ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-164-187
УДК 621.311

Нормирование цифровых технологий тренажерных систем как способ обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики (часть 3)

Магид С. И.[1]*, Загретдинов И. Ш.[2], Мищеряков С. В.[3], Архипова Е. Н.[1], Самойлов В. Л.[4]

[1] *АО «Тренажеры электрических станций и сетей», Варшавское шоссе, д. 125Ж, корп. 6, 117587, г. Москва, Россия*
[2] *АО «Институт Теплоэлектропроект», Спартаковская ул., д. 2а, стр.1, 105066 г. Москва, Россия*
[3] *Некоммерческое партнерство «Корпоративный образовательный и научный центр Единой энергетической системы им. А. Ф. Дьякова», ул. Красноказарменная д.13, к. "П", 111250, г. Москва, Россия*
[4] *ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», ул. Автозаводская, д. 14, 115280, г. Москва, Россия*

Поступила / Received 05.08.2019
Принята к печати / Accepted for publication 19.03.2020

Рассмотрены проблемы создания нормированных цифровых тренажерных систем с целью обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики. Изложены причины, которые препятствовали обеспечению эффективности функциональных свойств тренажерных систем для подготовки эксплуатационного персонала, у всех разработчиков в энергетической отрасли. Основные из них заключались в отсутствии методологии и методики разработки базовой подсистемы тренажера — математической модели энергообъекта, поскольку в имевшихся стандартах, нормах и технических требованиях речь шла только о требованиях к структуре и функциональным свойствам подсистем тренажера. Эти причины и обстоятельства определяют современное состояние российского тренажеростроения, негативные тенденции которого подробно рассмотрены в данной статье. Дана критическая оценка разработкам тренажеров некоторых российских специалистов, которые не способствуют повышению качества подготовки и переподготовки эксплуатационного персонала энергопредприятий. Определена концепция физико-статистического подхода к разработке имитационной модели энергообъекта, которая включает в себя аналитическое описание физических процессов в объекте моделирования, адаптированное к реальным процессам с учетом выборочных наблюдений в реальном масштабе времени, накоплением и анализом данных статистических процедур с корректировкой структуры модели и оценкой параметров и состояний модели объекта. Концепция этого подхода определяет основную сторону современной методологии в постановке и решении всех задач моделирования энергообъектов для тренажеростроения. Западные санкции и требования импортозамещения определяют необходимость отечественных разработок по основным позициям производства и внедрения новой техники в энергетической отрасли, в том числе и в области тренажеростроения. При разработке отечественных тренажеров следует иметь в виду, что принципы и технические правила энергетического оборудования, приобретаемого в западных странах, в том числе и систем автоматического управления этим оборудованием, не соответствуют аналогичным, в рамках которых построена и функционирует ЕЭС России. Отмечается, что при реальных условиях эксплуатации отечественных энергообъектов надежность оперативного, обслуживающего и ремонтного персонала приобретает определяющее значение. Указывается, что с целью ее повышения необходимо разработать новый нормативный документ, в котором была бы раскрыта цель его разработки, а именно, обеспечение единства и эффективности методологии разработки структуры и функций цифровых технологических систем для подготовки персонала энергопредприятий

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нормирование, цифровые технологии, тренажерные системы, объекты электроэнергетики, надежность обслуживания

Адрес для переписки:
Магид С. И.
АО «Тренажеры электрических станций и сетей»
Варшавское шоссе, д. 125Ж, корп. 6, 117587, г. Москва, Россия
e-mail: magid@testenergo.ru

Address for correspondence:
Magid S. I.
JSC «Simulators of power plants and networks»
bldg. 6, 125Zh, Varshavskoe shosse, 117587, Moscow, Russia
e-mail: magid@testenergo.ru

Для цитирования:
Магид С. И., Загретдинов И. Ш., Мищеряков С. В., Архипова Е. Н., Самойлов В. Л. Нормирование цифровых технологий тренажерных систем как способ обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики (часть 3). Надежность и безопасность энергетики 2020. – Т. 13, №3. – С. 164 – 187.
https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-164-187

For citation:
Magid S. I., Zagredtinov I. Sh., Mishcheryakov S. V., Arkhipova Ye. N., Samoylov V. L. [Standardization of digital technologies of simulator systems as a method of ensuring reliability of conditions of service of power engineering facilities (part 3)]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry 2020, vol. 13, no. 3, pp. 164 – 187. (in Russian)
https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-164-187

Standardization of digital technologies of simulator systems as a method of ensuring reliability of conditions of service of power engineering facilities (part 3)

Magid S. I.[1]*, Zagredtinov I. Sh.[2], Mishcheryakov S. V.[3], Arkhipova Ye. N.[1], Samoylov V. L.[4]

[1] *JSC «Simulators of power plants and networks», bldg. 6, 125Zh, Varshavskoe shosse, 117587, Moscow, Russia*
[2] *JSC «Teploproekt Institute», Spartakovskaya St, 2a, bldg 1, 105066, Moscow, Russia*
[3] *NP «CTSCenter UES named after A. F. Dyakov», Krasnokazarmennaya street, 13P, 111250, Moscow, Russia*
[4] *JSC «All-Russia Thermal Engineering Institute», 14 Avtozavodskaya St, 115280, Moscow, Russia*

The article deals with the issues of creating standardized digital simulator systems, in order to ensure reliable service conditions of electric power facilities. The article presents the reasons which prevented all simulator designers in power engineering from ensuring efficient functional properties of simulation systems for operator training. The primary problem was the lack of methods and procedures for developing the simulator's core subsystem – a mathematical model of a power facility, because the existing standards, norms and technical requirements were only concerned with the structure and functional properties of simulator subsystems. These reasons and circumstances determine the current state of the Russian simulator production; its negative trends are covered in depth in this article. There is also a critical assessment of simulators designed by some of the Russian engineers: these machines are not conducive to improving the quality of training and retraining of operating personnel of power companies. The article identifies the concept of a physical-statistical approach to developing a power facility simulation model: it includes preparing an analytical description of the physical processes at the simulation object, adapted to real processes, taking into account real-time sample observation, collecting and analyzing statistical procedure data, adjusting the model structure and assessing the parameters and states of the facility model. This approach concept defines the main aspect of modern methodology for setting and achieving all goals related to the energy facility modeling for simulator construction. Western sanctions and import substitution requirements dictate the necessity of developing home-grown technology, manufacturing and introducing new equipment in power engineering, including the sphere of simulator production. The designers of Russian simulators should understand that the principles and technical rules of power equipment imported from Western countries, including automatic control systems for such equipment, are different from the ones which the Unified Power System of Russia is based on. It is emphasized that, in real operating conditions of Russian power facilities, reliability of operation, maintenance and repair personnel is essential. It is noted that, in order to improve this reliability, it is necessary to develop a new regulatory document which would fully explore its topic: ensuring consistent and efficient methods for developing the structure and functions of digital technological systems for training power facility personnel.

KEYWORDS: standardization, digital technology, simulator systems, electric power facilities, maintenance reliability

Введение

В первых двух частях данной статьи[1] были рассмотрены вопросы нормирования цифровых тренажерных систем подготовки оперативного и ремонтного персонала для обеспечения надежности условий обслуживания основных объектов электроэнергетики. Первые нормативные документы отрасли [1, 2] были разработаны с целью *обеспечения* ***единства*** *структуры и* ***эффективности*** *функций технических систем и средств для подготовки персонала* энергопредприятий, энергосистем и объединений и утверждены Минэнерго СССР в 80-х годах прошлого столетия.

Таким образом, планировалось организовать единую государственную эффективную систему подготовки, переподготовки и непрерывного повышения квалификации оперативного, обслуживающего и ремонтного персонала электроэнергетики.

Указанная система подготовки персонала была реализована только частично в связи с распадом СССР и реформированием единой энергосистемы.

Кроме того, основная цель первого этапа нормативизации — обеспечение *единства* структуры и эффективности функций технических систем и средств для подготовки персонала фактически и *не могла быть полностью достигнута* из-за наличия следующих обстоятельств.

Во-первых, как начальные, так и все последующие стандарты, нормы и технические условия определяли *только* ***требования*** *к функциональным свойствам подсистем тренажера,* а именно: *к рабочему месту оператора, рабочему месту инструктора, модели объекта регулирования, модели системы регулирования, учебно-методическому обеспечению* и т. д., а вопросы ***методологии и методики*** разработки базовой подсистемы тренажера — ***математической модели объекта*** в указанных нормативных документах *вообще не рассматривались*.

Во-вторых, перед разработчиком средства реали-

[1] Магид С. И., Загретдинов И. Ш., Мищеряков С. В., Архипова Е. Н., Самойлов В. Л. Нормирование цифровых технологий тренажерных систем как способ обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики (часть 1) // Надежность и безопасность энергетики 2019; 12 (3): 177–189. (часть 2) // Надежность и безопасность энергетики 2020; 13 (1): 17 – 28.

зации тренажера, а именно, его программного обеспечения (ПО), вставали вопросы разработки **программной тренажерно-моделирующей среды**, которая и должна *моделировать теплотехническое, электротехническое и водоподготовительное оборудование и процессы в них.* Указанные вопросы собственно программирования также не нормировались и не рассматривались.

И в-третьих, существующие разработки тренажеров отечественных и зарубежных фирм, связанных с авиацией, атомной энергетикой и военно-промышленным комплексом были в те времена, **строго засекречены**, так что вся информация методологического, методического и технико-применительного характера для разработчиков тренажеров традиционной энергетики была практически недоступна.

Таким образом, в сложившихся условиях добиться единства и эффективности структур и функций тренажерных систем для подготовки персонала было практически невозможно, поскольку методология разработки собственно тренажеров не была сформулирована и, естественно, не стандартизирована, а указанные «причины» или «обстоятельства» и определили то состояние в тренажеростроении, которое мы имеем на данный момент времени. Его негативные тенденции были фрагментарно рассмотрены в первой части статьи.

В связи с этим представляет определенный интерес рассмотреть далее более подробно эти самые *негативные тенденции или отрицательные тренды* образцов современного тренажеростроения, касающиеся как уже упомянутых «дискуссионных» реализаций, так и более поздние «проблемные» или «полемические» внедрения отечественных разработчиков.

Однако, прежде чем приступить к рассмотрению и анализу указанных материалов, считаем целесообразным ознакомиться с разделом, отражающим мнение современного экспертного сообщества по затронутой тематике.

Современные научно-технические требования и рекомендации при моделировании эргатических (человеко-машинных) распределенных систем

Основные проблемы, которые возникают при разработке математического и программного обеспечения современной тренажерной техники, так или иначе связаны с адекватным описанием энергообъекта, соответствующих систем контроля и управления, специфических свойств человека-оператора, т. е. с необходимостью адекватного отображения распределенных технологических эргатических систем.

Современные научно-технические требования и рекомендации при разработке методологии и реализации моделей эргатических систем энергообъектов для тренажеростроения[2] следующие:

• Постановка и решение задач адекватного описания исследуемой системы в любой области знания, как известно, имеют шансы на успех лишь в той мере, в какой удается найти подходящие средства, т. е. математический аппарат для описания задачи, достаточно полно учитывающий ее специфику и обладающий вместе с тем необходимым уровнем абстракции, обеспечивающим приемлемую общность подхода.

• Применительно к разработкам математического и программного описания эргатических систем тренажерной подготовки оперативного персонала энергообъектов проблема поиска подходящего количественного аппарата, способного к адекватному отображению наиболее существенных сторон взаимосвязанного функционирования оператора и машинной части тренажерного комплекса, определяющих надежность оперативного персонала, в период реформирования электроэнергетики и износа основных фондов, становится особенно острой.

Правомерность и целесообразность тех или иных подходов к разработке математической модели энергообъекта для тренажера определяется теми возможностями единой количественной меры, которые имеет разработчик для описания процессов в подсистемах энергообъекта, обладающих различными физическими характеристиками.

Приемлемая общность методик при этом может быть достигнута лишь в тех случаях, когда эта мера настолько абстрактна и универсальна, что не зависит от физической сущности характеризуемых ею процессов и инвариантна по отношению к конкретным реализациям моделей энергообъектов.

Другими словами, разрабатываемое программное обеспечение должно быть пригодным для количественного описания функций и человека, и машины независимо от содержания выполняемых ими задач, условий работы и всех других факторов, характеризующих их взаимодействие.

• В общем случае в соответствии с традиционной классической гносеологией (теорией познания) научно-познавательный процесс разработки современного IT-тренажера заключается в переходе от вопроса к проблеме, затем к гипотезе, которая после достаточного экспериментального обоснования превращается в теоретическую модель. Таким образом, гносеологическая цепочка: вопрос — проблема — гипотеза — эксперимент — модель определяет и структуру, и сущность методологии имитационного моделирования энергетических объектов.

• Критерии научности, включенные в структуру научной методологии, призваны отсеять проблемы от псевдопроблем, а также оценить продукты и методы

[2] С. И. Магид. Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. – М.: МЭИ 1998.
С. И. Магид, И. М. Ибрагимов. Моделирование энергетических систем. М.: «Апарт» 2002.
Энергобезопасность и человеческий фактор. Сборник статей под редакцией д.т.н., профессора Магида С. И. – Москва – Краснодар. Издательство «Энергобезопасность» 2006 г.
С. И. Магид, Е. Н. Архипова. Тренажерная подготовка персонала энергетики. – М.: Издательство «Энергобезопасность», 2017. – 150 с.: ил.

познания на основании их соответствия или несоответствия стандартам науки. В настоящее время, как правило, определяются следующие основные критерии научной методологии: объективность, опытная подтверждаемость, рациональность, воспроизводимость, интерсубъективность, общезначимость, формальная непротиворечивость, когерентность.

• Кроме того, тренажер, как обучающее устройство, должен удовлетворять целевой функции человеко-машинной системы для подготовки персонала, а методология разработки тренажера должна соответствовать системно-эргономическому подходу. На основании указанных требований производится анализ и синтез структур тренажера, как программно-технического комплекса, и практическое решение задач моделирования энергообъекта-прототипа.

• Целевая функция человеко-машинной системы при обучении оператора на тренажере, определяющая принципиальные требования к тренажеру, состоит в следующем:

– обеспечение человеку-оператору адекватной информационной модели прототипа объекта управления;

– обеспечение возможности качественного и количественного анализа информации и принятия решений;

– формирование и совершенствование у оператора профессиональных навыков и умений при заранее заданных отклонениях (смещениях) модели относительно моделируемого прототипа, т. е. погрешности моделирования, обеспечивающих необходимую эффективность обучения.

• Системно-эргономический подход означает воспроизведение в имитируемом объекте результирующих функций, а также внешних и внутренних связей, соответствующих исходному объекту с такой точностью, которая достаточна для решения поставленных задач в необходимом объеме, при этом отличие результата от требуемого допуска должно лежать в поле назначенного допуска и обеспечивать:

– адекватность целей и условий;

– адекватность интерфейса (рабочих мест операторов энергообъектов);

– адекватность информационных потоков;

– адекватность математического моделирования;

– эргономическую адекватность;

– психологическую адекватность.

• Один из аспектов моделирования — относительная условность уровня познания, достигнутого создателем модели, другой аспект — обязательная способность моделей к расширению. Таким образом, вначале вводится некоторая опорная информация, т. е. достаточно репрезентативные сведения, которые путем уменьшения избыточности получаются из исходных данных, затем должна иметься возможность постепенно вводить все новые знания в уже построенную модель: если при этом установленные рамки для модели становятся слишком тесными, необходимо расширить выбранный основной класс моделей.

• Существенным элементом взаимодействия оператора и машинной части системы является тот факт, что и контролируемые процессы, и сама деятельность оператора, рассматриваемая как процесс, как правило, носят явно выраженный динамический характер и потому могут быть описаны надлежащим образом лишь *в функциях, явно зависящих от времени*.

• Любые попытки использования количественных оценок *на основе конечной совокупности постоянных во времени критериев*, параметров или других величин, определяемых по среднестатистическим данным, или статическим расчетам и распространяемых на конечные отрезки времени функционирования, *не могут привести к адекватным математическим моделям*, обеспечивающим прогнозирование работы как энергообъекта, так и обучаемых операторов.

• Оператор способен оценивать ситуацию и формировать решение на управление не только в зависимости от наличия тех или иных сигналов, но и в связи с моментами времени их реализации, в связи с чем можно утверждать, что любой сигнал информационного интерфейса полезно служит задачам контроля и управления только будучи соотнесенным к моменту времени его реализации.

• Необходимо определение всего комплекса психофизиологических свойств и характеристик человека, которые оказываются существенными для операторской деятельности и которые, следовательно, должны быть отражены в соответствующих моделях, призванных для ее математического описания.

• При понимании и учете сознательного, творческого характера деятельности человека возникает необходимость постановки и решения задач, связанных с нахождением объективных оценок некоторой субъективной его деятельности, т. е. в классификации и анализе причин отказов, аварий и других аномальных ситуаций.

• Свойства и характеристики человека, связанные с его способностью к самообучению и самоорганизации деятельности на базе предыдущего опыта, определяют необходимость решения ряда вопросов при разработке методологии моделирования эргатических систем, т. е. адекватного отображения способностей человека к учету предыстории, интерполяции и экстраполяции контролируемых процессов, его адаптации к окружающей обстановке и выбору оптимальной стратегии поведения.

• Необходимость учета в интегральных моделях эргатических систем латентного (запаздывающего) периода реакции человека-оператора на предъявленный ему сигнал оказывает существенное влияние как на конструкцию интерфейса энергообъекта (тренажера), так и на организацию учебного процесса для приобретения оператором реальных когнитивных и моторных навыков, с учетом того, что, кроме временного сдвига реакции по отношению к сигналу, это явление предопределяет временну́ю дискретизацию процесса обработки сигналов и сопровождается неизбежными потерями той части сигналов, темп поступления которых (частота) превосходит быстродействие оператора.

Далее, с учетом изложенных требований и рекомен-

даций рассмотрим некоторые материалы, посвященные тренажерной тематике.

Системные парадоксы «высокоточного» моделирования

В конце 2013 года в издательстве Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) была выпущена в свет трехтомная монография «Теория и технология систем управления» под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Ю. С. Тверского [3][3].

Цель издания, анонсированная авторами, — показать особенности и ключевые наукоемкие аспекты новой технологии создания территориально-распределенных многофункциональных АСУТП электростанций на базе ПТК сетевой иерархической структуры.

Актуальность постановки задач рассматриваемой монографии трудно переоценить в связи с современной общей ситуацией в российской экономике и в электроэнергетике, в частности. Западные санкции и требования импортозамещения диктуют необходимость наличия отечественных разработок по основным позициям производства и внедрения новой техники. Тем не менее, и, особенно в электроэнергетике, поставки новой техники идут в подавляющем большинстве случаев с Запада, включая системы автоматизированного управления этим оборудованием и системы тренажерной подготовки персонала, которые, судя по экспертным оценкам Минэнерго РФ, в основном, *не соответствуют принципам и техническим правилам, в рамках которых построена и функционирует ЕЭС России. Вследствие этого, «статистические данные за несколько последних лет показывают, что в электроэнергетике в настоящее время сложилась устойчивая тенденция роста количества крупных аварий, имеющих системное значение»*[4].

В связи с изложенным представляет значительный интерес рассмотрение вопроса — что же нового, в итоге, предлагают авторы монографии при разработке и внедрении современных отечественных систем управления и тренажерной техники?

Подробный анализ монографии смотри в [5], здесь же мы приводим лишь выводы из указанной статьи.

1. Цель изданной монографии показать особенности и ключевые наукоемкие аспекты новой технологии создания территориально-распределенных многофункциональных АСУТП электростанций на базе ПТК сетевой и иерархической структуры, по нашему мнению, достигнута лишь частично, *причем только в плане постановки задач* разработки новой методологии функционального, конструкторского и технологического проектирования АСУТП.

2. Принципиальные авторские особенности новой наукоемкой технологии создания АСУТП электростанций включают в себя следующее:

• полигонные испытания АСУТП с *«встроенной» полноценной и высокоточной моделью технологического объекта реального времени, информационно совместимой с ПТК управляющей системы*;

• базовую теоретическую концепцию разработки полноценных моделей оборудования и процессов, заключающуюся в том, что в основе современной теории построения *высокоточных всережимных математических моделей лежат фундаментальные законы неравновесной термодинамики (феноменологический подход), позволяющие получать обобщенные распределенные трехмерные нелинейные (всережимные) детерминированные динамические* ***модели высокой точности****, с использованием, прежде всего,* ***данных заводов-изготовителей***;

3. Однако базовая теоретическая концепция, позволяющая строить «полноценные высокоточные математические модели» на основе «фундаментальных законов неравновесной термодинамики (феноменологический подход)», используя, прежде всего, «данные заводов-изготовителей», вызывает большие сомнения. Это связано с тем, что закономерности нормативных методов (уравнения кинетики, тепломассообмена, материального баланса и пр.), по которым проектанты завода-изготовителя рассчитывают энергообъект (котел, турбину, вспомогательное оборудование) в условиях эксплуатации значительно искажаются, т. е. изменяется форма и степень связи между переменными из-за изменения масштабов процесса, влияния помех, шумов различного рода, отклонения от идеальных условий.

Указанные обстоятельства определяют возможность использования физических, химических, термодинамических, механических закономерностей, нормативных документов только на первой стадии моделирования (так называемая *гипотетическая* или *аналитическая модель*) в связи с тем, что техническая реализация результатов синтеза такой модели приводит к значительному несоответствию модели объекту и требует существенной корректировки полученных результатов.

Отсюда возникает специфика постановки и решения задачи *обеспечения адекватности имитационной модели*: преодоление противоречий между теоретическими познаниями и эмпирическими данными делает неизбежной рекурсивность процедуры настройки имитационной модели с возвратами на стадию собственно моделирования для корректировки структуры имитационной модели (верификация) и параметров (валидация).

Данный вывод подтверждается результатами исследований как российских, так и зарубежных ученых [5 – 11], нормативными документами как отечественными, так и иностранными [12 – 16], а также обширным опытом ведущих наладочных и научно-исследовательских организаций электроэнергетики РФ (ОРГРЭС, ЦКТИ, ВТИ и др.).

4. И, как следствие, «ключевой фактор» *новой технологии* создания АСУТП — полигонные испытания

[3] Авторы: Тверской Ю. С., Демьяненко В. А., Голубев А. В., Копсов А. Я., Никоноров А. Н., Новиков С. И., Рубашкин А. С.

[4] см. статью [4]: «Проблемы нормативно-технического регулирования в электроэнергетике», Грабчак Е. П. (Департамент оперативного контроля и управления в электроэнергетике Минэнерго России).

АСУТП с «встроенной» *аналитической* моделью объекта управления, синтезированной с использованием нормативных документов и конструктивных данных завода-изготовителя, не приводит к желаемым результатам из-за **несоответствия модели объекту** и **необходимости существенной корректировки полученных результатов**.

Поэтому и не вызывает возражения тезис авторов монографии о том, что «в целом работы по созданию общей теории, методологии и технологии построения всережимных, высокоточных динамических моделей сложных технологических объектов и технических систем управления **находятся в стадии незавершенных разработок**».

Таким образом, анонсированные авторами монографии «новые ключевые технологии», «научная новизна» и «революционные изменения» общей технологии создания АСУТП, остаются, к сожалению, **только лишь анонсом и благими намерениями** к дальнейшей методологической проработке.

5. И, наконец, о разработке авторами монографии *«объективных тренажеров»* или тренажеров *«третьего поколения»*.

Метод «объективного» моделирования (автор — Рубашкин А. С., при участии Тверского Ю. С. — так в монографии) заключается в том, что для модели объекта строится единая система нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, *коэффициенты* которых определяются на основе «объективных»[5] *конструктивных данных* объекта моделирования, полученных, в свою очередь, из данных заводов-изготовителей. Указанные коэффициенты принимаются *постоянными* и *«в процессе наладки и тестирования модели не меняются»*.

Полученная таким образом *«аналитическая объективная» модель* объявляется *«сверхточной»*, и, по мнению авторов монографии, «если параметры какого-либо режима на тренажере и реальном объекте не совпадают, *то именно параметры тренажера являются правильными*, а на реальном объекте есть проблемы с источниками информации».

Указанная позиция авторов монографии прямо противоречит основным критериям научной методологии, а именно, *объективности*, которая фиксирует совпадение знаний со своим объектом и устраняет все, что связано с субъективизмом в познавательной деятельности (псевдопроблемы) и *опытной подтверждаемости,* которая фиксирует чистые данные опыта и направлена на установление реальных свойств и характеристик объекта на основе эмпирической проверки[6].

Кроме того, мы согласны с действительно объективным мнением большинства членов экспертного сообщества, что позиция авторов монографии в части разработки «объективных» и «сверхточных» моделей для тренажеров сомнительна ввиду *отсутствия* в предлагаемой методологии моделирования энергетических объектов требований обязательной (нормативной) *топологической полноты*, необходимой и достаточной *точности моделирования* в соответствии с теорией погрешностей, противоречивости самой постановки задачи *идентификации объекта* по априорной модели и, самое главное, отсутствия *естественно-научного подхода* к определению понятия *адекватности* модели энергетическому объекту.

Что же касается окончательной идентификации модели, то в этом смысле *системный парадокс* оперативной (тренажерной) модели объекта состоит в том, что *принципиально невозможно* сформировать критерий приближения к реальному объекту его модели, синтезируемой по реакциям объекта на управляемые и неуправляемые воздействия, если неизвестны эти реакции.

Таким образом, формирование критерия приближения *модели тренажера* к объекту можно реализовать только путем организации специальных рекурсивных экспериментальных процедур для определения реакций объекта на управляемые и неуправляемые воздействия, а именно, верификации — для корректировки структуры модели (синтаксис), и валидации — для корректировки параметров модели (семантика).

И сколько бы авторы монографии не применяли рекламных определений тренажера «полноценный», «сверхточный», «объективный», «пятого (десятого) поколения» и т. д., и т. п., несоблюдение ими критериев научной методологии, неучет опыта современных разработок, требований нормативных документов так или иначе приводит их к созданию «миражей» и известному финалу.

6. Конечного пользователя тренажерной продукции *не интересует* исходная система уравнений, описывающая энергообъект, и, тем более *метод ее решения*. Пользователь принимает *сертифицированное* техническое устройство и проверяет его по заранее оговоренному регламенту. Цель пользователя тренажерной продукции состоит в обеспечении *гарантированной*

[5] Отсюда и происхождение термина «объективное моделирование».

[6] Таким образом, ***«объективный метод»***, позволяющий, как представляется авторам монографии, разработать удивительно-полноценную ***«современную теорию построения высокоточных всережимных математических моделей»***, в основе которой лежат ***«фундаментальные законы неравновесной термодинамики, дает возможность получить обобщенные распределенные трехмерные нелинейные (всережимные) детерминированные динамические модели высокой точности».***

Однако, в силу того, что этот ***«новый наукоемкий объективный метод»*** прямо противоречит принятым критериям научной методологии, и по иронии судьбы, именно, критерию ***«объективности»***, необходимо, по нашему мнению, поставить перед каждым из ***семи (!)*** определений слова — модели, частицу ***«не»***, а в определении «высокой точности» упомянутую частицу можно поставить перед любым словом, по выбору авторов.

А далее, фундаментально-неравновесным и необъективным авторам монографии следовало бы, по нашему мнению, публично признаться, как это не печально, ***в полной незавершенности***, на данный момент времени, своих не совсем полноценных и уж совсем, конечно, не наукоемких разработок.

успешной работы человеко-машинной системы, связанной с качественной и количественной адекватностью модели объекту-прототипу.

В связи с изложенным, при оценке монографии, по-нашему мнению, необходимо учесть требования действующих «Норм годности ПСП» –- СО 34.12.305-99, где сказано, что «должна обеспечиваться достаточная точность модели — когда отклонение в поведении моделируемых параметров от поведения реальных параметров настолько мало, что практически не различается обучаемыми и допускается экспертами при приемке тренажера».

Практически все подходы к оценке качества модели базируются на известном положении теории моделирования, заключающемся в том, что *«оценка адекватности модели как степени сходства с оригиналом может опираться только на оценку отличия от оригинала»*.

Машина времени в тепловых сетях

Вопросы, затронутые в статье «Тренажер для подготовки персонала тепловых сетей» [17], чрезвычайно актуальны по причине отсутствия в современной системе подготовки оперативного персонала электроэнергетики тренажеров для подготовки персонала тепловых сетей. Актуальность тематики подготовки кадров усугубляется большим износом основного оборудования тепловых сетей крупных городов и мегаполисов РФ, что значительно увеличивает влияние человеческого фактора на общую надежность теплоснабжения.

С учетом сказанного, разработка пилотного проекта тренажера для одного из важнейших звеньев технологической цепи энергообеспечения коммунальной и промышленной инфраструктуры, без сомнения, привлечет самое пристальное внимание всех участников современного процесса подготовки оперативного персонала электроэнергетики.

Тренажер диспетчера тепловых сетей, разработанный ООО «Триеру», состоит из двух частей: математической модели тепловой сети и логической модели действий диспетчера.

Математическая модель тепловой сети рассчитывается с помощью двух **взаимодополняющих** программных модулей:

• модуль, разработанный ООО «Триеру», который представляет процессы в тепловой сети как **квазистатические;**

• модуль, разработанный специалистами МВТУ им. Баумана, который позволяет рассчитывать **динамическую** модель тепловой сети.

Преимущества первого модуля (в редакции авторов статьи) — *простота описания схемы, быстрое время счета и возможность осуществления «скачков во времени». Недостатки — расчет примерного поведения процессов в тепловой сети.*

Преимущества второго модуля — в учете реальных переходных процессов в тепловой сети, т. е. точность расчета. Недостатки — относительное длительное время расчета (по сравнению с первым модулем), сложность программирования (для чего необходима специальная программа) и невозможность осуществления мгновенного «скачка во времени».

Из теории моделирования, теории автоматического регулирования, кибернетики известно, что объекты регулирования традиционно, в первом приближении, могут быть идентифицированы как:

• **статические** («автомат без памяти») — с помощью алгебраических, трансцендентных, логических и др. уравнений, т. е. без учета времени или «предыстории» объекта;

• **динамические** («автомат с памятью») — с помощью дифференциальных уравнений в частных производных (при распределении по длине) и обыкновенных дифференциальных (интегральных, разностных) уравнений при рассмотрении сосредоточенных объектов, т. е. с учетом времени или «предыстории».

Таким образом, поскольку объект регулирования принципиально и альтернативно может быть идентифицирован только одним видом математической модели — или **статическим** (без учета времени) или **динамическим** (с учетом времени как параметра), то неясно, о каких же «квазистатических процессах» идет речь в программном модуле, разработанном ООО «Триеру».

Если речь идет о наборе статических расчетов гидравлики конкретной тепловой сети (а, скорее всего, так оно и есть), и время протекания реальных процессов здесь не учитывается, то в тренажере остается два времени — время счета модели и тренажерное текущее время.

Разработчик тренажера обычно учитывает четыре вида времени:

• **время протекания реальных процессов, характеризующее инерцию объекта моделирования** (время запаздывания, время выбега, время дотягивания) — термины из теории автоматического управления, применяемые для описания инерционных свойств объекта, т. е. то время, учет которого означает описание объекта с помощью дифференциальных уравнений, передаточных функций, преобразования Лапласа, частотных характеристик и т. п.;

• **время счета модели,** т. е. время решения программой системы уравнений, описывающих реакцию модели на входное воздействие — для динамических моделей и изменение функции при изменении аргумента — для статических моделей;

• **тренажерное текущее время,** начинающееся после включения тренажера;

• **реальное астрономическое время.**

Для динамических моделей учитываются три первые вида времени, для статических моделей только два — время счета модели и тренажерное текущее время.

В реальном астрономическом времени происходят занятия на тренажере.

По словам авторов статьи, преимущества модуля, разработанного ООО «Триеру» — **простота описания схемы**, **быстрое время счета** и **возможность осу-**

ществления «скачков во времени». Недостатки — расчет **примерного поведения процессов** в тепловой сети.

Из приведенных материалов совершенно непонятно, в чем же заключается принципиальный смысл принятых упрощений, да и как с помощью **модуля расчета** можно упростить технологическую схему тепловой сети.

Что касается времени счета модели, то современные возможности профессионального программного обеспечения и мощности компьютерной техники позволяют вести расчеты как статических, так и динамических моделей с шагом квантования по времени 1/10 | 1/12 сек. (с числом циклов до 1000).

Причем речь идет о значительных объемах тепловых и электрических схем, содержащих десятки тысяч элементов и параметров. Так что реализация гидравлических расчетов даже самых разветвленных схем тепловых сетей в режиме «он лайн» не должна вызывать принципиальных трудностей.

Но тогда, в связи с этим возникает вопрос — почему переход от одного статического состояния объекта к другому носит название **«скачка (прыжка) во времени»**? Происходит явная подмена понятий: время счета модели и тренажерное текущее время.

Это видно хотя бы из того, что, судя по статье, «пользователь может произвольно изменять внутреннее время модели с помощью прыжков во времени (естественно, только в положительном направлении — назад вернуться нельзя)».

А почему нельзя?

Во-первых, при наличии в современном тренажере набора «временных срезов», их можно «листать» с помощью меню в любом направлении и в любом порядке (как набор карточек).

А во-вторых, в современном динамическом тренажере записывается весь процесс управления объектом регулирования.

В любой момент можно остановить процесс и вернуться к исходному или любому промежуточному состоянию объекта.

В этом и смысл подмены понятий — нельзя считать наоборот (модельное время), но даже несколько устаревшие и пересматриваемые «Нормы годности» предусматривают в тренажерном текущем времени возможность остановки процесса моделирования и обратного перемещения.

Таким образом, уровень современного тренажеростроения, а также стандартные статические расчеты гидравлики тепловой сети должны обеспечить возможность реализовать в тренажере демонстрацию любых состояний сети без явно надуманных и скорее юмористических «прыжков или скачков во времени». **А так как время, как параметр, вообще не учитывается в упомянутых расчетах, то и нельзя «скакать и прыгать» в том, чего нет.**

В связи с этим, как прикажете понимать господ авторов, что «… в этом случае наиболее оптимален для использования расчетный модуль ООО «Триеру», который позволяет **рассчитывать модель с любым временным шагом**»?

Динамическая модель тепловой сети, разработанная МВТУ им. Баумана, **негативно** характеризуется авторами с точки зрения длительности времени счета модели, сложности программирования (?), для чего необходима специальная программа (**а как по-другому?**) и невозможностью осуществления мгновенного «скачка во времени» (?).

Существует обширная литература по методам расчета тепловых сетей, которые проводятся в наше время с помощью цифровой вычислительной техники. Однако, все известные программы, в том числе и учитывающие динамику объекта, не предназначены для тренажеров. Естественно, что для конструктивных и режимных расчетов теплосетей работа модели в режиме «он лайн» не обязательна (но она обязательна для тренажеров).

Тем не менее, ни одна уважающая себя западная (кстати, как и российская) фирма не предложит пользователю вместо тренажера с математической моделью, рассчитывающей реальные динамические процессы в энергообъекте, набор статических расчетов, прикрытых нехитрой программной оболочкой, для обучения оперативного персонала, работающего в экстремальных зимних температурных условиях.

Очевидно, поэтому и появляются такие «неопределенные» понятия, как «квазистатические процессы» и «взаимодополняющие модули».

Просто расчет идет на не совсем грамотного пользователя, который не заметит трюка (или оплошности) авторов с подменой времени и поверит в пресловутые «скачки и прыжки», не существующие реально в природе. А ведь и сами авторы из ООО «Триеру», кажется, наивно верят в них.

Чего стоит их драматический пассаж:

«Эти два времени (машинное и реальное) в самом начале работы с тренажером совпадают, однако при осуществлении «прыжков во времени» они могут расходиться в десятки, сотни и тысячи раз».

И в самом деле, так как время при проведении статических расчетов не учитывается, то расхождение в машинном и реальном времени может достигнуть любого, заранее заданного числа, допустим числа атомов во всей видимой части вселенной. Так что авторы в этом случае просто поскромничали. Тренажерное текущее время — это просто то время, на которое будет включен тренажер, а оно может быть любым (например, бесконечным) и статические расчеты модели сети тут совершенно ни при чем.

Помимо четырех видов времени, применяемых в тренажерах, для «квазистатических» моделей ООО «Триеру» появляется новое, дополнительное «внутреннее время модели, которое пользователь может произвольно изменять с помощью прыжков во времени».

Вопрос: какие же свойства объекта моделирования описывает «квазистатическая» модель ООО «Триеру», если у нее появляется новое, фантастическое «внутреннее» время, позволяющее осуществлять прыжки и путешествия во времени, реализующие-

ся простым «щелчком мышки по строке времени»?

И уж совершенно неясно, каким образом происходит «**взаимодополнение**» двух принципиально различных моделей, разработанных к тому же разными фирмами, когда одна из моделей **статическая** (или «квазистатическая»), а вторая **динамическая**.

Что же касается «перемещения во времени», к которому столь активно и восторженно стремятся авторы, то для динамических моделей оно (перемещение) скромно и буднично регламентируется в «Нормах годности» в виде регулируемого **масштаба времени**.

Естественно, что это никакое не «перемещение» и не «скачки и прыжки», а просто **изменение масштаба**, т.е. процесс изменения выходных параметров модели можно или ускорить, или замедлить (до 100 раз), что в пределах астрономического времени занятия на тренажере вполне достаточно для достижения дидактических целей. Достижение указанного эффекта в динамических моделях определяется изменением структуры и соответствующих коэффициентов в дифференциальных уравнениях, описывающих объект регулирования.

Масштаб времени тренажера

$$m = \frac{t_p}{t_{сч}}$$

t_p — время протекания реальных процессов;

$t_{сч}$ — время счета модели;

Для современного IT-тренажера: $m = 10^n$, где $(-2 \le n \le 2)$.

С целью дидактических удобств, для организации начала тренировки, заранее вычисляются и записываются «временные срезы» состояния оборудования при различных нагрузках, времени простоя и т. д.

Все это обычно предусматривается стандартным «Техническим заданием» на тренажер и не вызывает ни технических трудностей при разработке, ни излишних вопросов при эксплуатации тренажера.

Кроме того, к сведению авторов из ООО «Триеру», в современном тренажеростроении широко применяется так называемое, «*смешанное дискретно-непрерывное моделирование*», которое употребляется тогда, когда непрерывно изменяющиеся элементы системы *не представляют интереса* для разработчика модели. Т. е. когда зависимые переменные изменяются на фиксированные значения в заданные моменты модельного времени, называемые «временами наступления событий» (см. ниже в следующей главе).

Оставляя разработчиков «тренажера тепловых сетей» разбираться с фантастическими «перемещениями во времени», которые, как и следует из фантастической же литературы, могут быть реализованы, к сожалению, пока только при условии нарушения законов физики, тем не менее, пожелаем им при разработке нового «тренажера для **реальных** тепловых сетей» основываться хотя бы на требованиях действующих «Норм годности программных средств подготовки персонала энергетики» (РД 153-34.0-12.305-99) [13].

Указанные «Нормы» требуют, чтобы:

- построение модели базировалось на основе математического описания физических процессов, происходящих в реальном объекте, в виде дифференциальных, алгебраических и логических уравнений и т. д.;
- допущения, принимаемые при построении моделей, должны обеспечивать воспроизведение качественно верной физической картины, происходящей в объекте процессов и т. д.
- Далее в «Нормах» изложены требования к полноте моделирования, достаточной точности модели и, главное, к сохранению **реального** и применению **ускоренного масштаба времени**, т. е. модель в соответствии со всеми требованиями должна быть **динамической**.

Невыполнение указанных требований согласно «Нормам» **не позволяет рассматривать** данное программное средство в **качестве тренажера**.

Отсюда следует последний вопрос: как же быть в этом случае со свидетельством №50 от 30.05.2005 г. о соответствии «тренажера тепловых сетей» «Нормам годности»?

Что же касается второй части «тренажера тепловых сетей», которая носит весьма звучное название «логическая модель действий диспетчера», то с учетом приведенных выше «требований и рекомендаций», говорить о том, что создана «логическая модель действий диспетчера» (т. е. модель действий человека-оператора), по-нашему мнению, несколько преждевременно. Для этого нужно решить достаточно много не только поставленных (см. выше) и не решенных, но даже еще не поставленных задач и проблем в области процессов центральной нервной системы человека, функционирования нервно-мышечного аппарата, мыслительных процессов и т. п.

Впрочем, эти вопросы и не относятся к компетенции разработчика тренажера.

Дай Бог справиться со своими проблемами.

И быть скромнее.

Мы бы назвали эту подпрограмму просто «Программа оценки».

В современном IT-тренажере это одна из 24 служебных подпрограмм, входящих в массив «Средства контроля» [18].

В заключение хотелось бы пожелать и авторам статьи, и разработчикам тренажера не спешить с внедрением разработок и публикацией материалов без предварительной апробации (где, как и когда авторы, наверное, знают), а редакции журнала, опубликовавшего статью [17], применять известные правила предварительного рецензирования рукописей с учетом того, что оперативный персонал тепловых сетей российской теплоэнергетики достоин иметь самые современные и адекватные целям и задачам технические обучающие устройства.

Сказка о потерянном времени в одном из цехов электрической станции или нереальное моделирование реальной энергетики

История о «машине времени в тепловых сетях» имела естественное продолжение в июле 2018 года, когда тех-

ническое руководство Нижневартовской ГРЭС получило официальное письмо Московского энергетического института (МЭИ) под рабочим названием «Исследование, разработка и внедрение тренажера водоподготовительной установки»[19].

Стандартные письма такого рода обычно пишут в закупочную комиссию предприятия во время проведения торгов, когда конкурсант что-то уточняет в Техническом задании заказчика или снижает цену предполагаемого контракта.

Однако, содержание письма, категорически отрицающее основное требование действующего российского стандарта «Нормы годности программных средств подготовки персонала энергетики» [13] относительно адекватности моделирования технологического оборудования и процессов объекту-прототипу и, особенно, радикально-ультимативный вывод из письма, вызвали у адресатов-инженеров электростанции ряд вопросов, с которыми они и решили обратиться к независимым экспертам.

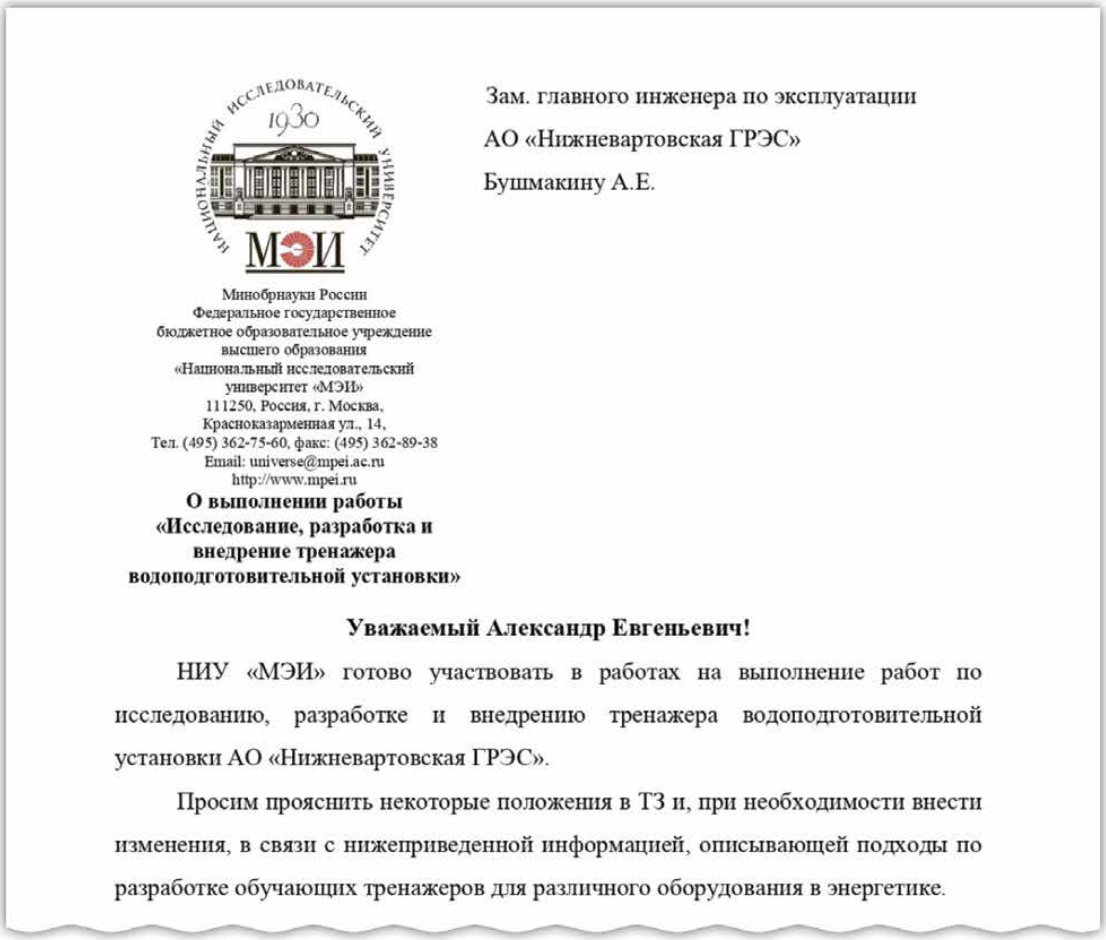
Вывод из письма преподавателей МЭИ был действительно сверхамбициозен и предельно краток:

«Можно сделать вывод о том, что «адекватное реальности» моделирование оборудования химического цеха *просто невозможно*. Таким образом, подход, используемый в тренажерах тепломеханического оборудования *не переносим* на тренажеры химического цеха» (орфография и пунктуация сохранены).

«Независимыми экспертами», волею случая, оказались авторы данной статьи, много лет проработавшие в электроэнергетике, но и они были, тем не менее, также несколько озадачены следующими обстоятельствами: первое — *фактом признания невозможности «адекватного реальности» моделирования оборудования цеха химводоподготовки.* И второе: почему *методы расчета, например, гидравлики оборудования котлотурбинного цеха не подходят для расчета гидравлики оборудования цеха водоочистки*? По мнению экспертов, да и, вероятно, всех работников отрасли, насос, перекачивающий воду из одного бака в другой, может быть, очевидно, как рассчитан в соответствии с едиными отраслевыми нормативными документами расчета гидравлики, так и установлен в соответствии с проектом (вопреки мнению некоторых преподавателей МЭИ) в любом цехе электрической станции.

Столь «революционные» воззрения «ученых мужей» (очевидно, и женщин[6] кафедры «*Теоретических основ* теплотехники» несомненно нужно было бы, в обозримом будущем, более детально рассмотреть на каком

[6] Письмо подписано заведующим кафедрой «Теоретических основ теплотехники» к.т.н., доц. Орловым К. А., исполнитель Кондакова Г. Ю.



Зам. главного инженера по эксплуатации
АО «Нижневартовская ГРЭС»
Бушмакину А.Е.

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва,
Красноказарменная ул., 14,
Тел. (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38
Email: universe@mpei.ac.ru
http://www.mpei.ru

О выполнении работы «Исследование, разработка и внедрение тренажера водоподготовительной установки»

Уважаемый Александр Евгеньевич!

НИУ «МЭИ» готово участвовать в работах на выполнение работ по исследованию, разработке и внедрению тренажера водоподготовительной установки АО «Нижневартовская ГРЭС».

Просим прояснить некоторые положения в ТЗ и, при необходимости внести изменения, в связи с нижеприведенной информацией, описывающей подходы по разработке обучающих тренажеров для различного оборудования в энергетике.

Можно сделать вывод о том, что «адекватное реальности» моделирование оборудование химического цеха просто невозможно. Таким образом, подход, используемый в тренажерах ТМО не переносим на тренажеры химического цеха.

В связи с вышеперечисленным подходом на бывшей кафедре Технологии воды и топлива (сейчас каф. ТОТ) НИУ «МЭИ» совместно с ООО «Триеру» с 1987 года создано более 200 тренажеров для различных ТЭС по всей России (в том числе и филиалов ИнтерРАО). При создании тренажеров используется моделирование объектов управления тренажеров персонала химического цеха на основе базы знаний объекта управления в соответствии с Нормами годности программных средств подготовки персонала электроэнергетики. Также ООО «Триеру» является единственным в России разработчиком тренажера диспетчера тепловых сетей. Тренажеры успешно используются в течение многих лет, как при подготовке персонала, так при проведении экзаменов и соревнований оперативного персонала ТЭС.

Разработанные тренажеры для филиалов АО «Интер РАО - Электрогенерация».

	Предочистка	Обессоливание	Подпитка теплосети	Нейтр-ция	БОУ	Реагентное хозяйство	Замазуч. сточ. воды	ВХР
Гусиноозёрская ГРЭС	√	√	√	√		√		√
Ириклинская ГРЭС	√	√			√			√
Костромская ГРЭС	√	√	√	√	√	√		
Печорская ГРЭС	√	√	√	√		√		√
Сочинская ТЭС	√	√		√	√		√	√
Харанорская ГРЭС	√	√				√		√
Черепетская ГРЭС	√	√			√	√		√
Южноуральская ГРЭС	√	√	√		√	√		√

Зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
к.т.н., доц. Орлов К.А.

Исп. Кондакова Г.Ю.
тел. 8(915)243-53-57
E-mail: galina@twt.mpei.ac.ru

либо из академических Ученых советов, например, РАН для дальнейшего анализа и принятия соответствующего решения.

Однако, не будем делать преждевременных «выводов из выводов», не говоря уже и об «оргвыводах», а рассмотрим коротко содержание вышеупомянутого удивительного письма.

Авторы письма выражают готовность участвовать «*в работах на выполнение работ* (?) по исследованию, разработке и внедрению тренажера водоподготовительной установки «Нижневартовской ГРЭС» и просят «*прояснить (?)* некоторые положения в ТЗ и при необходимости *внести изменения (?)*, в связи с нижеперечисленной информацией, описывающей подходы по разработке обучающих тренажеров, *для различного оборудования в энергетике*».

Таким образом, авторы письма, с завидной легкостью, переходят от конкретных «исследований, разработки и внедрения тренажера водоподготовительной установки Нижневартовской ГРЭС» к обобщенным и бездоказательным, по нашему мнению, описаниям и корректировкам «подходов по разработкам тренажеров для *различного оборудования в энергетике* (?)»

Далее авторы письма предпринимают попытку собственной классификации процессов в оборудовании электроэнергетики с точки зрения *необходимости (возможности, смысла) применения «фактора времени»* в тренажерах для обучения оперативного персонала, а именно:

1. Тренажеры электрических сетей: «Процессы в электрических сетях распространяются очень быстро — со скоростью света. В связи с этим *фактором времени* в обучающихся тренажерах для персонала электрических сетей *можно пренебречь (?)* — об-

учаемый — человек не сумеет среагировать с такой же скоростью. Поэтому *основной упор* (?) в таких тренажерах делается на умение *правильно подбирать конфигурацию сети* и осуществлять переключения в правильном порядке».

2. Тренажеры тепломеханического оборудования (ТМО): «Скорость распространения сигналов равна скорости звука и в принципе требует время реакции в десятки секунд. Этого достаточно для принятия экстренных мер оператором. Поэтому *в тренажерах ТМО фактор времени очень важен — он служит для обучения персонала экстренно реагировать на возможные аварийные ситуации*».

3. Тренажеры тепловых сетей: «В *тренажерах тепловых сетей от НИУ «МЭИ» (?)* существует возможность «*скачков во времени*» (?), когда математическая модель отключается (не рассчитывается), а отдельные длительные процессы (например, по заполнению участка тепломагистрали) *имитируются (?)*. Это требует *отдельного программирования* (?) в каждом конкретном случае. Таким образом, *фактор времени в таких тренажерах находится на границе применимости* — для части действий в тренажере *время может соотноситься с реальным, а для другой части — оно зачастую бессмысленно*».

4. Тренажеры оборудования химического цеха: «В настоящий момент существует возможность расчета только стационарного режима в обозримое время для оборудования химического цеха (очевидно — *задача* — ред.) решена только для основных минеральных примесей в воде. И то, это требует значительных временных затрат, *абсолютно не позволяющих использование ПО в учебных целях*. А уж задача моделирования поведения всех примесей в воде и полностью не решена — так при проектировании ВПУ для предочистки всегда должны проводиться пилотные испытания — никакие расчеты, анализы примесей и т. д. не могут даже приблизительно предсказать работу оборудования.

На проблему сложности расчетов работы оборудования химического цеха накладывается большая продолжительность физико-химических процессов, когда влияние различных факторов будет обнаружено, например:

- время выхода на режим осветлителя типа ВТИ составляет несколько десятков часов;
- время фильтроцикла ионнообменного фильтра может составлять несколько дней;
- образование отложений может идти в течение нескольких месяцев;
- процессы коррозии развиваются в течение нескольких лет.

Это — *якобы причины*, а следствия таковы:

«Можно сделать вывод о том, что «адекватное реальности» моделирование оборудования химического цеха *просто невозможно*. Таким образом, подход, используемый в тренажерах ТМО *не переносим* на тренажеры химического цеха»

И еще один очень интересный и удивительный «вывод»:

«В настоящее время существует возможность расчета *только стационарного режима*, в обозримое время для оборудования химического цеха задача решена только *для основных примесей в воде.* И то это требует значительных временных затрат, *абсолютно не позволяющих использование ПО в учебных целях.*»

Таким образом, уважаемые преподаватели МЭИ делают общий фундаментальный вывод, что *фактор времени действует только в тепломеханическом оборудовании энергетической отрасли.* Т. е., право пользования «временны́ми характеристиками» преподавателями МЭИ разрешено (имеет смысл) только для *тепломеханической генерирующей части электроэнергетики*, для остальных участников процесса тепло и электроснабжения «фактор времени» — *смысла не имеет, что несколько расходится* с общепризнанной парадигмой по данному вопросу.

Рассмотрим далее достаточно важные, по нашему мнению, методологические вопросы, касающиеся следующих рассматриваемых нами тем (по мере их поступления от кафедры «ТОТ»), а именно: «фактор времени и постулат инвариантности», «общность технологий водоочистки», «основное назначение тренажера», «смешанное дискретно-непрерывное моделирование».

1. Фактор времени и постулат инвариантности (в понятиях современной физики).

Тем не менее, начнем с Аристотеля (4 век до н. э.): «Время есть число движения» — это как бы эпиграф к нашему подразделу.

Далее приведем соображения о факторе времени выдающегося русского ученого Александра Александровича Фридмана (1888 – 1925) — специалиста по теоретической физике [20], в своих трудах значительно расширившего теорию относительности Эйнштейна.

«Помимо геометрического пространства мы вводим *физическое трехмерное пространство* и *физическое время,*— причем, вводим их ***не в отдельности, когда их физическое существование немыслимо, а в их совокупности, составляющей физический мир***. Физический мир состоит *из материи* (толкуя слово это в самом широком смысле), ***к материи принадлежат и тяготеющие массы, и электромагнитные процессы***. Напомню, что именно ***мир состоит из материи, потому что материя в пространстве и без времени физически немыслима.*** Мы уславливаемся об особой интерпретации геометрического мира (пространства четырех измерений) при помощи мира физического. Каждой вещи геометрического мира сопоставляется интерпретирующий ее объект (материальный) мира физического. Условившись в определенной интерпретации, будем называть четырехмерное пространство, интерпретацией коего служит физический мир, просто *геометрическим миром*. В физическом мире мы выделяем группу свойств, которые называем *физическими законами*. Для этих физических законов мы устанавливаем *постулат инвариантности*, заключающийся в том, что ***физические законы инвариантны, относительно перехода от одного способа арифметизации[7] к другому, и отвечают, следовательно,* собственным свойствам, *мира геометрического.***

С известной точки зрения, ***постулат инвариантности мог бы служить определением физических законов.***

Три координаты физического мира выделяем в особую груп-

[7] Арифметизация — математическая интерпретация, моделирование.

пу *пространственных координат,* а четвертую координату называем *временной.* Для метрики геометрического мира устанавливаем особый *постулат вещественности,* сущность которого сводится к определенным свойствам вещественности и мнимости, которыми должен обладать интервал двух точек одновременных и двух точек, имеющих одинаковые пространственные координаты. Постулат вещественности налагает ограничительные условия не только на метрику мира, но и на произвол его арифметизации, ибо ***при всякой арифметизации, и силу постулата вещественности, должна иметь место возможность выделения временно́й координаты.*** Постулат вещественности играет весьма большую роль в так называемом *принципе причинности*; согласно этому постулату, два *разновременных явления* не могут быть, с помощью арифметизации, подчиняющейся постулату вещественности, приведены к одновременности. Таким образом, ***причина и следствие при одном способе арифметизации мира остаются причиной и следствием также при другом способе введения мировых координат.***

Изменение пространственных координат с течением времени называем *движением» (смотри эпиграф подраздела).*

Итак, основные выводы:

«Напомню, ***что именно мир состоит из материи, потому что материя в пространстве и без времени физически немыслима****».*

«Для физических законов мы устанавливаем, ***что постулат инвариантности, заключающийся в том, что физические законы инвариантны, относительно перехода от одного способа арифметизации к другому, и отвечают, следовательно,*** **собственным свойствам,** ***мира геометрического».***

2. <u>Общность технологий водоочистки</u> *(взгляд на общность процессов — или — на «постулат инвариантности» д.т.н., проф А. Г. Первова. [21].*

«Процессы, используемые при очистке воды (коагулирование примесей, осаждение, фильтрование, процессы окисления сорбции, ионного обмена и мембранного переноса) — те же процессы, которые используются в различных химических технологиях. Поэтому при разработке технологий очистки воды и расчете аппаратов и сооружений используются методы, основанные на тех же закономерностях, что и в химических технологиях.

По мере развития курсов «Водоснабжение» и «Технологии очистки воды» используются новые обозначения, упрощенные методы расчета, основанные на эмпирических уравнениях, мало уделяется места описанию теории процесса. ***Часто даже специалистами <u>путаются понятия (!)</u> «процесс», «метод» и «технология»***.

Несмотря на огромное разнообразие продуктов применения химических технологий, ***получение их связано с поведением однотипных процессов — таких как перемешивание, нагрев, охлаждение, осаждение, химическое взаимодействие и др.*** Эти процессы характеризуются ***общими законами гидравлики, теплопередачи, физической химии, химической кинетики и др.***

Сходством характеризуются и аппараты (сооружения) применяемые в различных отраслях химической технологии, в том числе в технологиях обработки воды. Наука о процессах и аппаратах химической технологии ***<u>изучает общность различных процессов и аппаратов и обобщает методы их расчетов</u>»***.

3. <u>Основное назначение тренажера</u> (мнение зарубежных и российских ученых о моделировании динамики и возможности упрощения теории систем в тренажеростроении).

И в самом деле, «что самое главное в тренажере»?

По мнению международного (и отечественного) экспертного сообщества — *основное назначение тренажера* ***любого оборудования*** *состоит в отображении информации, характеризующей* ***реакцию системы на управляющие воздействия***.

Обычно отклик любых систем на входное управляющее воздействие или какое-либо внешнее возмущение является функцией многих факторов, достоверное знание о влиянии которых *крайне важно* для тех, кто изучает принципы построения данной системы, *учится управлению* и *использованию этой системы для выполнения целевой задачи*. Хранимая в тренажере информация о системе и внешних факторах ***должна быть организована и обрабатываться таким образом***, чтобы воспроизводился ***динамический отклик реальной системы*** точно так же, как он воспринимается и используется оператором в процессе управления любым реальным объектом-прототипом [22].

Исходя из изложенного, математическая модель энергообъекта должна состоять из дифференциальных уравнений, основанных на рассмотрении физической природы процессов, т. е. стандартных балансовых уравнений, а количественные зависимости и направленность процессов должны определяться законами термодинамики, гидродинамики, аэродинамики и т. д. Зависимости между параметрами связей должны однозначно и единообразно описываться уравнениями энергетического, расходного и гидравлического балансов в элементах оборудования, а также уравнениями изменения энтальпии каждого из видов теплоносителя [23].

Так, например, теплогидравлические системы энергообъекта могут быть описаны тремя законами сохранения: сохранения массы ***m,*** энергии ***e*** и импульса ***mv.*** В общем виде они описываются трехмерными дифференциальными уравнениями в частных производных. Однако это не является эффективным подходом для решения задачи моделирования энергообъекта для тренажера. Вместо этого рассматриваются обыкновенные дифференциальные уравнения для дискретного контрольного объема, где свойства изменяются только по направлению потока. Такой подход дает три дифференциальных уравнения баланса для ***m, e*** и ***mv***:

$$\frac{dm}{dt} = w_{вх} - w_{вых}$$

$$\frac{de}{dt} = w_{вх} h_{вых} - w_{вых} h_{вых} - W_s + Q,$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = w_{вх} v_{вх} - w_{вых} v_{вых} + \sum F$$

где ***w*** — расход (кг/с), ***h*** — удельная энтальпия

(Дж/кг), ***W*** — работа (Вт), ***Q*** — тепловой поток (Дж/с), ***v*** — скорость потока (м/с), ***F*** — сила (Н).

Динамика импульса, которая определяет потоки в системе, т. е. гидравлику, является обычно величиной на порядок более быстрой по сравнению с другими динамическими характеристиками среды на энергообъектах, см. рисунок 1.

Таким образом, мы хотим здесь показать, что более быстрые динамические процессы имеют меньшую важность, *но не отсутствие* в модели, построенной для анализа **ее человеком**, через систему **контроля и управления.**

Динамические свойства объектов управления должны моделироваться в пределах возможностей восприятия человеком изменений инерционных свойств. Это связано с тем, что человек-оператор в процессе восприятия и переработки больших потоков информации не различает скорость изменения выходных сигналов без фиксации начала этого изменения. Здесь уместно привести высказывание Н. Винера [24] что «…событие, при котором система, начавшая свой процесс с неизвестного состояния, закачивает его в строго определенном статическом диапазоне, бывает настолько редко, что мы можем считать это чудом. Очевидно, мы не можем основывать наши экспериментальные методы на ожидании и счете чудес».

Допустимость достаточно больших отклонений временных характеристик при моделировании технологических процессов с точки зрения психофизиологии оператора можно объяснить следующим. По современным представлениям, у человека нет специального временного анализатора, равнозначного по физиологическому смыслу зрительному или слуховому [25]. Вместе с тем, каждый анализатор, наряду со своей непосредственной функцией, может при определенных условиях выполнять еще функцию отсчета времени. Зрительный анализатор служит преимущественно органом восприятия пространства. Однако ему принадлежит конкретная роль и в восприятии времени. Оно воспринимается глазом хуже, чем пространство. Это подтверждается тем, что ошибка в восприятии пространства в процессе зрительной чувствительности значительно меньше ошибки в оценке длительности.

Правомерность требования к точности статических и достаточно больших отклонений при моделировании динамических характеристик энергоблоков подтверждается как российскими исследователями [26 – 28] так и зарубежными материалами [28 – 30].

Рисунок 1. Частотные диапазоны динамических характеристик процессов в энергообъектах

Figure 1. Frequency ranges of process dynamic properties at power facilities

Так, стандарт на тренажеры энергоблоков ANS 3.5 (США) на основании опыта эксплуатации тренажеров ограничивает только величину максимальной статической погрешности, для динамической точности эти требования носят лишь качественный характер [15].

Классическим примером упрощения модели является уравнение Клапейрона-Менделеева для идеального газа. В этой модели давление ***P*** является выходной характеристикой системы — газа, которая в соответствии с **законом функционирования** описывается уравнением:

$$P = n\frac{RT}{V},$$

где ***T*** — абсолютная температура, ***V*** — объем, ***R*** — постоянная, ***n*** — количество молей.

В этой формуле ***n*** выступает как внутренний параметр системы, а вектор микросостояния системы, составленный из координат и компонент скоростей молекул газа, вообще не фигурирует.

В связи с этим основоположник современной теории информации и кибернетики американский ученый У. Эшби пишет, что «…теория систем должна строиться на методах упрощения (simplification) и, по сути дела, представлять собой **науку упрощения**».

Более того, пренебрежение принципами системного анализа о необходимости и достаточности приводит к тому, что разработчик модели столь многомерной и сложной иерархической системы, какой является современная электрическая станция, «…вынужден нагромождать одно логическое условие на другое, поправку на поправку, пока все это латаное сооружение не рухнет под собственной тяжестью» (Н. Винер [24]).

4. <u>Смешанное дискретно-непрерывное моделирование</u> (к методам организации сценариев тренировок при дискретизации моделирования).

Содержание предыдущего подраздела касалось ***непрерывных процессов.***

С имитацией ***дискретных событий*** мы встречаемся в тех случаях, когда зависимые системные переменные изменяются на фиксированные значения в заданные моменты модельного времени, называемые «временами (наступления) событий». Иными словами, система человек — машина изменяет свое состояние только при наступлении «события» (обычно это начало или завершение некоторой задачи оператора в рамках имитационной модели его деятельности). Такой тип моделирования применяется тогда, <u>когда непрерывно изменяющиеся элементы системы ***не представляют интереса для разработчика модели***</u>. Изменение показания модельных «часов» (переменной, представляющей время при моделировании) в дискретном моделировании обычно производится <u>при совершении какого-либо события</u> (например, «проскок» солей в фильтре ХВО, окон-

чание продувки (промывки) пароперегревателя при пуске котла, синхронизация генератора и т. д.).

В смешанных дискретно-непрерывных моделях переменные могут изменяться как дискретно, так и непрерывно. Поведение системы имитируется посредством пересчета значений непрерывных переменных на малых дискретных интервалах времени и повторяющихся величин переменных, которые изменяются только при наступлении событий.

При смешанном моделировании рассматриваются два типа событий: событие-время и событие-состояние. К первому типу относятся те события, которые обычно используются в дискретных моделях (например, задачи оператора). События второго типа заранее не планируются и происходят тогда, когда некоторая системная переменная достигает конкретного состояния (заданного значения или определенного уровня, например, сигнализации, защиты, блокировки).

Таким образом, ***смешанное дискретно-непрерывное*** моделирование применяется, практически, ***для любых систем энергетического оборудования.***

Неоценимый вклад неадекватной информативности в научные исследования энергетики. Интерпретаторы относительной информативности.

Итак, продолжаем наш виртуальный экскурс по кафедрам Московского энергетического института. Так, в статье журнала «Вестник МЭИ» [31] читаем:

«На протяжении нескольких лет кафедра АСУТП МЭИ проводит ***исследования на тренажерах*** теплофикационного энергоблока Т-250 и ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ. Результаты испытаний, *полученные на тренажерах* в условиях отсутствия возможности проведения натурных экспериментов, вносят свой неоценимый вклад в проведении научных исследований.

Кафедра ставит перед собой ряд задач, решение которых возможно только с применением тренажеров:

– снятие кривых разгона технологических параметров, наладка регуляторов, получение переходных процессов контуров регулирования;
– проведение испытаний разработанных новых систем автоматического регулирования и управления;
– исследование возможностей и целесообразности участия энергоблоков типа Т-250 и ПГУ-450 в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулированиях частоты электроэнергии и мощности энергосистем в условиях современного рынка, разработка и оптимизация алгоритмов реализации указанных режимов;
– создание и исследование способов расширения регулировочного диапазона, оптимизация режимов работы исследуемых энергоблоков;
– изучение влияния температуры наружного воздуха на энергетические показатели и маневренные характеристики энергоблоков;
– расчет технико-экономических показателей работы оборудования и энергоблока в целом;
– анализ влияния изменения начальных и конечных параметров пара на эффективность работы оборудования;
– отработка пуско-остановочных, аварийных режимов и внештатных ситуаций с оценкой безопасности, эффективности и экономичности.

Похожие исследования ведутся сотрудниками ОАО «ВТИ», но их основное направление — изучение прочностных характеристик оборудования в переходных режимах».

Объем исследований, намеченных кафедрой, впечатляет. Как говорил поэт: … «Я планов наших люблю громадьё!»… Но планы зачастую… остаются планами. Впрочем, с другой стороны, это обычный план работ отдела автоматики любого *советского* научно-исследовательского института 70 – 80^{х} годов прошлого века типа ЦНИИКА, ЦКТИ, ВТИ и т. п. …, но в учебном ВУЗе? Ведь, наверное, нужно еще и студентов как-то обучать??

И попутно возникает еще ряд вопросов. Во-первых, в составе оборудования Калининградской ТЭЦ нет энергоблоков Т-250 МВт. Отсюда вопрос — что же Вы исследовали? Во-вторых, исследовательские работы подобного рода проводились (и проводятся) всегда «на натуре», т. е. на специально сконструированных экспериментальных стендах или на реально работающем оборудовании. В-третьих, причем здесь тренажеры? (Слово тренажер происходит от слова train — англ. — тренировать, обучать). Цель создания *этих устройств* и состоит, именно, в обучении людей, хотя бы и студентов, в привитии им навыков и умений управлять тем самым оборудованием, на котором в будущем будут работать эти люди (студенты), которых Вы обучаете, уважаемые преподаватели! Цель, именно, в этом, а вовсе не в проведении исследований для решения, вероятно, весьма нужных и необходимых промышленности, проблем?! А в четвертых, уважаемые господа преподаватели, ваше утверждение, что «… похожие исследования ведутся сотрудниками ОАО ВТИ», Вас, вероятно, не должно касаться. Ведь ВТИ — это по статусу — научно-исследовательский институт, а не высшая (но, все-таки, школа!). И на Вас, совсем-таки, и не «похожа». А в пятых — совсем уж непонятная коллизия. Как это, в знаменитом на весь мир институте, было организовано «*изучение* ***прочностных характеристик*** *энергетического оборудования» именно на тренажерах* да еще, вдобавок, и «в переходных режимах»? Откуда и куда переходят эти режимы? И основное: из какого же места этих несчастных «тренажеров» Вы предлагаете сотрудникам ВТИ вырезать образцы для металлографических анализов при проведении столь высоконаучных исследований?

Однако, вернемся на кафедру АСУТП МЭИ. Оказывается…

«… Кафедра *делает упор* (!) на изучении на тренажере режимов работы оборудования энергоблока ПГУ-450 при частичных нагрузках с учетом современных требований к качеству производимой электроэнергии и мощности в *рыночных условиях* и на улучшении маневренных характеристик оборудования ПГУ и технико-экономических показателей путем поиска способов расширения регулировочного диапазона и оптимизации режимов работы оборудования и систем управления».

Таким образом, судя по направленности режимных задач и требований к качеству производимой энергии и прочим показателям надежности и экономичности, планируется выработать на тренажере рекомендации для реального работающего энергопроизводящего оборудования.

Однако, смеем заметить, тренажер — даже самый адекватный, разработан только лишь для получения навыков и умений у человека-оператора с учетом его физиологических возможностей к восприятию информации о статических и динамических реакциях объекта на управляющие воздействия и, в принципе, не предназначен для проведения на нем каких-либо научно-исследовательских работ, направленных на оптимизацию режимов эксплуатации и разработку реконструктивных мероприятий.

И если, тем не менее, «… кафедра делает упор на изучении на тренажере режимов работы оборудования энергообъектов», не для цели обучения студенческого контингента (за что, в принципе, ей и перечисляют заработную плату), а для достижения каких-либо других, более конкретных «в рыночных условиях» прагматических целей, то хотелось бы «с этого места подробнее» услышать что-либо об этих фактах.

Но авторы статьи непреклонны в своем первомайско-призывном пафосе:

> «… Прогресс развития (?) энергетической отрасли не стоит на месте. Непрерывно обновляются оборудование и технологии, обеспечивающие повышение надежности и экономичности работы энергетических установок. Появление новой техники при сохранении старой базы знаний приводит к неминуемому росту числа аварий, связанных с человеческим фактором. В избежании этого необходима постоянная переподготовка и переквалификация оперативного персонала, при этом очевидна целесообразность применения специальных тренажеров.
>
> Наибольшее распространение получили компьютерные тренажеры, основанные на моделировании технологических процессов в имитируемых объектах, наиболее информативными считаются тренажеры, построенные на базе аналитических моделей объекта».

Анализируя приведенную цитату из начала статьи [31] уважаемых преподавателей МЭИ: «…Прогресс развития энергетической отрасли не стоит на месте», с учетом того, что слово «прогресс» (лат. — progressus) означает — «движение вперед», можно сделать «глубокомысленный» вывод, что российская энергетика движется именно вперед, а не вправо и не влево, и, в то же время, «не стоит на месте». А словосочетание «прогресс развития», очевидно, носит жаргонный характер и обретает смысл только на кафедре АСУТП. Но это только начало, эти погрешности в русском (латинском) языке — беда не большая, МЭИ — ведь не гуманитарный ВУЗ, обойдетесь.

А дальше — больше: авторы рассматриваемой статьи [31] вступают уже в прямое нарушения самого важного документа в российской энергетике — ПТЭ (Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации — [32], а именно утверждают следующее:

> «…Во избежание аварий, связанных с человеческим фактором, необходима постоянная переподготовка и переквалификация оперативного персонала, при этом очевидна необходимость специальных тренажеров».

На эту тему обратимся к «первоисточнику» [32], утвержденному Минэнерго и зарегистрированному в Минюсте РФ:

> «§ 1.3.4. На энергообъектах должна проводиться постоянная работа с персоналом, направленная на обеспечении его готовности к выполнению профессиональных функций и поддержании его квалификации. Объекты для подготовки персонала должны быть оснащены техническими средствами обучения и тренажа».

– И никакой «постоянной переподготовки и переквалификации»…

Представьте себе электростанцию, где постоянно весь персонал занимается этой самой «переквалификацией»! А кто же тогда будет выдавать «на гора» киловатт-часы и гигакалории? — Мрак … и глупость, — вспоминается А. И. Герцен и декабристы: «… страшно далеки они от народа…».

Но далее начинается самое интересное, связанное, очевидно, с прагматикой, «рыночными условиями» и т. п., о которых хотелось бы услышать поподробнее…

Слово авторам статьи:

> «Наибольшее распространение получили компьютерные тренажеры, основанные на моделировании технологических процессов в имитируемых объектах, наиболее информативными считаются тренажеры, построенные на базе аналитических моделей объекта».

Оппоненты: во-первых, «наибольшее распространение получили компьютерные тренажеры, основанные на моделировании технологических процессов в имитируемых объектах» — да, других типов компьютерных тренажеров в мире практически нет, поэтому — почему «наибольшее распространение»?

Во-вторых, «наиболее информативными считаются тренажеры, построенные на базе аналитических моделей. Вопрос — считаются кем? (Естественно, кроме некоторых сотрудников кафедры).

Мнение № 1 Российской Академии Наук (член-корреспондент РАН, д.т.н., проф. Попырин Л. С. [7]):

> «Применительно к энергетике противоречие семантического содержания аналитической модели и эмпирическими фактами выглядит следующим образом. Современные энергообъекты, рассматриваемые как объект моделирования, в большинстве своем нестационарны, нелинейны, многомерны, со многими внутренними обратными связями, невелика или

отсутствует вовсе априорная информация о форме и степени взаимосвязи между переменными в динамике в реальных условиях эксплуатации. Это значительно усложняет получение их адекватного математического описания. Использование разработчиком модели для этой цели априорной информации, которая имеется, например, в распоряжении конструктора (физические, химические, механические закономерности, нормативные документы) в большинстве случаев вызывает затруднения. Это определяется следующим.

Закономерности (уравнения кинетики, тепломассообмена, материального баланса и пр.) при эксплуатации энергообъекта значительно искажаются, т. е. изменяется форма и степень связи между переменными из-за изменения масштабов процесса, влияния помех, шумов различного рода, отклонения от идеальных условий.

Кроме того, математическая модель должна включать одновременное влияние на выходную переменную всех входных параметров: однако это уравнение не может быть получено из уравнений зависимостей выходной переменной от каждого из входных параметров, тем более, что для реальных тепловых и электрических процессов все переменные по своей природе стохастические».

Мнение № 2 Российской Академии Наук (д.т.н., проф Дозорцев В. М.) [11]:

«Действительно, исследования динамического поведения нелинейной системы дифференциальных и конечных уравнений размерностью несколько тысяч переменных (включая огромное число «внутренних» (фазовых) переменных тренажерной модели) при произвольно изменяющихся входных воздействиях, на первый взгляд, представляются нереальными… Отсюда специфика постановки и решения задачи обеспечения адекватности тренажерной модели: во-первых, адекватность должна быть гарантирована на достаточно полном множестве статических и динамических режимов технологических объектов; во-вторых, огромная размерность и многосвязность модели делают неизбежной рекурсивность процедуры настройки тренажерной модели с возвратами на стадию собственно моделирования для уточнения структуры модели; в-третьих, основным источником информации о поведении моделируемого технологического процесса являются оценки экспертов-технологов, опытных производственников и др.; наконец, сами цели компьютерного тренинга определяют акцент на обеспечение адекватности при «произвольном» манипулировании моделью»

Внимательно прислушиваясь к мнению ведущих современных российских ученых, выскажем некоторые соображения по данному вопросу.

Во-первых, дадим слово представителям МЭИ:

«В основу современных компьютерных тренажеров заложены математические модели явлений, происходящих в имитируемых сложных объектах.

Математическая модель представляемого объекта описывается системами математических уравнений (дифференциальными, интегральными, алгебраическими), логических выражений и неравенств. Так образуется связь между входными и выходными параметрами объекта.

Математические модели могут быть получены эмпирическими, полуэмпирическими или аналитическими путями. В зависимости от способа получения модели существуют различные подходы к построению тренажера, что влияет на область его применения.

Тренажеры, математическая модель которых представлена эмпирически, т. е. построена на экспериментальных данных при идентификации объекта имеют ряд существенных недостатков».

Далее идет перечисление этих недостатков:

«– внутренняя структура объекта со всеми протекающими внутри физико-химическими процессами остается неизвестной, а потому модель менее информативна;
– использование интерполяции промежуточных значений и экстраполяции выходящих за границы полученных экспериментальных данных уменьшают достоверность процессов;
– точность снижена из-за представления нелинейного объекта линейным, а также получения опытных данных с заведомой погрешностью;
– получение исходных данных возможно только при проведении активного эксперимента на действующем оборудовании, следствием чего может послужить возникновение нештатной аварийной ситуации;
– построение модели в отсутствие реального объекта невозможно».

И, тем не менее,

«достоинством таких тренажеров можно считать высокую точность в опытных точках при проведении большого числа экспериментов».

Естественный вопрос: каким образом модель приобретает высокую точность при одновременном уменьшении информативности?

А далее идет потрясающий посыл:

«Диаметральной противоположностью эмпирической модели является аналитическая модель. Закладываемая в тренажер, она основывается на уравнениях законов сохранения вещества, энергии, количества движения и т. п. Коэффициенты, включенные в эти уравнения, рассчитываются, исхода из конструктивных и проектных данных моделируемого объекта».

Преимущества такого подхода, по мнению авторов статьи, следующие:

«– он более информативен в силу прозрачности внутренней структуры объекта;
– моделируемый объект описывается системой уравнений, отражающей его поведение во всех режимах эксплуатации;
– выделение граничных условий позволяет учитывать и влиять на внешние возмущения объекта;
– построение модели возможно в отсутствие реального объекта».

С целью повышения доказательной базы полезности «диаметрально-противоположного» подхода к моделированию авторами статьи сооружается некая графическая конструкция, приведенная на рисунке 2.

Рисунок 2. Влияние информативности и адекватности тренажера в зависимости от используемой математической модели
Figure 2. The impact of information value and adequacy of a simulator depending on the used mathematical model

Рассмотрение этого изображения, в том числе двух разнонаправленных (диаметрально-противоположных) понятий: *адекватности*[8] и *информативности*[9] наводят читателя на мысль о прагматичности и явной нелогичности авторов рисунка на границах рассматриваемой области: не может же быть аналитическая модель при полной информативности полностью неадекватной.

Однако, слово авторам:

«Основная причина, ограничивающая право на использование компьютерного тренажера в качестве инструмента для исследований, — адекватность его выводимой информации, т. е. соответствие полученной информации от тренажера его реальному объекту…

При проведении модельных исследований важно, чтобы модель содержала как можно больше информации, сопоставимой с реальным объектом.

Поэтому в рамках исследуемой задачи можно принять, что если результаты экспериментов, полученных на тренажере, ложатся в разброс натурных испытаний с некоторой заданной вероятностью, то такая модель адекватна реальному объекту. Доверительная вероятность устанавливает точность поведения модели, ограничивая выход результатов за границы доверительного коридора. Такой метод оценки адекватности достаточно прост и пригоден как для статических характеристик, так и для динамических.

На рисунке 3 приведен пример проверки статической характеристики объекта: опытные показатели максимальной электрической мощности ПГУ-450 от температуры наружного воздуха, полученные на тренажере (сплошная линия), сравниваются с аналогичными проектными. На основе данных тренажера построен доверительный коридор при доверительной вероятности $P_{ДОВ}$ = 0,95 (наружные сплошные линии). Имеющиеся проектные данные показаны пунктирной линией; кривая по проектным данным располагается внутри коридора, что подтверждает положение об адекватности тренажера».

Что, кстати, прямо противоречит выводам, сделанным из рассмотрения рисунка 2, из которого видно, что аналитическая модель при максимальной информа-

[8] *Адекватный* — [<лат. adaequatus приравненный>] Вполне соответствующий, совпадающий, тождественный. Адекватные понятия (аналогичный, аутентичный, идентичный)

[9] Информативный — содержащий значительное количество информации, наполненный информацией Информация — [<лат. informatio осведомленность, просвещение>] 1. Сообщение, осведомляющее о положении дел, о состоянии чего-л. Средство массовой информации — пресса, радио, телевидение. 2. Сведения об окружающем мире и протекающих в нем процессах, воспринимаемые человеком или специальными устройствами и являющиеся объектом хранения, обработки и передачи. 3.Синонимы к слову информативность: избирательность, интерактивность, коммуникативность, адекватность.

Источник: РАН, Институт русского языка им. В. В. Виноградова. Красин Л. Л. Толковый словарь иноязычных слов. Москва. Эскпо, 2010 г.

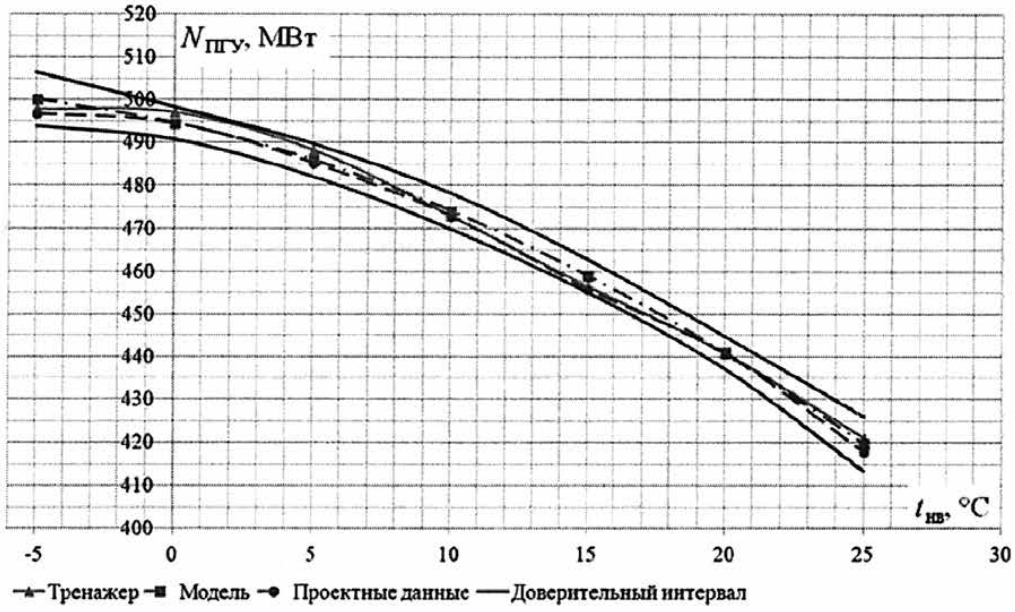


Рисунок 3. Оценка адекватности тренажера для статического процесса
Figure 3. Evaluating the simulator adequacy for a static process

тивности имеет близкую к нулю адекватность.

Таким образом, представители МЭИ пытаются здесь доказать, что аналитическая модель энергообъекта имеет противоречащие друг другу свойства информативности, являясь *адекватной* и *неадекватной одновременно*. Подобные утверждения не совместимы с логическим законом противоречия, и их вообще невозможно доказать.

Но за счет чего создается все-таки видимость убедительности данного рассуждения?

Она связана с подменой утверждения «быть информативным не значит быть адекватным» утверждением «быть информативным значит не быть адекватным», но это совершенно разные утверждения. Верно, что информативность не обязательно является адекватной, но неверно то, что информативность обязательно неадекватна. Подмена происходит почти незаметно, когда утверждение происходит в сокращенной форме. Но стоит развернуть сокращение «информативность — это не адекватность» (в семантическом — вербальном или в графическом виде), как эта подмена становится явной.

Таким образом, мы имеем здесь дело с типичной формой *постановки проблем* в древней Греции, а именно, с *софизмом*. Но софизмы использовались и теперь продолжают использоваться также для другой цели — для тонкого, завуалированного обмана. В этом случае они выступают в роли особого приема интеллектуального мошенничества, попытки выдать ложь за истину и тем самым ввести в заблуждение.

Софизмы являются логически неправильными заключениями, выдаваемыми за правильные и доказательные. Софизмы могут основываться на *логических ошибках*, таких, как умышленная подмена тезиса доказательства, несоблюдение правил логического вывода, принятие ложных посылок за истинные и т. п.

Так, первый *тезис доказательства истинности,* т. е. адекватности модельных исследований авторов статьи следующий:

> «В рамках исследуемой задачи можно принять, что, если результаты экспериментов, *полученных на тренажерах*, ложатся в разброс *натурных испытаний*, с некоторой заданной вероятностью, то такая модель адекватна *реальному объекту*».

Однако на рисунке 3 и комментариям к нему в доказательство адекватности модельных исследований авторов приводится уже второй, причем совершенно другой — «подмененный» *тезис доказательства*, а именно:

> *«опытные показатели* максимальной электрической мощности ПГУ-450 от температуры наружного воздуха, *полученные на тренажере* (сплошная линия), сравниваются с *аналогичными проектными»*.

Таким образом, вместо обещанных *натурных испытаний* (т. е. испытаний реального объекта-прототипа) и сравнения его с результатами испытаний тренажера, мы получили очень похожие для неопытного читателя *«натурные испытания»* или *«опытные показатели»*, но не реального объекта, а тренажера и сравниваем его опять-таки с «аналогичными проектными показателями», показателями, по которым рассчитана модель тренажера.

Т. е. на рисунке 3 приведены и фактически сравниваются *три варианта расчета по одной и той же методике показателей* моделируемого энергообъекта: *1. — тренажера* — показатели снятые с интерфейса собственно тренажера (результаты работы ПО); 2 — *модели* — данные расчетов разработчика тренажера[10]; и 3. — *проектные данные* — данные расчетов завода-изготовителя энергобъекта, которые положены в основу расчетов разработчика тренажера. Т. е. круг замкнулся — рассматриваются три варианта одного и того же расчета *по одним и тем же формулам:* тренажер — модель — проектные данные. И, вполне естественно, что результаты этих расчетов ложатся без всякого разброса на одну и ту же кривую.

А где же «натурные испытания» на реальном оборудовании, в разброс значений которых должны быть положены результаты экспериментов? В этом и заключается «умышленная подмена тезиса доказательства» и «принятие ложных посылок за истинные». И о какой адекватности реальному объекту в данном случае может идти речь?

И, тем не менее, авторами из МЭИ делается «скромный», но достаточно амбициозный вывод: «Такой метод оценки адекватности *достаточно прост и пригоден* как для статических, так и динамических характеристик».

Наш вывод несколько отличен от приведенного: «Такой метод оценки адекватности достаточно прост, но, *к сожалению, не пригоден* для оценки степени адекватности как для статических, так и динамических характеристик».

Конечно, мы далеки от мысли, что наши уважаемые коллеги из МЭИ сознательно применяют «приемы интеллектуального мошенничества». Впрочем, они сами открыто признаются в том, что «результаты испытаний, *полученные на тренажерах в условиях отсутствия возможности проведения натурных экспериментов*, вносят свой неоценимый вклад в проведении научных исследований». Наличие «отсутствия возможности и т. д.» связаны, очевидно, с прагматичностью устремлений исследователей «в рыночных условиях», а также незнакомством с определением понятия «информативность», когда «полностью знакомый и по́нятый текст считается безынформативным»[11]. Наша цель состоит в том, чтобы определить истинное положение вещей в решении данной проблемы, а уж оценить весомость причин *«отсутствия возможности»* проведения натурных экспериментов и оценить *«неоценимый вклад в науку»* этих исследований мы хотели бы предоставить как заказчику указанной работы, так и нашим читателям.

[10] ООО «Тренажеры для электростанций» Рубашкин В. А.

[11] Дмитревская И. В. Текст как система: понимание, сложность, информативность. — Иваново: Изд-во Ивановского гос. ун-та, 1985. — С. 48. — 88 с.

Тем не менее, существуют ли официальные методы борьбы с подобными попытками умышленной подмены тезисов доказательства адекватности программной продукции?

Существуют. Так согласно действующему стандарту ГОСТ Р ИСО /МЭК 9126-93 *(Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению) раздел 5.3.2.1. — «Выбор метрик — показателей качества»:*

«Метрики могут по-разному зависеть от окружения и фаз процесса разработки, в которых они используются. Метрики, используемые в процессе разработки, должны быть соотнесены с соответствующими метриками пользователя, потому что метрики из представления пользователя являются решающими».

«Метриками пользователя» во всем мире (кстати, российский стандарт является аутентичным текстом международного стандарта ИСО/МЭК 9126-91) являются измеряемые параметры объекта пользователя: температура, давление, расход, сила тока, напряжение, мощность.

Причем «метрики пользователя», что существенно, *«измеренные непосредственно на функционирующем объекте, нельзя заменять метриками, полученными в результате заводского (конструкторского) расчета»*.

В действующем «Руководящем документе» концерна «Росэнергоатом» «Требования к техническим средствам обучения для подготовки персонала атомной станции» — РД ЭО 0278-01, раздел 4.6. «Требования к точности и достоверности моделирования» однозначно регламентирует *соответствие параметров* тренажера *параметрам энергоблока-прототипа* с допустимым отклонением 1,0% для температур и давлений и 2,0% для **мощностей** и **расходов,** входящих в систему защит, и 10% для остальных параметров.

Для оценки адекватности переходных процессов применяется так называемый критерий успешности, т. е. не количественный, а качественных подход.

В оборонных и аэрокосмических отраслях промышленности РФ в регламенты приемочных испытаний тренажерных комплексов вносятся только процедуры режимных сравнительных испытаний с оценкой качества путем количественной оценки адекватности *параметров* тренажера объекту-прототипу.

В США и странах Евросоюза тренажерные комплексы атомных и традиционных электростанций оцениваются по регламентированной количественной сравнительной оценке выходных параметров модели тренажера и объекта-прототипа для статических характеристик, для динамических характеристик точность носит лишь качественный характер (Стандарты — ANSI-3.5, ISASP 77.20).

Таким образом, мнение мирового экспертного сообщества едино: *адекватность — единственный показатель качества разработки моделей для тренажеров электроэнергетики* в связи с тем, что только адекватностью модели определяется достоверность реакции тренажера на управляющие воздействия, и определяться адекватность должна по результатам *натурных испытаний на объекте прототипе*. Информативность *не может являться эталонным показателем качества моделей* в связи с тем, что по определению она является *прагматичной*, а значит и *относительной*, и потому что уже на стадии анализа она входит в систему связей со множеством предполагаемых интерпретаторов[12].

Обобщая вышесказанное, можно заметить, что современное развитие цифровых информационных технологий определяет повышенные требования к знанию отечественной и зарубежной нормативно-технической документации, и поэтому формула Герцена *«варварская сбивчивость понятий»* никогда не была так актуальна.

Заключение

Таким образом, по мнению международного (и отечественного) экспертного сообщества — *основное назначение модели тренажера любого оборудования состоит в отображении информации, характеризующей реакцию системы на управляющие воздействия*.

Обычно отклик любых систем на входное управляющее воздействие или какое-либо внешнее возмущение является функцией многих факторов, достоверное знание о влиянии которых *крайне важно* для тех, кто изучает принципы построения данной системы, *учится управлению* и *использованию этой системы для выполнения целевой задачи*. Хранимая в тренажере информация о системе и внешних факторах *должна быть организована и обрабатываться таким образом,* чтобы воспроизводился *динамический отклик реальной системы* точно также, как он воспринимается и используется оператором в процессе управления любым реальным объектом-прототипом.

Так как же реализовать эти безусловно-необходимые и теоретически справедливые требования в практике разработки новых технологий тренажерных систем?

Ниже мы приводим в кратком (тезисном) виде соображения авторов данной статьи по указанному вопросу.

1. Соответствие модели оригиналу может быть выражено в точных математико-логических терминах изо- и гомоморфизма [33]. Следует заметить, что для любых физически реализуемых систем отношение изоморфизма всегда есть идеализация. Отношение же гомоморфизма, будучи рефлексивным и транзитивным, симметричным не является.

Отсутствие в гомоморфной модели свойства симметричности делает ее (в качестве модели используется гомоморфный образ) и оригинал неравноправными:

– модель проще оригинала и отношение «быть моделью» оказывается не отношением типа равенства (эквивалентности), а отношением сходства или толерантности;

– реализуется идея не тождества, а всего лишь подобия.

Главное в гомоморфных моделях сводится к свертыванию доступной нам информации об исследуемых процессах и объектах, содержащих множество второ-

[12] Что фактически и произошло с «интерпретаторами» кафедры АСУ ТП МЭИ.

степенных, не существенных данных в гораздо более компактную и обозримую форму. Причем соотношение между степенью свертывания второстепенной информации об объекте и уровнем детализации имитируемых функций и систем объекта является одним из принципиальных положений построения математических моделей для тренажеров при физико-статистическом подходе.

2. Концепция физико-статистического подхода к анализу технологических объектов заключается в том, что структура модели исследуемого объекта должна быть сформирована на основе физико-технологического анализа причинно-следственных связей переменных объекта и возмущений внешней среды, а оценка параметров модели должна проводиться статистическими методами по конкретным данным функционирования технологического объекта. Концепция этого подхода определяет основную сторону методологии в постановке и решении всех задач моделирования энергообъектов для тренажеростроения [34, 35].

3. Структурная схема идентификации имитационной модели энергообъекта с позиций физико-статистического подхода приведена на рисунке 4.

На левой ветви схемы показаны этапы извлечения

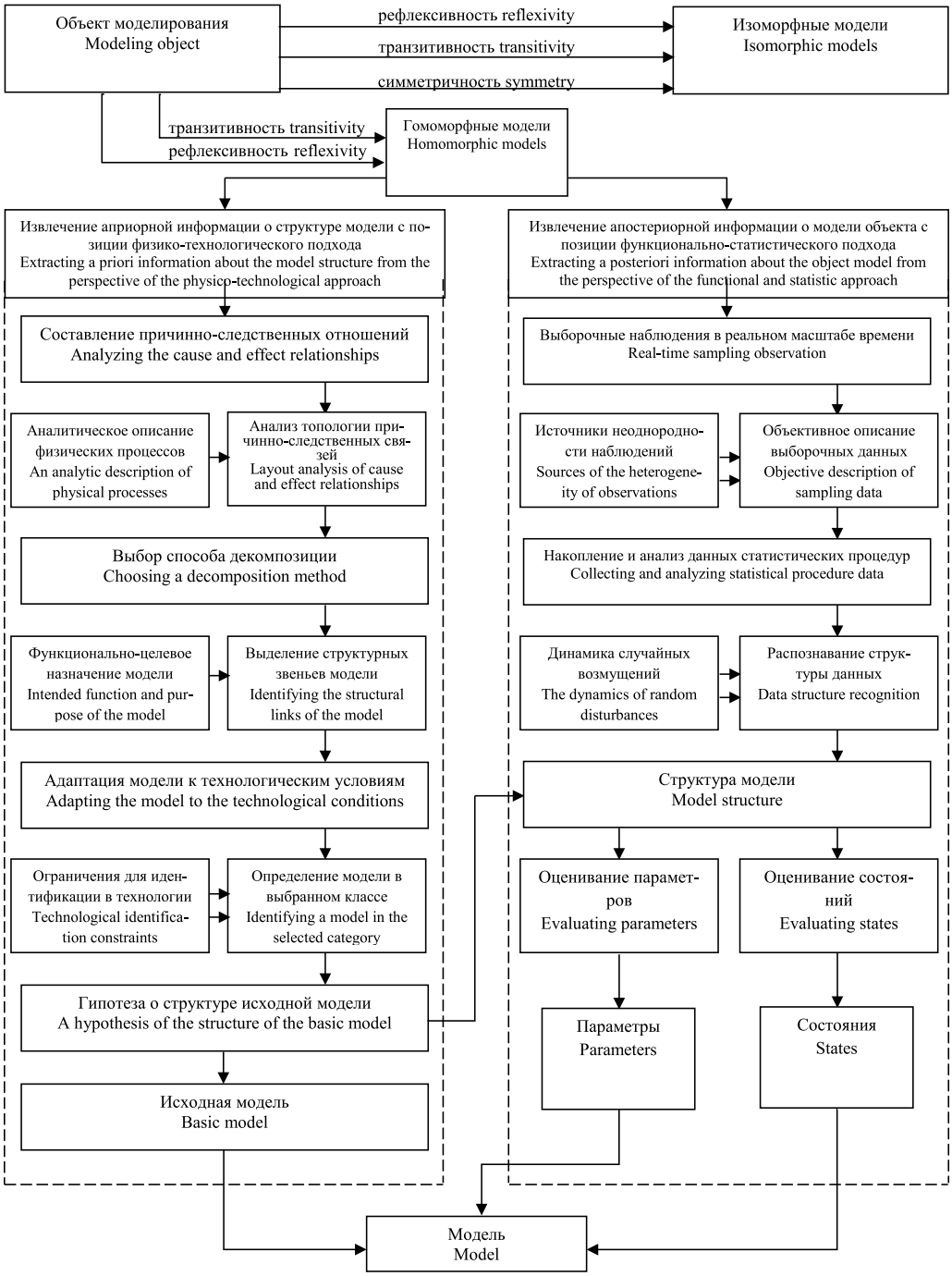


Рисунок 4. Идентификация имитационной модели энергообъекта с позиции физико-статистического подхода
Figure 4. Identifying a simulation model of a power facility from the perspective of the physico-statistical approach

информации, необходимой для выдвижения гипотезы относительно структуры модели, выбранной в рамках некоторого класса моделей, например, дифференциальных уравнений, уравнений в конечных разностях, алгебраических уравнений, графиков и др. Для этого используются данные на физико-технологическом уровне знаний и представлений причинно-следственных связей идентифицируемого объекта.

На правой ветви схемы приведены этапы извлечения информации о модели объекта с позиций функционально-статистического подхода к изучению закономерностей поведения идентифицируемого объекта. Результаты анализа данных, проводимого в условиях неопределенности модели и организованных статистических процедур, дают основу для подтверждения или пересмотра структуры модели, выдвинутой с позиций физико-технологического подхода (верификация). После выполненного таким образом физико-статистического обоснования структуры модели решаются традиционные задачи оценивания параметров и состояния объекта (валидация).

Таким образом, имитационная модель энергообъекта, разработанная с позиции физико-статистического подхода, включает в себя аналитическое описание физических процессов в объекте моделирования, адаптированное к реальным процессам с учетом выборочных наблюдений в реальном масштабе времени, накоплением и анализом данных статистических процедур с корректировкой структуры модели и оценкой параметров и состояний модели объекта.

Выводы

1. Первые нормативные документы электроэнергетической отрасли [1, 2] были разработаны с целью *обеспечения единства* ***структуры*** *и* ***эффективности*** *функций* технических систем и средств для подготовки персонала энергопредприятий, энергосистем и объединений и утверждены Минэнерго СССР в 80-х годах прошлого столетия.

Планировалось организовать единую эффективную государственную систему подготовки и непрерывного повышения квалификации оперативного, обслуживающего и ремонтного персонала электроэнергетики.

Указанная система подготовки персонала была реализована только частично в связи с распадом СССР и реформированием единой энергосистемы.

2. Основная цель первого этапа нормативизации — обеспечение единства и эффективности структуры и функций технических систем и средств для подготовки персонала фактически не могла быть полностью достигнута из-за наличия следующих обстоятельств:

Во-первых, как начальные, так и все последующие стандарты, нормы и технические условия определяли *только* ***требования*** *к структуре и функциональным свойствам подсистем тренажера,* а именно: *к рабочему месту оператора, рабочему месту инструктора, модели объекта регулирования, модели системы регулирования, учебно-методическому обеспечению* и т. д., а вопросы ***методологии и методики*** разработки базовой подсистемы тренажера — ***математической модели объекта*** в указанных нормативных документах *вообще не рассматривались.*

Во-вторых, перед разработчиком средства реализации тренажера, а именно его программного обеспечения (ПО), вставали вопросы разработки **программной тренажерно-моделирующей среды**, которая и должна *моделировать теплотехническое, электротехническое и водоподготовительное оборудование и процессы в них.* Указанные вопросы собственно программирования также не нормировались и не рассматривались.

И в-третьих, существующие разработки тренажеров отечественных и зарубежных фирм, связанных с авиацией, атомной энергетикой и военно-промышленным комплексом были в те времена, **строго засекречены**, так что вся информация методологического, методического и технико-применительного характера для разработчиков тренажеров традиционной энергетики была практически недоступна.

3. Таким образом, если в сложившихся условиях *единства структур* тренажерных систем с большими допусками еще можно было добиться, то обеспечить *эффективность функциональных свойств* тренажерных систем для подготовки персонала *у всех разработчиков отрасли* было практически невозможно. Это обуславливалось тем, что методология разработки собственно тренажеров не была сформулирована и, естественно, не стандартизирована, а указанные причины и обстоятельства и определили то состояние в тренажеростроении, которое мы имеем на данный момент времени, и его негативные тенденции рассмотрены в данной статье.

4. Актуальность нормирования цифровых технологий тренажерных систем как способ обеспечения надежности условий обслуживания объектов российской электроэнергетики трудно переоценить в связи с общей ситуацией в российской экономике. Западные санкции и требования импортозамещения диктуют необходимость наличия отечественных разработок по основным позициям и производства и внедрения новой техники в том числе и в тренажеростроении.

5. Тем не менее, и особенно в электроэнергетике, поставки и новой техники идут в подавляющем большинстве случаев с Запада, включая системы автоматизированного управления этим оборудованием, которые судя по экспертным оценкам Минэнерго РФ, в основном, не соответствуют принципам и техническим правилам в рамках которых построена и функционирует ЕЭС России.

Вследствие этого «статистические данные за несколько последних лет показывают, что в электроэнергетике в настоящее время сложилась устойчивая тенденция роста количества крупных аварий, имеющих системное значение» [4].

6. В этих условиях надежность оперативного, обслуживающего и ремонтного персонала приобретает определяющее значение. С целью ее повышения не-

обходимо разработать новый нормативный документ, в котором была бы раскрыта цель его разработки, а именно: обеспечение единства и эффективности методологии разработки структуры и функций цифровых технологических систем для подготовки персонала энергопредприятий.

Список использованных источников

1. РД 34.12.302 (СО 153-34.12.302). Указания по построению комплекса обучающих и тренажерных систем для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков ТЭС, АЭС, предприятий электросетей, энергосистем и объединений 1986 г.

2. РД 34.12.303. Основные технические требования к комплексным тренажерам для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков тепловых электростанций 1988 г.

3. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. / Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Ю. С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново 2013.

4. Грабчак Е. П. Проблемы нормативно-технического регулирования в электроэнергетике // Надежность и безопасность энергетики 2015; 4 (31): 7 – 13.

5. Магид С. И., Архипова Е. Н., Куличихин В. В. Актуальные вопросы развития тренажеростроения современной электроэнергетики // Надежность и безопасность энергетики 2015; 4 (31): 20 – 34.

6. Ротач В. Я. Об уточнении основных положений теории автоматического управления недетерминированными объектами. / Теория и практика построения и функционирования АСУ. // Сб. науч. тр. М.: МЭИ 1998.

7. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия 1978; 416.

8. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка Л. П. Надежность персонала — одна из основных гарантий безопасности. // Надежность и безопасность энергетики 2008; 1: 22 – 33.

9. Магид С. И., Архипова Е. Н. Антропогенные и техногенные факторы риска энергоэффективности опасных производственных объектов топливно-энергетического комплекса. // Международная конференция «IX семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике»: сборник докладов / в 4 т. Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т 2015.

10. Hall W. Enviromental Impact of Control, International Federation of Automatic Control, 6th Triennial World Congress, Boston, Cambridge, Massachusets, USA, Plenary papers IFAC, USA 2005.

11. Дозорцев В. М., Агафонов Д. В. Новый подход к обеспечению адекватности тренажерных моделей сложных технологических процессов. // IV Всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2009 г. Санкт-Петербург.

12. СТУ 115.015-2003. Прикладные программные средства тренажеров тепловых электрических станций и сетей. – М.: Министерство РФ по связи и информатизации 2003.

13. Нормы годности программных средств подготовки персонала энергетики РД 153-34.0-12.305-99 – Москва, РАО «ЕЭС России» 1999.

14. СТО 1.1.1.01.004.0680–2006 «Технические средства обучения». Росэнергоатом.

15. American National Standard Nuclear Power Plant Simulators for use in Opera-tor Training, ANSI/ANS-3.5-1985.

16. American National Standard Fossil Power Plant Simulators. Functional Requirements (Draft). ISA SP77/20, 1993.

17. Очков В. Ф. и др. Тренажер для подготовки персонала тепловых сетей./М.: Энергосбережение и водоподготовка 2007; 1.

18. Магид С. И., Загретдинов И. Ш., Музыка Л. П., Архипова Е. Н. Человеческий потенциал и концепция обеспечения надежности в электроэнергетике./М.: Энергосбережение и водоподготовка 2005; 3.

19. https://www.testenergo.ru/files/mpei2nvgres.pdf

20. Фридман А. А. Мир как пространство и время. М.: Наука 1965.

21. Фрог Б. Н., Первов А. Г. Водоподготовка. Учеб. для вузов: – М.: Издательство АСВ 2015.

22. Человеческий фактор Под редакцией под редакцией Г. Салвенди. В 6-ти тт. Т. 3. Моделирование деятельности, профессиональное обучение и отбор операторов: Пер. с англ. / Холдинг Д., Голдстейн И., Эбертс Р. И др. – (Часть II. Профессиональное обучение и отбор операторов). – М.: Мир, 1991. – 302 с.: ил.

23. Магид С. И., Загретдинов И. Ш., Львов М. Ю., Мищеряков С. В., Сысоева Л. В., Музыка Л. П., Кропачев С. А., Архипова Е. Н. Человеческий потенциал и надежность электроэнергетики. Омск-Москва. Издательство «ТЭСТ» 2005.

24. Винер Н. Кибернетика. Наука 1983.

25. Багрова Н. Д. Фактор времени в восприятии человеком. Л.: Наука 1980.

26. Бичаев Б. П. Метод определения допустимой погрешности моделирования параметров, используемых для оценки обучаемых в тренажерах // Управляющие системы и машины 1980; 3.

27. Плютинский В. И., Охотин В. В. Методика оценки точности динамических моделей тренажеров энергоблоков // Теплоэнергетика 1985; 10.

28. Магид С. И., Ибрагимов И. М. Моделирование энергетических систем. М.: «Апарт», 2002.

29. Arthorn C. H. Nuclear power plant training simulator // «ASEA-Jeurnal». 1973 Vol. 46; 3: 73.

30. Schwarz O., Schlegel G.Ausbildung von Kraftwerks personal fur fossilbefeuerte Kraftwerke an Simulatoren, Konzepton, Qwalification und Nutzen des KWS-Simulators. VGB Kraftwerkstechnik, 65, Heft 2, Februar 1985; 104 – 109.

31. Аракелян Э. К., Андрюшин А. В., Бурцев С. Ю. Использование компьютерных тренажеров для проведения модельных исследований в энергетике // Вестник МЭИ 2: 2015; 50 – 55.

32. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российвской Федерации / Минэнерго России. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003. – 320 с.

33. Изоморфизм. Философская энциклопедия. Т. 2. М. 1962.

34. Патент на изобретение № 2684886 от 15 апреля 2019 г. Комплексный рекурсивно-идентификационный тренажер (КРИТ-1) для подготовки эксплуатационного персонала энергообъекта. Авторы: Магид С. И., Архипова Е. Н.

35. Патент на изобретение № 2692163 от 21 июня 2019 г. Комплексный рекурсивно-идентификационный тренажер (КРИТ-2) с автоматизированной настройкой системы управления для подготовки эксплуатационного персонала энергообъекта. Авторы: Магид С. И., Архипова Е. Н.

References

1. RD 34.12.302 (SO 153-34.12.302). Instructions for Building a Complex of Teaching and Simulation Systems for the Training of Power Generating Units Operating Personnel of Thermal Power Plants,

Nuclear Power Plants, Power Grid Enterprises, Power Systems and Unions, 1986.

2. RD 34.12.303. Primary Technical Requirements to Complex Simulators for Training of the Operational Personnel of Power Generating Units of Thermal Power Plants, 1988.

3. Theory and Technology of Control Systems. Multifunctional PCSs of Thermal Power Plants. In 3 volumes. / Under the general editorship of Dr. Tverskiy, Prof. Dr.-Eng. Yu. S. Tverskiy; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin" – Ivanovo, 2013.

4. Grabchak Ye. P. The Issues of Technical Regulation in Power Engineering // Nadezhnost Bezop. Energ., No. 4 (31), pp. 7 – 13, 2015.

5. Magid S. I., Arkhipova E. N., Kulichikhin V. V. Topical Issues of Simulator Development in Modern Power Engineering // Nadezhnost Bezop. Energ., No. 4 (31), pp. 20 – 34 (2015).

6. Rotach, V. Ya. Elaborating main provisions of the theory of automated control with nondeterministic objects. // Theory and Practice of Building and Operation of Automated Control Systems. // Collection of Scientific Papers, Moscow: MPEI, 1998.

7. Popyrin L. S. Mathematical Modeling and Optimization of Thermal Power Units. Moscow: Energiya, 1978; 416 pp.

8. Magid S. I., Arkhipova E. N., Muzyka L. P. Reliability of personnel is one of the major safeguards (in Russian) // Nadezhnost Bezop. Energ., No. 1, pp. 22 – 33 (2008).

9. Magid S. I.; Arkhipova E. N. Anthropogenic and technogenic factors of operational risk at hazardous industrial objects of fuel-power complex. // International Conference "The 9th University Seminar on Thermophysics and Power Engineering": a collection of reports / In 4 volumes. Volume 1. – Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2015.

10. Hall W. Environmental Impact of Control, International Federation of Automatic Control, 6th Triennial World Congress, Boston, Cambridge, Massachusetts, USA, Plenary papers IFAC, USA 2005.

11. Dozortsev V. M., Agafonov D. V. New approach to attainment of model's adequacy in industrial process simulators. // Proc. 4th All-Russ. Sci.-Pract. Conf. "Simulation Modeling: Theory and Practice" (IMMOD-2009). Saint-Petersburg.

12. STU. 115.015-2003. Applied Software for Simulators of Thermal Power Plants and Networks. – Moscow: Russian Ministry of Communications and Information Technology. 2003.

13. Suitability Standards for Software Tools for Training Power Engineering Personnel RD 153-34.0-12.305-99 – Moscow, RAO "Unified Power System of Russia". 1999.

14. STO 1.1.1.01.004.0680-2006 "Technical Training Aids". Rosenergoatom.

15. American National Standard Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training, ANSI/ANS-3.5-1985.

16. American National Standard Fossil Power Plant Simulators. Functional Requirements (Draft). ISA SP77/20, 1993.

17. Ochkov V. F. et al. Simulator for Training Heat Network Personnel. / Moscow: Energy Saving and Water Treatment, No. 1, 2007.

18. Magid S. I., Zagretdinov, I. Sh.; Muzyka L. P., Arkhipova E. N. Human Potential and the Concept of Reliability in Power Engineering. / Moscow: Energy Saving and Water Treatment, No. 3, 2005.

19. https://www.testenergo.ru/files/mpei2nvgres.pdf

20. Friedman A .A. The world as space and time. Moscow: Nauka, 1965.

21. Frog B. N., Pervov A. G. Water Treatment. Textbook for Higher Education Institutions: – Moscow: Publishing House ASV, 2015.

22. The Human Factor. Edited by G. Salvendi. In 6 volumes. Volume 3. Modeling of Activity, Professional Training and Selection of Operators: Translation from English / Holding D., Goldstein I., Eberts R., et al. – (Part II. Professional Training and Selection of Operators). – Moscow: Mir, 1991. – 302 pp., illustrated.

23. Magid S. I., Zagretdinov I. S., Lvov M. Y., Mishcheriakov S. V., Sysoeva L. V., Muzyka L. P., Kropachev S. A., Arkhipova E. N. Human Potential and Reliability in Power Engineering. Omsk-Moscow. TEST Publishing House, 2005.

24. Wiener N. Cybernetics. Nauka, 1983.

25. Bagrova N. D. Time Factor in the Human Perception. Leningrad: Nauka, 1980.

26. Bichaev B. P. Method for the allowable error determination in the modeling of parameters used for simulator trainees' evaluation // Upr. Sist. Mash., No. 3, 1980.

27. Plyutinskii V. I., Okhotin V. V. Method for accuracy assessment for dynamic models of power generating units simulators // Teploenergetika, No. 10, 1985.

28. Magid S. I.; Ibragimov I. M. Power System Modeling. Moscow: "Apart", 2002.

29. Arthorn C. H. Nuclear power plant training simulator // "ASEA-Journal". 1973 Vol. 46; 3: 73.

30. Schwarz O., Schlegel G. Ausbildung von Kraftwerks personal fur fossilbefeuerte Kraftwerke an Simulatoren, Konzepton, Qwalification und Nutzen des KWS-Simulators. VGB Kraftwerkstechnik, 65, Heft 2, Februar 1985; 104 – 109.

31. Arakelyan E. K.; Andryushin A. V., Burtsev S. Yu. Use of Computer Simulators for Model Research in Power Engineering // MPEI Journal, No. 2, 2015; pp. 50 – 55.

32. Rules for Technical Operation of Power Stations and Networks in the Russian Federation // Ministry of Energy of the Russian Federation. – Moscow: SPO ORGRES, 2003. – 320 pp.

33. Isomorphism. Philosophical Encyclopedia. Volume 2. Moscow, 1962.

34. Patent No. 2684886 of April 15, 2019. Complex Recursive Identification Simulator (CRIT-1) for Training Power Facility Operators. Authors: Magid, S. I. Arkhipova E. N.

35. Patent No. 2692163 of June 21, 2019. Complex Recursive Identification Simulator (CRIT-2) with Automated Control System Setup for Training Power Facility Operators. Authors: Magid S. I.; Arkhipova E. N.