеет устойчивую телефонную и радиосвязь с диспетчером районной электросети. ОВБ обеспечивается автотранспортом. Основные ее задачи — определение мест повреждения сетей, их локализация; восстановление электроснабжения потребителей по временной или постоянной схеме; участие в проведении аварийно-восстановительных работ; производство переключений; систематический контроль состояния оборудования электросетей, нагрузок линий электропередачи, трансформаторов, а также показателей качества электроэнергии. Техническое обслуживание ОВБ заключается в обходах и осмотрах воздушных линий, трансформаторных подстанций и секционирующих пунктов, расчистке трасс воздушных линий от кустарников, обрезке ветвей деревьев, устранении мелких неисправностей на линиях и трансформаторных подстанциях. Электромонтеры ОВБ одними из первых прибывают на пожары, отключают электроэнергию, напряжение. Устройства и оборудование ОВБ включают в себя изолирующие штанги (оперативные или универсальные), сигнализаторы напряжения, изолирующие и электроизмерительные клещи и инструмент, диэлектрические перчатки, ковры, изолирующие накладки, боты, изолирующий инструмент, переносные заземления, защитные щитки, очки, каски, плакаты и знаки безопасности, указатель напряжения для проверки совпадения фаз, респираторы, предохранительный пояс.

Приборы и устройства технической диагностики [33] (рис. 7, г) представляют собой сложное, зачастую электронное оборудование: многофункциональные цифровые регистраторы, амперметры, вольтметры, вольтамперметры, ваттметры, частотомеры, автоматизированные диагностические устройства, измерители емкости (мосты), рефлектометры, пирометры, мосты переменного тока, газовые хроматографы,



виброанализаторы, электронно-оптическое дефектоскопы, устройства рентгеноскопии изоляторов, летательные аппараты и лаборатории для оценки общего состояния трассы (высота поросли, наличие пожароопасного мусора, строений, состояние пересечений с другими ЛЭП, автодорогами, подтопления, заболоченность, состояние обволочки фундаментных опор), состояния опор (изгибы, поломки, некомплектность), проводов и контактных соединений (общий вид, геометрия положения, локальные перегревы проводов и шлейфов, негабарит шлейфов, местные истирания, нарушение верхнего повива, места перекрытия), арматуры (перекосы и поломки распорок, гасителей вибрации, экранов, зажимов, лодочек, изоляции, тросов и их изоляции), аппаратуры регистрации электромагнитного излучения разрядных процессов. Также используются приборы видеосъемки и цифрового фотографирования, аэросъемки естественного гамма-фона Земли по трассам ЛЭП.

Релейная защита (рис. 8, д) — комплекс устройств для быстрого автоматического выявления и отделения от ЭС поврежденных элементов посредством силовых выключателей для обеспечения нормальной работы всей системы. Реле — автоматический аппарат, контролирующий значение какой-либо управляющей физической величины и воздействующий на значение другой, управляемой физической величины [34–39]. Релейная защита — основной вид электрической автоматики, сегодня она оснащена программируемым микроконтроллером.

Противоаварийная автоматика (рис. 7, е) — совокупность технических устройств, обеспечивающая измерение и обработку параметров режима ЭС, передачу информации и команд управления и реализацию управляющих воздействий в соответствии с заданными алгоритмами и настройкой, предназначенная для выявления, предотвращения развития и ликвидации аварийного режима ЭС [40]. Она позволяет осуществлять дистанционное управление с удаленного поста (щита, пульта); местное управление от местной кнопки или ключа управления, расположенных вблизи коммутационного аппарата; автоматическое включение через устройство автоматического повторного включения (АПВ).

Устройства защиты ЛЭП: токовые и направленные; от замыкания на землю; трансформаторов напряжения контроля изоляции; дистанционные; дифференциальной токовой продольной и поперечная (балансной); плавкими предохранителями.

Устройства автоматики ЛЭП: АПВ; автоматического включения резерва; автоматической частотной разгрузки; автоматика деления; системная противоаварийная автоматика; автоматические воздушные выключатели и их устройства защиты (расцепители); устройства защитного отключения.

Защита и автоматика элементов электростанций, подстанций и потребителей электроэнергии. Защита синхронных генераторов: релейная защита от замыканий на землю на стороне генераторного напряжения, многофазных замыканий в обмотке статора генератора и на его



выводах, замыканий между витками одной фазы в обмотке статора турбогенератора, внешних коротких замыканий, перегрузки генератора токами обратной последовательности, симметричной перегрузки обмотки статора генератора, перегрузки обмотки ротора генератора током возбуждения, повышения напряжения на статоре генератора, замыканий на землю в одной точке цепи возбуждения; асинхронного режима с потерей возбуждения. Автоматика: автоматические регуляторы частоты вращения турбины; вторичное регулирование частоты и мощности агрегата; устройства группового регулирования мощности; аварийная режимная автоматика специального назначения; автоматика ликвидации асинхронного режима; автоматическое ограничение отклонения частоты и напряжения сверх допустимых пределов. Защита и автоматика подстанций: газовая; токовые и направленные от коротких замыканий; дифференциальные токовые; открытыми плавкими вставками, плавкими и управляемыми предохранителями. Устройства противоаварийной автоматики трансформатора: автоматическое включение резерва и повторное включение; автоматическая аварийная разгрузка, отключение и включение для уменьшения потерь энергии; автоматическое регулирование напряжения. Защита и автоматика конденсаторных установок. Защита и автоматика шин. Токовая защита. Дуговая защита.

В XXI в. наибольшее значение приобретут компьютеры, силовая электроника (транзисторные реле, тиристорные коммутационные аппараты и регуляторы переменного тока) и электропривод. Компьютеры будут выполнять функции «разума», а силовая электроника и электропривод — «мускулов» [41–43].

На объективную реальность объекта ОТУ в электрических сетях и установках сильное влияние оказывают космические, ионосферные и атмосферные воздействия (рис. 8).

Грозовые явления и атмосферные перенапряжения [44] (рис. 8, а). Грозовые перенапряжения возникают при разряде молнии в оборудование ЭС или рядом с ним в землю, что приводит к волне напряжений, распространяющейся по линии к подстанциям. Молнии оказывают значительные электромагнитные, термические и механические воздействия на изоляторы ЛЭП при прохождении через них, приводят к авариям и отказам оборудования. На изоляцию электрооборудования воздействует как рабочее напряжение, так и возможные внешние и внутренние перенапряжения, импульсы или волны напряжения, накладывающиеся на номинальное напряжение сети. Грозовые перенапряжения являются наиболее кратными, короткими по времени воздействия и тяжелыми для электроустановок. Например, при прямом ударе молнии в провод воздушной ЛЭП напряжением 110 кВ почти всегда происходит перекрытие изоляции. Даже высокая импульсная прочность линейной изоляции воздушных линий напряжением 500–1150 кВ не может обеспечить грозоупорность линии при прямом ударе молнии в провод. Одна из эффективных защитных мер — применение вентильных разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжений.

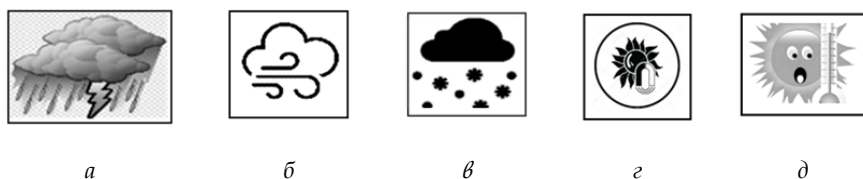


Рис. 8. Знаки-изображения основных космических, ионосферных и атмосферных воздействий на объективную реальность объекта ОТУ в ЭС:
а — воздействие грозовых атмосферных перенапряжений; б — влияние ветра;
в — влияние гололедно-изморозевых образований; г — воздействие геомагнитных бурь;
д — воздействие аномальной жары

Влияние ветра (рис. 8, б). Главная помеха для воздушных ЛЭП — горизонтальная слагающая ветра, давление на провода, тросы и опоры. Кроме того, создавая поперечную нагрузку на провода и тросы, ветер увеличивает их натяжение. Появляются дополнительные изгибающие усилия на опоры, что может вызвать их поломку и падение с вырыванием фундаментов. Вибрации наиболее подвержены провода, расположенные высоко над землей и на открытой ровной местности, где равномерное движение воздушного потока не нарушается рельефом или наземными препятствиями. Вероятность возникновения вибрации растет с увеличением длины пролета более 120 м. Особенно опасна вибрация проводов при переходах через реки и водные пространства с пролетами более 500 м. Опасность вибрации заключается в обрывах отдельных проволок на участках их выходов из зажимов. Пляска проводов, так же как и вибрация, возбуждается ветром, но отличается от вибрации большой амплитудой и длиной волны. При этом колебания проводов отдельных фаз, проводов и тросов происходят несинхронно. Часто провода перемещаются в противоположных направлениях, сближаются и схлестываются, что вызывает значительные динамические усилия в линейной арматуре и в траверсах опор, повреждение линейной арматуры, изоляторов, перекося или сброс распорок, заброс подвесных гирлянд на траверсы [45].

Влияние гололедно-изморозевых образований (рис. 8, в) проявляется в отложениях чистого гололеда, инея, зернистой изморози и мокрого снега, а также их сочетаниях. Иней для проводов воздушных линий не представляет существенной нагрузки и не влияет на механическую прочность. Зернистая изморозь способствует закручиванию провода, прочно сцепляется с ним и своими размерами увеличивает парусность провода, что при поперечном ветре приводит к дополнительным нагрузкам на опоры и провода ЛЭП. Ледяная корка плотно сцепляется с проводом воздушной линии. В случае несимметричного образования гололед вызывает закручивание провода, а при большой толщине стенки гололеда его вес может во много раз превысить вес самого провода. Мокрый снег выпадает при плюсовой температуре и оседает на проводах, покрывая их большим слоем. При понижении температуры воздуха в область отрицательных значений, налиший влажный снег замерзает, кристаллизуется и прочно сцепляется с проводами ЛЭП, нагружая их.



Техносферные аварии в периоды геомагнитных бурь (рис. 8, г). На подстанциях геомагнитоиндуцированные токи текут в земле через трансформаторные обмотки и по заземлению там, где нет РЗ и ПА. Это активизирует опасные эффекты: насыщение трансформаторов, их перегрев и разрушение; генерацию паразитных гармоник переменного тока; нарушение работы стандартных РЗ и, как следствие, отключение ЛЭП; колебания активной и реактивной мощности в энергосистеме и, как следствие, ложное срабатывание либо несрабатывание РЗ и ПА, массовые нарушения электроснабжения в узлах нагрузок. Проявление эффектов ионосферных возмущений (ионосферных токов) нарушает радиосвязь [46].

Аномальная жара (рис. 8, д). Воздействие аномальной жары не гарантирует бесперебойного электроснабжения: из-за перегрева оборудование и подстанции выходят из строя, срабатывает РЗ и ПА, непланово отключаются потребители. В период жары горожане активно используют кондиционеры, в торгово-ресторанном секторе на полную мощность работают холодильные установки, что в разы повышает нагрузку на электросети. Температура воздуха влияет на степень натяжения либо провисания проводов воздушных ЛЭП.

Математическая реальность объекта оперативно-технологического управления региональной интеллектуальной электроэнергетики

И. М. Яглом подчеркивает, что математика предоставляет естественным и гуманитарным наукам адекватный аппарат (язык) описания, классификации и сопоставления фактов и явлений [47]. *Математическая реальность*, по А. И. Панченко, — реальность чисто идеального характера [16].

Уровень зрелости электротехники в значительной мере определяется степенью использования математического аппарата, содержательностью математических моделей. Использование в математическом моделировании геометрического языка и геометрической интуиции сводится к пониманию любых физических, химических, биологических, экономических, социологических и иных систем как точек в пространстве состояний ЭС, а их изменений — как точечных преобразований в рассматриваемом пространстве. Связь математики и жизни опосредована творцами математики — живыми людьми (например, операторами ЭС, разработчиками математических моделей, математиками), неразрывно связанными с окружающим их миром. Математические объекты создаются путем абстрагирования и идеализации. Чтобы формализовать проблему, необходимо «оторвать» ее от жизни, кое-что упростить, чем-то пренебречь, то есть использовать лишь конечное число понятий. При этом все выражено через понятия, имеющие однозначно определенный смысл: слова, величины, отношения и пр. Формула — это совокупность символов (слов, знаков и т. д.), каждому из которых дано четкое определение.

Структура математической модели — это совокупность переменных и параметров, записанных в математическом выражении. Пара-



метры — количественные характеристики внутренних свойств объекта, которые отражаются его структурой, а в математической модели являются коэффициентами, входящими в математическое выражение.

Рассматривая объекты моделирования, часто ограничиваются исследованием физических свойств одного рода: тепловых, электрических, магнитных, механических и т. д. Но в тех случаях, когда в объекте происходит передача или преобразование энергии, требуется учет свойств различного рода, например электромагнитных, теплоэлектрических, тепломеханических, электромеханических и др. Каждое устройство и ЭС в целом могут моделироваться на микро-, макро- и метатроне восприятия человеком окружающего мира.

Рассмотрим модели ЭС на микроуровне [48]. Это распределенные модели (с распределенными параметрами), представленные системами дифференциальных уравнений в частных производных. При их анализе исходят из основных физических законов в их наиболее «чистом», фундаментальном виде (законы сохранения массы, количества движения и энергии), что обеспечивает адекватное описание объектов, протекания процессов и явлений в ЭС.

Начало XIX в. изобиловало захватывающими открытиями в математическом моделировании микроуровневой электродинамики: Х. К. Эрстед показал, что текущий по проводнику ток порождает магнитные эффекты, опыты А. Ампера подтвердили наличие сил притяжения или отталкивания между двумя проводниками с током (еще в XVIII в. И. Ньютон сформулировал закон гравитационного притяжения между любыми двумя материальными телами). М. Фарадей и Д. Генри открыли явление электромагнитной индукции и продемонстрировали связь магнетизма и электричества, Д. К. Максвелл разработал электромагнитную теорию разнообразия свойств электромагнитных полей с помощью величин напряженности электрического и магнитного полей и сформулировал ее в виде системы нескольких уравнений. Исправление, внесенное Максвеллом в известные уравнения электромагнетизма, привело к устранению противоречий и может быть записано системой уравнений для электромагнитного поля в вакууме в интегральной форме [49]:

$$\oint E dS = 4\pi \int \rho dV, \quad (1)$$

$$\oint B d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \int j dS + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int E dS, \quad (2)$$

$$\oint B dS = 0, \quad (3)$$

$$\oint E d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int B dS, \quad (4)$$

где B — магнитная индукция магнитного поля; ρ — плотность электрического заряда; j — плотность тока; E — напряженность электрического поля; S — площадь произвольной замкнутой поверхности конечных размеров в магнитном поле; V — объем, окруженный замкнутой поверхностью S .



Уравнения Д. К. Максвелла в интегральной форме соотносятся с теми экспериментальными законами, которым они обязаны своим происхождением. Уравнение (1) — теорема К. Ф. Гаусса, которая оказывается справедливой не только для статического, но и для зависящего от времени поля E (поток вектора электрической индукции через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов, находящихся внутри этой поверхности). Уравнение (2) обобщает закон А. Ампера (с добавлением к нему максвелловского тока смещения): циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному контуру равна алгебраической сумме токов проводимости и токов смещения, охватываемых этим контуром. Уравнение (3), теорема К. Ф. Гаусса для магнитного поля, выражает отсутствие в природе магнитных зарядов (поток вектора магнитной индукции через произвольную замкнутую поверхность равен нулю). Наконец, (4) — закон электромагнитной индукции М. Фарадея: циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному контуру равна минусу скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Общее следствие из уравнений Максвелла — существование энергии электромагнитного поля.

Теория Д. К. Максвелла — теория близкого действия (в те времена в физике была принята концепция дальнего действия И. Ньютона), то есть электромагнитное взаимодействие происходит с конечной скоростью, равной скорости света. В этой теории решается основная задача электродинамики: по заданному распределению зарядов и токов отыскиваются основные характеристики создаваемых ими электрических и магнитных полей. При проектировании высоковольтной ЛЭП на большие расстояния уравнения Д. К. Максвелла помогают создать систему с минимальными потерями.

Математическое моделирование ЭС системами дифференциальных уравнений в частных производных сталкивается со значительными трудностями: число уравнений в системе может достигать 10^6 и более. Поэтому в ЭС переходят от распределенных параметров к сосредоточенным: выделяют крупные элементы ЭС и их параметры сосредотачивают в одной точке; поле потенциалов представляют величиной одного напряжения, поток электронов моделируется электрическим током и т. п., то есть создают макроуровневые математические модели в дискретных пространствах и непрерывном времени, используя аппарат обыкновенных дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений.

Поведение (состояние) моделируемой ЭС характеризуется фазовыми переменными потенциала (электрическое напряжение) и потока (электрический ток). Такие уравнения называют компонентными. Способ связи элементов ЭС отражается другими, топологическими уравнениями с переменными одного типа — либо потенциала, либо потока. Топологические уравнения выражают законы сохранения, условия непрерывности, равновесия, баланса и т. п. Математические модели объ-



ектов ЭС — совокупность компонентных и топологических уравнений. Основные фазовые переменные ЭС — напряжения и токи в различных элементах систем. Компонентные уравнения элементов имеют вид

$$U = RI, \quad I = C \frac{dI}{dt}, \quad U = L \frac{dI}{dt},$$

где U — напряжение; I — ток; R — сопротивление; C — емкость; L — индуктивность.

При соединении резисторов, емкостей, индуктивностей между собой образуется схема замещения, соединение элементов в которой отражается уже топологическими уравнениями — законами Г. Кирхгофа:

$$\sum_j I_j = 0, \quad \sum_i U_i = 0,$$

где уравнения токов записываются для узлов, а уравнения напряжений — для контуров ЭС. Сложные элементы при их моделировании замещаются схемами из сопротивлений, емкостей и индуктивностей.

Графы и матрицы — модели представления схем и компактной записи уравнений для электрических сетей современных ЭС — насчитывают тысячи ЛЭП и трансформаторов для расчетов режимов [48]. Линии, трансформаторы и другие элементы ЭС представляются в расчетах схемами замещения. Все шины подстанций — узловые точки сети. Графы — топологические модели схем электрических цепей. Графовое представление повторяет изображение схемы, но без элементов электрической цепи. Узлы (вершины графа) соединяются непрерывными линиями (ребрами), на которых при необходимости указывается положительное направление тока или потока мощности. Элементы ЭС, которые моделируются ребрами графа (рис. 9), — ЛЭП, трансформаторы, реакторы, батареи конденсаторов и др. Как правило, все они представляются П-образными схемами замещения и поэтому имеют элемент связи между двумя граничными узлами (продольную ветвь) и элементы, связывающие узлы с нейтральной точкой системы N (поперечные ветви).

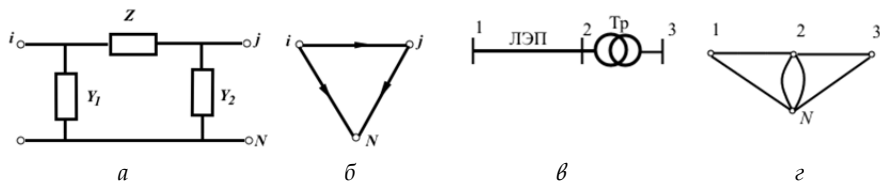


Рис. 9. Моделирование элементов ЭС графами:

- a — П-образная схема замещения (имеет продольную ветвь как элемент связи между двумя граничными узлами i и j и поперечные ветви как элементы, связывающие узлы с нейтральной точкой системы N ; Z и Y — векторные величины);
- b — граф П-образной схемы замещения; b — схема замещения электрической сети, состоящей из ЛЭП и трансформатора (две соединенные между собой П-образные схемы замещения); c — граф из двух графов П-образных схем



Аналогично представляются схемами замещения электрические нагрузки. Для моделирования топологии схем электрических сетей используют матричные модели, отражающие свойства графов. Это матрицы инцидентности и смежности. Каждая продольная ветвь в графе электрической сети характеризуется сопротивлением $Z_j = R_j + jX_j$, а поперечная — проводимостью $Y_i = G_i + jB_i$ ($j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$), где n — количество узлов (шин) схемы сети, m — количество ветвей, соединяющих шины. Значения продольной и поперечной проводимости образуют матрицы параметров электрической сети: матрицу сопротивлений продольных ветвей и матрицу-столбец проводимостей поперечных ветвей — шунтов. Кроме пассивных ветвей в сети существуют активные ветви с источниками ЭДС и тока. Эти ветви, как правило поперечные, моделируют генераторы электростанций и потребителей электрической энергии и представляются матрицами ЭДС (E) и потребителей J .

Эти матрицы задают режим работы электрической сети и представляют собой векторы независимых переменных — режимных параметров. Зависимыми переменными режимных параметров являются напряжения в узлах, токи и напряжения в продольных ветвях и др.; U — матрица напряжений в узлах (узловые напряжения); I — матрица токов ветвей; U_θ — матрица напряжений в ветвях (падения напряжения на сопротивлениях ветвей); $S_\theta^{(n)}$ — матрица потоков мощности в начале ветвей; $S_\theta^{(k)}$ — матрица потоков мощности в конце ветвей; S_θ — матрица потерь мощности в ветвях. Тогда, умножив матрицу соединений на матрицу токов ветвей, имеем соотношение — первый закон Кирхгоффа в матричной записи $M \cdot I = J$. Умножая транспонированную матрицу соединений M^T на матрицу узловых напряжений, получим $\Delta U = M^T \cdot U$, и после преобразований получим $Y \cdot U = J$ — уравнение узловых напряжений (потенциалов) в матричной записи. Матрицу Y называют матрицей узловых проводимостей электрической сети.

Теория автоматического регулирования (ТАР) представляет ЭС и их элементы как динамические системы, процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями, взаимосвязывающими значения регулируемых величин со значениями возмущающих и управляющих воздействий.

Впервые математическое определение динамической системы (ДС) было предложено в 1931 г. А. А. Марковым.

Свободная динамическая система — трехэлементное множество $\langle E, T, \Theta \rangle$, где E — пространство состояний (фазовое пространство), T — ось времени, а Θ — движение, представляющее собой отображение $\Theta: E \otimes T \otimes T \rightarrow E$, удовлетворяющее трем условиям-аксиомам движения: начальных условий, припасовывания и непрерывности; $\Theta(x_0, t_0, t)$ — состояние системы в момент времени t , если ее состояние в момент времени t_0 было x_0 . Таким образом, $\Theta(x_0, t_0, t)$ — значение отображения Θ , каждой тройке $\langle x_0, t_0, t \rangle$ ставящего в соответствие состояние



$y = \Theta(x_0, t_0, t)$. Если обозначить множество всех троек через $E \otimes T \otimes T$, где $x_0 \in E$, $t_0 \in T$, $t \in T$, то зависимость $\Theta: E \otimes T \otimes T \rightarrow E$ состояния от времени называется движением.

Целая траектория, проходящая через точку x_0 пространства состояний E стационарной динамической системы $\langle E, T, \Theta \rangle$, — множество $L(x_0)$ всех состояний, которые проходит ДС в процессе движения Θ_{x_0} , соответствующего начальным условиям x_0 , так, что $L(x_0) = \{\Theta(x_0, t) | t \in T\}$. Множество всех целых траекторий — фазовый портрет.

Будем рассматривать движение ДС в n -мерном евклидовом пространстве состояний E и полагать, что функция $\Theta_x: T \rightarrow E$ непрерывно дифференцируема по t . Производная $\dot{\Theta}_x$ этой функции по t — $\dot{\Theta}_x(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Theta_x(t) + \Theta_x(t + \Delta t) - \Theta_x(t)}{\Delta t}$ называется фазовой скоростью, то есть скоростью изменения состояний. По аксиоме припасовывания $\dot{\Theta}_x(t)$ зависит только от состояния, в котором эта система находится. Фазовую скорость в точке x обозначают обычно $\dot{x}$ и записывают ее зависимость от состояния в виде дифференциального уравнения

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x). \quad (5)$$

Теоремы существования решений для дифференциальных уравнений определяют условия их единственности и непрерывности зависимости от начальных условий. Если $x(t)$ — частное решение (5), то есть если при подстановке $x(t)$ в правую и левую часть соотношение (5) обращается в тождество, то можно записать $x(t) = \Theta(x_0, t)$, где $x_0 = x(0)$ — начальные условия, однозначно определяющие вид решения.

Управляемая ДС — пятиэлементное множество $\langle E, T, \Theta, U^*, \eta \rangle$, где E — фазовое пространство, T — время, Θ — движение, U^* — множество допустимых законов управления, η — выходное преобразование. При этом должны выполняться следующие условия: η — непрерывная функция, U^* — множество измеримых функций $u: Y \otimes T \rightarrow U$, заданных на $Y \otimes T$ и ставящих в соответствие каждому вектору $y \in Y$ и каждому моменту времени $t \in T$ точку $u(y, t)$ из конечномерного векторного пространства U ; движение Θ — непрерывная функция $E \otimes T \otimes T \otimes U^* \rightarrow E$, ставящая в соответствие каждому моменту времени t , начальным условиям x_0 , взятым в момент времени t_0 , и каждому закону управления $u \in U^*$ точку $x(t) = \Theta(x_0, t_0, t, u)$ — состояние ДС в момент времени t . Допустимый закон управления $u \in U^*$ называется управлением: временным, программным, без обратной связи, если u не зависит от выходного сигнала y .



В зачаточном виде многие положения ТАР содержатся в общей теории линейных регуляторов Д. К. Максвелла и И. А. Вышнеградского (1868–1876). Параллельно с А. Пуанкаре А. М. Ляпунов создал теорию устойчивости движения и заложил основы качественной теории дифференциальных уравнений. Одна из первых в мире книг по автоматическому управлению вышла в 1938 г. — «Автоматическое управление электрическими установками и системами» Б. И. Доманского. В 1963 г. А. А. Вавилов и А. И. Солодовников публикуют работу «Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем». К началу XXI в. появились методы структур и алгоритмов ТАР в трудах В. Н. Антонова, В. А. Терехова, И. Ю. Тюкина, И. В. Мирошника, В. О. Никифорова, А. Л. Фрадкова, А. А. Воронова, Я. З. Цыпкина, Л. А. Растригина, В. В. Солодовникова, А. Г. Ивахненко и др. В. А. Терехов и И. Ю. Тюкин с начала XXI в. развивают идеи и методы построения систем ТАР с обучаемыми многослойными нейронными сетями, выполняющими функцию адаптивного регулятора. Вскоре пришло понимание, что традиционные технологии уже не могут обеспечить повышение качества управления ЭС, поскольку не учитывают всех неопределенностей, воздействующих на систему, и уже в 2001 г. были опубликованы результаты разработки интеллектуальных систем автоматического управления [50]. Значительный вклад в автоматику ЭС внесли работы [51; 52].

Гибридная система (ГС) — записанная на математическом языке комбинация двух автономных методов, один из которых имеет преимущества в моделировании непрерывных процессов, а другой — дискретных. Подробный анализ ГС дан в [53]. Состояние ГС представляется вектором двух переменных — непрерывной и дискретной. Непрерывная динамика ГС в непрерывном, дискретном и/или смешанном времени задается обычно дифференциальными уравнениями, а дискретная управляется цифровым автоматом или передаточной функцией с конечным количеством состояний. Оба процесса, непрерывный и дискретный, взаимодействуют в моменты возникновения «событий» или «переключений», когда очередное состояние достигает некоторых заданных множеств в непрерывном пространстве состояний. Иными словами, ГС — это индексированная совокупность динамических систем и таблица «скачков» между ними.

Гибридная природа таких систем, например автоматики с реле, ключами и гистерезисом, контроллеров перемещения, роботов, гибких производственных систем, автопилотов определяется непрерывно-дискретным характером их поведения, для описания которого недостаточно аналитических знаний в виде дифференциальных уравнений и необходимо комбинировать их со знаниями из дискретной математики, математической статистики и логики. Например, в [54] предложена управляемая событиями, последовательная, детерминированная модель, включающая объект, цифровой управляющий автомат и интерфейсы (аналого-цифровой — AD и цифро-аналоговый — DA) и изображенная на рисунке 10.

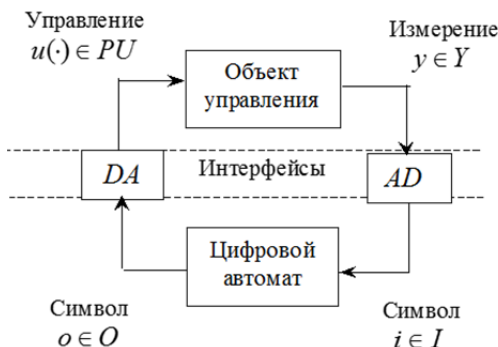


Рис. 10. Гибридная система

Источник: [55].

В H_{NK} -гибридной системе объект управления описывается как $\dot{x} = f(x(t)), u(t), y(t) = h(x(t))$, где $x(t) \in X \subset \mathbb{R}^n$, $u(t) \in U \subset \mathbb{R}^m$, $y \in Y \subset \mathbb{R}^p$, $f: \mathbb{R}^n \otimes \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, а $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$, и представляется конечным автоматом, состояние которого принадлежит $\mathbb{R}^n$. Входной алфавит — множество пар $(u(\cdot), \delta_k)$, где δ_k — положительный скаляр, задающий время до следующего события, а $u(\cdot)$ — элемент множества U^w кусочно-непрерывных функций в $U^{[0, \infty)}$.

Предположим, что объект управления находится в состоянии x_k в момент времени t_k . Тогда «очередное состояние» вычисляется в соответствии с функцией переходов с учетом текущего состояния и символа $(u(\cdot), \delta_k)$ на входе следующим образом: $x_{k+1} = x(t_k + \delta_k)$, где $x(\cdot)$ — решение уравнения $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t - t_k))$, $x(t_k) = t_k$ на интервале $[t_k, t_k + \delta_k]$. После вычисления $x_{k+1} = t_k + \delta_k$ процесс продолжается. Цифровой управляющий автомат — конечный символьный автомат (Q, I, O, v, h) , где Q — пространство состояний, I — входной алфавит, O — выходной алфавит (Q, I, O — изоморфные подмножества натуральных чисел), $v: Q \otimes I \rightarrow Q$, $h: Q \otimes I \rightarrow O$.

Оба автомата объединяются с помощью интерфейса, то есть отображений $AD: Y \otimes Q \rightarrow I$ и $DA: O \rightarrow PU$, где PU для кусочно-непрерывного U обозначает конечное множество.

Динамика ГС похожа на модель [55]. Однако появляются новые элементы: во-первых, вход и выход как для объекта управления, так и для управляющего автомата и, во-вторых, отображения AD и DA . В итоге имеем:

$$\dot{x}(t) = f[x(t), DA(o(t))(t - [t])], \quad y(t) = h[x(t)], \quad (6)$$

$$q(t) = v[q(t^-), AD(y(t), q(t^-))], \quad o(t) = \eta[q(t), AD(y(t), q(t^-))], \quad (7)$$

где $q(t^-)$ — левый предел функции q в момент t ; $[t]$ — момент времени, меньший или равный t , в который произошли скачок или событие.



Комбинированная динамика модели следующая. Непрерывное состояние x изменяется в соответствии с (6), а дискретное состояние q — по (7). Затем $AD(\cdot, q)$ присваивается выходу $y(t)$ — символу из I . Когда этот символ изменится, то есть управляющий автомат выполнит переход в новое состояние, то его выходной символ $o \in O$ также изменится. Связанное с этим символом управление $DA(o)$ рассматривается как входной параметр дифференциального уравнения до тех пор, пока входной символ управляющего автомата опять не изменится.

Оценка соотношений математики и реальности дана, например В. Я. Перминовым [56]. В частности, по его мысли, развитие математики в XVII, XVIII и в особенности в XIX в. убедительно продемонстрировало тот факт, что математические понятия непосредственно не соотносятся с реальностью. Уже Лейбниц осознал, что математические понятия скорее конструируются самим разумом, чем извлекаются из опыта абстрагированием. В математике нет места для представлений опыта: математические понятия — либо априорные представления, либо логические конструкции. Разрыв между математикой и реальностью аргументируется существованием природных связей, в принципе не допускающих математического описания. Хорошо согласовываясь с механикой и другими физическими науками, где выполняется принцип аддитивности, математика остановилась перед онтологическим барьером законов биологии, социологии и других системных и гуманитарных наук, где такой принцип нарушается в соединении элементов, что и определило принципиальный предел продвижения к математическому описанию реальности.

Логика синтеза математических понятий входит в неустранимое противоречие с реальным синтезом, протекающим в объекте исследования большой сложности. Математический метод перспективен при описании неживой материи, то есть тех сфер реальности, в которых преобладает аддитивный синтез систем, но он не может быть ведущим для сфер реальности, основанных на системности, и целевых воззрений на мир. Как полагает В. Я. Перминов, есть все основания утверждать, что сложные явления природы, связанные с системностью и неаддитивностью, никогда не будут объясняться в теориях, подобных теориям математической физики. Математическая реальность должна быть понята как специфический организм, приспособляющийся к своей естественной среде — к системе содержательных понятий.

Заключение

Рассмотрены основные результаты исследования системы оперативно-технологического управления региональной электроэнергетической системы, а также категоризация онтологической семантики объективной реальности объекта ОТУ региональной ЭС как «сложной системы», «большой системы» и «техноценоза», функционирующих в «аг-



рессивных» условиях внешней среды. Особое внимание обращено на специфику человеческого фактора, наличие систем релейной защиты и противоаварийной автоматики в объекте ОТУ, которые значительно повышают степень уверенности в том, что конечный потребитель получает качественную электроэнергию благодаря результатам электротехники, автоматического регулирования и деятельности оперативно-выездных бригад.

Рассмотрена математическая реальность мира оперативно-технологической деятельности: от представлений теории электродинамики Д.К. Максвелла, аппарата динамических и гибридных систем до средств интеллектуальных систем автоматического управления. Дана оценка соотношений математики и реальности, показывающая, что логика синтеза математических понятий входит в неустранимое противоречие с реальным синтезом, протекающим в объекте ОТУ ЭС большой сложности и высокой динамичности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00208.

Список литературы

1. Козлов В.В., Донченко И.А. Направленные визуализации: теория и метод. Запорожье, 2015.
2. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации и Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. [Электрон. ресурс] : указ Президента Российской Федерации № 490 от 10 октября 2019 г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Зеленохат Н.И. Интеллектуализация ЕЭС России: инновационные предложения : практ. пособие. М., 2013.
4. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / ОАО «Федеральная сетевая компания Единой Электроэнергетической системы». М., 2012.
5. Дружинин Г.В. Человек в моделях технологий : учеб. пособие : в 3 ч. Ч. 1 : Свойства человека в технологических системах. М., 1996.
6. Магид С.И. Подготовка персонала энергопредприятий: о целесообразности использования «Компьютерных тренажеров» // Энергетика и промышленность России. 2002. № 11 (27).
7. Дружилов С.А. Формирование модели мира человека в новой информационной реальности // Психология, социология и педагогика. 2011. № 1. URL: <http://psychology.snauka.ru/2011/10/15> (дата обращения: 02.01.2019).
8. Гейзенберг В. Шаги за горизонт / сост. А.В. Ахутин ; общ. ред. и вступ. ст. Н.Ф. Овчинникова. М., 1987.
9. Малявин В.В. Чжуан-цзы. М., 1985.
10. Об электроэнергетике [Электрон. ресурс] : федер. закон № 35-ФЗ от 26.03.2003 г. (ред. от 27.12.2019 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
11. Уёмов А.И. Вещи, свойства, отношения. М., 1963.
12. Заковоротная М.В. Онтологическая инженерия, философская онтология: проблемы и перспективы // Научная мысль Кавказа. 2013. № 2. С. 13 – 20.



13. Mizoguchi R. Tutorial on Ontological Engineering: Part 1: Introduction to Ontological Engineering // New Generation Computing. 2003. Vol. 21 (4). P. 365 – 384.
14. Рубашкин В. Ш. Онтологическая семантика. Знания. Онтологии. Онтологически ориентированные методы информационного анализа текстов. М., 2013.
15. Лапишин В. А. Онтологии в компьютерных системах. М., 2010.
16. Панченко А. И. Философия, физика, микромир. М., 1988.
17. Ивина А. А. Философия : энцикл. словарь М., 2004.
18. Большой Российский энциклопедический словарь. М., 2009.
19. Мудрова А. Ю. Словарь синонимов русского языка. М., 2009.
20. Жуковский В. И. Теория изобразительного искусства. СПб., 2011.
21. Райбекас А. Я. Вещь, свойство, отношение как философские категории. Томск, 1977.
22. Smith B. Constraints on Correspondence // Traditionen und Perspektiven der analytischen Philosophie / eds. H. Rutte, W. Sauer, W. Gombocz. Vienna, 1989. P. 415 – 430.
23. Фролова И. Т. Философский словарь. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2001.
24. Чудинов Э. М. Природа научной истины. М., 1977.
25. Жилейко Г. И. Техническая электродинамика. М., 1994.
26. Элементарный учебник физики : в 3 т. / под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 2 : Электричество и магнетизм. М., 2001.
27. Янтарьэнергосбыт к 2023 г вложит более 1 млрд руб. в установку «умных» счетчиков в многоэтажках Калининградской области // Интерфакс. 2020. URL: <https://www.interfax-russia.ru/northwest/news/> (дата обращения: 14.10.2020).
28. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2021 – 2025 годы // Правительство Калининградской области : [офиц. сайт]. URL: https://infrastruktura.gov39.ru/upload/165P_3004_2020.pdf (дата обращения: 14.10.2020).
29. Карманова Т. Е. Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения : учеб. пособие. Архангельск, 2015.
30. Ханин Ю. И. Повышение эффективности электропередачи в сельских сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовой нагрузкой посредством компенсации неактивных составляющих полной мощности : дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2017.
31. Убытки, поломки, простои: последствия аварийного отключения электричества и способы их нивелировать // Хабр : [сайт]. URL: <https://habr.com/ru/company/eaton/blog/514856/> (дата обращения: 14.10.2020).
32. Данилин А. Негативные явления в электросети - их влияние на нагрузку и способы борьбы // iXBT.com : [инф.-аналит. сайт]. URL: https://www.ixbt.com/power/ups/electric_power.shtml (дата обращения: 14.10.2020).
33. Михеев Г. М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. М., 2010.
34. Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1992.
35. Федоров В. А. Библия релейной защиты и автоматики. Новосибирск, 2014.
36. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М., 1991.
37. Автоматика энергосистем : учеб. пособие / Ю. С. Боровиков, А. С. Гусев, М. В. Андреев, А. О. Сулайманов. Томск, 2015.
38. Автоматика электроэнергетических систем : учеб. пособие для вузов / О. П. Алексеев, В. Е. Казанский, В. Л. Козис. М., 1981.
39. Павлов Г. М., Меркурьев Г. В. Автоматика энергосистем. СПб., 2001.



40. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования : стандарт ОАО «СО ЕЭС». URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_emerg_control_2011_izm_2014.pdf (дата обращения: 17.10.2020).
41. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М., 2004.
42. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника : учебник и практикум. М., 2019.
43. Исследование электронных коммутационных аппаратов и регуляторов : учеб.-метод. пособие / В.И. Лузгин, С.Ю. Кропотухин, А.С. Коптяков, Д.А. Глушков. Екатеринбург, 2017.
44. Малахова Т.Ф., Захаренко С.Г., Захаров С.А. Грозовые явления и защита систем электроснабжения от атмосферных перенапряжений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №4. С. 110–116.
45. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи : учебник. Ленинград, 1979.
46. Авакян С.В., Воронин Н.А., Дубаренко К.А. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. №3 (154), ч. 2. С. 253–266.
47. Яглом И.М. Математика и реальный мир. М., 1978.
48. Лыкин А.В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск, 2009.
49. Мамро С.И., Фролов М.В. Лекции по электродинамике : учеб. пособие для вузов. Ч. 1. Воронеж, 2007.
50. Макарова И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М., 2001.
51. Козис В.Л., Овчаренко Н.И. Автоматика электроэнергетических систем : учеб. пособие для вузов М., 1981.
52. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. СПб., 2001.
53. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под ред. А.М. Яшина. СПб., 2001.
54. Nerode A., Kohn W. Models for Hybrid Systems: Automata, Topologies, Stability // Technical Report 93-11. Cornell University, 1993.
55. Tavernini L. Differential Automata and their discrete simulators // Nonlinear Analysis, Theory, Methods, and Applications. 1987. Vol. 11 (6). P. 665–683.
56. Перминов В.Я. Математика и реальность: Гносеологические проблемы математизации знания // Вестник МГУ. Сер. 7: Философия. 2014. №1. С. 42–68.

Об авторах

Александр Васильевич Колесников — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

София Борисовна Румовская — канд. техн. наук, науч. сотр., Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», Россия.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Эрик Викторович Ясинский — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; ведущий разработчик, ООО «Роуттех», Россия.

E-mail: ejasinski96@gmail.com



Сергей Александрович Солдатов — канд. техн. наук, ведущий разработчик
ООО МТС ИТ, Россия.

E-mail: ssacompany@mail.ru

The authors

Prof. Alexander V. Kolesnikov, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Dr Sophiya B. Rumovskaya, Research Fellow, Kaliningrad branch of the FRC
«Computer Science and Control» of the RAS, Russia.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Eric V. Jasinski, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Lead
Developer, Ltd «Routtech», Russia.

E-mail: ejasinski96@gmail.com

Dr Sergei A. Soldatov, Lead Developer, «MTS IT», Russia.

E-mail: ssacompany@mail.ru