

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-17-28>

УДК 621.311

Нормирование цифровых технологий тренажерных систем как способ обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики (часть 2)

Магид С. И.^{1*}, Загреддинов 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

Рассматриваются вопросы нормирования цифровых тренажерных систем для обеспечения надежности условий обслуживания объектов электроэнергетики. Выявлены причины невозможности достижения основной цели первых и последующих нормативных документов, а именно единства структуры и функций технических систем и средств для подготовки персонала энергопредприятий, энергосистем и объединений. Показано, что гносеологическая цепочка: вопрос – проблема – гипотеза – аналитическая модель – эксперимент – имитационная модель определяет и структуру, и сущность современной методологии системно-имитационного моделирования энергетических объектов. При этом важнейшими современными методологическими предпосылками построения моделей является вероятностно-статистический подход и многокритериальная оптимизация. Достаточно подробно излагаются вопросы аналитического моделирования, системной концепции, моделирования в условиях дестабилизации, а также системных парадоксов модели объекта. Излагаются основные принципы системного подхода к построению всережимной модели реального времени, уровни ее детализации и применяемые на практике модели объектов управления. При этом уделяется большое внимание физико-статистическому подходу к идентификации имитационных моделей, их верификации и валидации. Изложена современная научная классификация моделей, принципов их упрощения. На основании изложенных позиций утверждается, что подход к построению всережимной модели реального времени состоит в разделении функций статического и динамического моделирования с направленной асимметрией точности разделенных функций. Обобщая изложенное, следует очевидный вывод о том, что принятые ранее нормативы определяли только требования к готовому изделию и его подсистемам, а вопросы методологии разработки модели и ее цифровой (программной) реализации вообще не рассматривались. В связи с изложенным представляется необходимым разработать новый нормативный методологический документ, в котором должна быть предусмотрена возможность раскрытия цели его разработки, а именно: обеспечение единства методики 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., Загреддинов 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 2) // Надежность и безопасность энергетики 2020. – Т. 13, №1. – С. 17–28.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-17-28>

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 2)]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry* 2020, vol. 13, no. 1, pp. 17–28. (in Russian)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-17-28>

Standardization of digital technologies of simulator systems as a method of ensuring reliability of conditions of service of power engineering facilities (part 2)

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

Issues are considered of normalization of digital training simulator systems to ensure the reliability of conditions for maintenance of electric power industry facilities. The reasons are identified of impossibility of achievement of the basic purpose of the first and subsequent standard documents, namely the unity of the structure and functions of engineering systems and means for training of personnel of power enterprises, power systems and associations. It is shown that the question–problem–hypothesis–analytical model–imitation model gnoseological chain defines both the structure and the essence of modern methodology of systemic imitation simulation of power facilities. At the same time, the most important modern methodological prerequisites for modeling are the probabilistic-statistical approach and multi-criteria optimization. Issues of analytical simulation, systemic concept, simulation in destabilization conditions, as well as systemic paradoxes of facility simulation are described in sufficient detail. The basic principles of systemic approach to construction of an all-mode real-time model, levels of its detailing and models of objects of control applied in practice are stated. At the same time, a great attention is paid to the physical-statistical approach to identification of simulation models, their verification and validation. A modern scientific classification of models, principles of their simplification is stated. On the basis of the stipulated positions it is stated that the approach to construction of an all-mode real-time model consists in separation of static and dynamic simulation functions with directional asymmetry of accuracy of separated functions. To generalize the aforesaid, an obvious conclusion is drawn that the previously adopted standards only defined requirements to a finished product and its subsystems, whereas the questions of methodology of working out a model and its digital (program) implementation were not considered at all. It therefore appears necessary to develop a new normative methodological document, in which the possibility of disclosing the purpose of its development should be provided, namely: assuring the unity of the methodology of development of the structure and functions of digital technological systems for training the personnel of power industry enterprises.

KEYWORDS: normalization, digital technologies, training simulator systems, power industry facilities, reliability of maintenance

Введение

В первой части статьи [1] были рассмотрены вопросы нормирования цифровых тренажерных систем для обеспечения надежности условий обслуживания основных объектов электроэнергетики. Первые нормативные документы отрасли [2, 3] были разработаны с целью обеспечения **единства** структуры и 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 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 функций технических систем и средств для подготовки

персонала не могла быть полностью достигнута из-за наличия следующих обстоятельств.

Во-первых, как начальные, так и все последующие стандарты, нормы и технические условия определяют 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 рассматриваются.

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

И в-третьих, существующие разработки тренажеров отечественных и зарубежных фирм, связанных с авиа-

цией, атомной энергетикой и военно-промышленным комплексом, были в те времена, впрочем, как и сейчас, **строго засекречены**, так что вся информация методологического, методического и технико-прикладного характера для разработчиков тренажеров традиционной энергетики была практически недоступна.

Таким образом, в сложившихся условиях добиться единства 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, и его негативные тенденции были фрагментарно рассмотрены в первой части статьи.

Каковы же современные перспективы развития систем подготовки персонала в мире?

По максимальной оценке Глобального института Мак Кинси 375 млн работников во всем мире (14% занятых) к 2030 г. придется сменить специальность из-за автоматизации, цифровизации, роста применения искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения. Минимальный прогноз — переучиваться придется 75 млн работникам (3% занятых).

Как следствие всеобщей трансформации технологического уклада рабочие места и компетенции меняются быстрее, чем люди или организации могут адаптироваться. Глобальный индекс компетенций Coursera за 2019 год показал, что две трети населения мира отстают в важнейших практических навыках. По данным исследований Всемирного экономического форума основные навыки, необходимые для выполнения большинства профессиональных обязанностей, к 2022 г. изменятся в среднем на 42%. Предвосхищая изменения таких масштабов, компании срочно пытаются найти и получить компетенции, необходимые для поддержания конкурентоспособности. Согласно недавнему опросу PricewaterhouseCoopers, сейчас недостаток навыков является одной из основных угроз для бизнеса, с точки зрения руководителей во всем мире.

В связи с изложенным, учитывая наличие глобальных потребностей в приобретении персоналом промышленности развитых и развивающихся стран новых компетенций, представляется весьма актуальным рассмотреть вопросы, связанные с методологией моделирования промышленных объектов, разработанной и широко применяемой российской компанией «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ»)¹ в практике проектирования и внедрения тренажеров на

предприятиях электроэнергетики РФ и стран СНГ.

Методология моделирования энергетических объектов

1. Мотивы, классификация и гносеологические аспекты моделирования. Современные положения теории математического моделирования физических объектов связаны с трудами известных зарубежных ученых: Н. Винера, У. Р. Эшби, К. Э. Шеннона и др., а также с трудами ученых российской школы: Вавилова А. А., Веникова В. А., Пухова Г. Е., Растригина Л. А., Попырина Л. С., Ротаца В. Я., Магида С. И., Дозорцева В. М. и др.

Отмечается пять основных мотивов применения моделей в качестве средства: осмысления действительности, общения, обучения, реализации эксперимента, инструмента прогнозирования.

Моделирование позволяет осуществлять косвенные (непрямые) эксперименты с системами как в процессе их проектирования, так и в ходе исследования свойств существующих систем. Вместо того, чтобы проводить дорогостоящие и сложные эксперименты или обучение на натуре, исследования или тренаж осуществляют на модели системы [4].

Модель как бы перебрасывает мост между натурным экспериментом и имитационным моделированием:

- пассивный натурный эксперимент — реальная система используется как объект для изучения и сбора статистики;
- полунатурный эксперимент — система изучается в условиях искусственного воспроизведения определенных режимов ее функционирования и воздействия внешней среды;
- физическое моделирование — модель воспроизводит изучаемый процесс (оригинал) с сохранением его физической природы;
- аналитическое моделирование — модель описывает математические зависимости выходных величин (выходных параметров) подсистем от входных величин и параметров.
- имитационное моделирование (системный подход) — для каждого элемента сложной системы составляется математическая модель, имитирующая его поведение; совокупность таких подсистем образует математическую модель системы, таким образом, модель становится полностью математической (аналитической), но сохраняет структурное сходство с оригиналом, причем только определение интегральных свойств модели системы при ее рекурсивной адаптации (верификации и валидации) и позволяет создать на их основе адекватную во всех смыслах имитационную модель объекта.

В общем случае в соответствии с традиционной классической гносеологией (теорией познания) науч-

¹ Созданная по приказу Минэнерго СССР в 1978 году на базе РЭУ Мосэнерго бывшими сотрудниками ведущих наладочных и научно-исследовательских институтов ОРГРЭС, ЦКТИ, ВТИ выпускниками Московского энергетического института (МЭИ) и МГУ — фирма ТЭСТ как носитель самой передовой на то время энергетической технологии уже в начале 80-х годов прошлого века при разработке и внедрении тренажеров перешла на новую информационную платформу, на единую базу данных, единую систему обмена и кодирования информа-

но-познавательный процесс разработки моделей современного IT-тренажера заключается в переходе от вопроса к проблеме, затем к гипотезе (аналитической модели), которая после достаточного экспериментального обоснования превращается в имитационную модель. Гносеологическая цепочка: вопрос — проблема — гипотеза — аналитическая модель — эксперимент — имитационная модель — определяет и структуру, и сущность современной методологии системно-имитационного моделирования энергетических объектов.

Основой методологии современного моделирования служит, с одной стороны, — гносеология (теория познания), то есть, в нашем случае, это — определение соотношения анализ-синтез для выработки стратегии при построении моделей, которое при реализации моделей имеет многовариантный характер в зависимости от целей моделирования, с другой стороны — системный анализ при рассмотрении вариантов построения математических моделей в рамках классической физики.

Кроме того, важнейшими современными методологическими предпосылками построения моделей является вероятностно-статистический подход и многокритериальная оптимизация.

Широкое применение в современной методологии моделирования находит методика агрегирования грубых моделей. Основная идея агрегирования грубых (аналитических) моделей состоит в том, что начальное семантическое содержание отдельных подсистем объекта моделирования объединяется (агрегируется) в одну сложную систему с целью определения в дальнейшем интегральных свойств агрегированной модели при ее адаптации, отличных от индивидуальных свойств отдельных подсистем.

Существенным при построении моделей является гносеологический аспект отражения. Каждая модель содержит знания об объекте в аналитической (программной) форме, при этом трансформация знаний в аналитику, как правило, приводит к уменьшению избыточности. Поэтому для реализации возможности связей со средой модель должна иметь языковую функцию. Содержание знаний – аналитическая модель (программа) является, таким образом, семантической стороной. Способы, с помощью которых знания вводятся в модель и выводятся из нее, то есть кодируются в ней, являются синтаксической стороной.

В соответствии с классификацией моделей различают материальные и идеальные модели.

Материальная модель подразумевает создание в качестве модели материального объекта по конкретным свойствам адекватного реальному объекту и предназначенного для изучения указанных свойств. Например, аэродинамическая модель котла, физическая, аналоговая модель электрической сети и т. п.

Идеальная (знаковая) модель описывает свойства реального объекта формализованно на основании накопленной информации и, таким образом, что только после экспериментальной адаптации (верификации, валидации) возможна на ее основе имитация реаль-

ного объекта с помощью аналоговых или цифровых средств.

Современные энергообъекты, рассматриваемые как объект моделирования, в большинстве своем нестационарны, нелинейны, многомерны, со многими внутренними обратными связями, невелика или отсутствует априорная информация о форме и степени взаимосвязи между переменными 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 и др.) в большинстве случаев вызывает затруднения [5].

Это можно объяснить следующими причинами:

- закономерности (уравнения кинетики, тепломассообмена, материального баланса и др.) 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;

- 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 каждой из входных параметров, тем более, что для реальных тепловых процессов все переменные по своей природе стохастические.

Поэтому использование всей априорной информации практического изучения реальных процессов значительно ускоряет процесс получения модели. Результаты промышленных экспериментов, проводимых при испытаниях теплотехнического оборудования наладочными и другими организациями, оказываются определяющими при решении задачи выбора структуры модели, оценки параметров, стационарности, линейности, выбора информативных переменных, оценки степени адекватности модели реальному объекту и т. д.

Существует много способов определения модели технологических процессов. Каждый способ дает возможность построить модель, адекватную процессу в том или ином смысле, что зависит от выбранного критерия.

Выбор структуры модели, критерия ее адекватности процессу и другие параметры модели необходимо тесным образом увязать с целью моделирования процесса, с задачей, стоящей перед исследователем при разработке модели.

Модель энергообъекта, разрабатываемая для тренажера, т. е. для использования ее в системе «человек-машина» должна прежде всего отвечать целям восприятия человеком-оператором информационной модели объекта управления, анализа информации и принятия решений, а также формирования и совершенствования у операторов профессиональных навыков и умений.

Основные цели моделирования энергообъекта, а именно, организация восприятия и анализа оператором информационной модели, а также управление ею

позволяют рассматривать синтез необходимой модели в рамках структур и методов, применяемых теорией управления с учетом упрощений, характерных для фильтрующих свойств человека-оператора.

На рисунке 1 показана общая схема «ручного» управления в человеко-машинной системе. Под «ручным» управлением здесь понимается такое целенаправленное воздействие человека-оператора на объект, в результате которого объект оказывается в определенном смысле «ближе» к выполнению поставленных целей, чем до управления. На объект управления в общем случае действуют следующие факторы: X — неуправляемая, но контролируемая через систему отображения информации (СОИ), составляющая воздействия среды; X'' — управляемая составляющая (управление объектом воспринимается также, как воздействие среды); E — неуправляемая и ненаблюдаемая составляющая воздействия среды; Y — состояние объекта управления; X' и Y' — информация соответственно о неуправляемых (но наблюдаемых) воздействиях среды и состоянии объекта управления, получаемая человеком-оператором с учетом отображения ее в СОИ, а также с учетом его собственных фильтрующих свойств (Ф). Естественно, что эта информация составляет лишь часть, содержащуюся в X и Y , т. е. $X'' \subset X$ и $Y' \subset Y$.

Для осуществления управления необходимо прежде всего определить цель (T), т. е. то, к чему должен стремиться человек-оператор при воздействии на объект. Целевая функция человеко-машинной системы управления, например, котельной установки, обычно регламентируется и состоит в обеспечении заданной паропроизводительности котла с минимальными отклонениями от расчетных параметров пара при минимуме удельных расходов топлива и электроэнергии на тонну пара и при минимальных отклонениях от критериев, обеспечивающих надежную работу оборудования. Однако для достижения указанной цели необ-

ходим выбор (B) наиболее целесообразной стратегии управления (S) и ее реализация с помощью имеющихся органов управления и исполнительных механизмов. Таким образом, управление характеризуется взаимоотношением четырех элементов:

$$\langle X'', I = \langle X'', Y' \rangle, S, T \rangle, \quad (1)$$

где X'' — управляющее воздействие; $I = \langle X'', Y' \rangle$ — информация о состоянии среды и объекта; S — стратегия; T — цель управления.

Цель управления T определяет требования, выполнение которых обеспечивается человеком-оператором, управляющим воздействием X'' с помощью стратегии S и сбором информации по каналам $X \rightarrow X'$ и $Y \rightarrow Y'$. Однако, если у человека-оператора не сформирована концептуальная модель (КМ) технологического процесса $Y'(Y) = F[X'(X), X'']$, т. е. он не знает, как $X'(X)$ и X'' влияют на состояние объекта $Y'(Y)$, то он не сможет подобрать стратегию S и определить управляющее воздействие X'' . Причем, в реальных условиях эксплуатации концептуальная технологическая модель складывается у оператора-технолога последовательно — сначала из $КМ_1$ — выработки тактики управления на основании оценки производственной ситуации по неполной оперативной информации I , необходимой для выбора наиболее целесообразной стратегии S , а затем из $КМ_2$ — выработки частной концептуальной модели планируемого развития технологического процесса при данном управляющем воздействии на объект X'' .

В обычных условиях формирование концептуальной технологической модели достигается у человека-оператора за счет длительного дублирования действий на рабочем месте, а также методом «проб и ошибок», что приводит зачастую к нежелательным последствиям. При обучении человека-оператора на тренажере концептуальная модель формируется целенаправленно на доста-

точно адекватной модели прототипа, а затем уже процесс управления переносится на реальный объект. Таким образом, процесс управления с помощью тренажера должен состоять в общем виде из трех этапов (рисунк 2):

- синтез (идентификация и реализация) адекватной модели объекта для тренажера;
- формирование КМ технологического процесса у человека-оператора на тренажере;
- синтез управления на основе полученной КМ на реальном объекте.

2. Аналитическое моделирование и системная концепция. Аналитическая модель — это, в общем случае, в энергетике — формула, представляющая математическую зависимость тепловых, гидравлических, аэродинамических, механических и электро-технических процессов в объекте

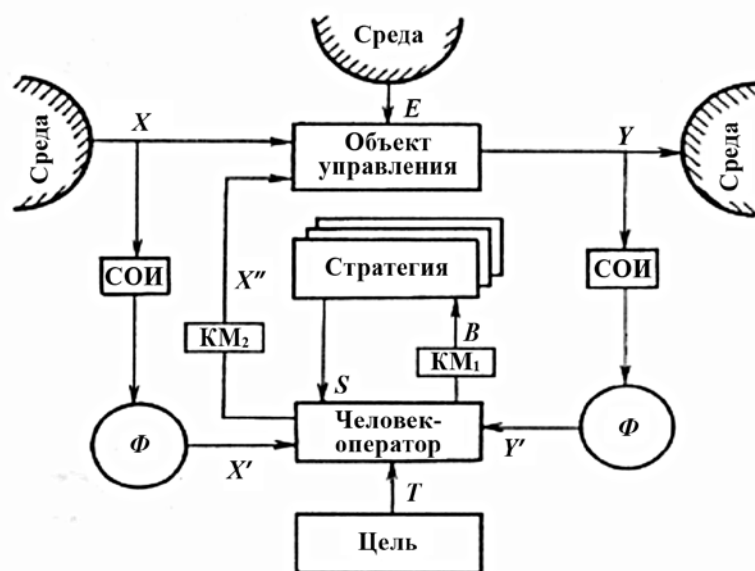


Рисунок 1. Общая схема «ручного» управления в человеко-машинной системе
Figure 1. General diagram of «manual» control in the human-machine system

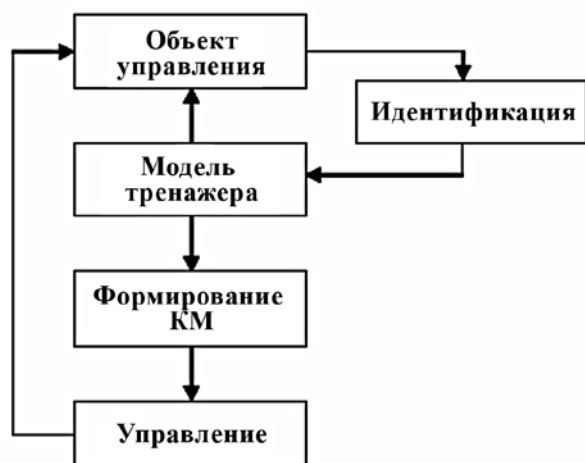


Рисунок 2. Блок-схема управления с помощью тренажера
Figure 2. Flow chart of simulator-based control

моделирования, показывающая, что выходы модели находятся в функциональной зависимости от входов. В самом общем виде указанную зависимость можно представить как: $U = f(x)$, где U — вектор выходов, x — вектор входов, а f — зависимость, которая записана в виде математической функции.

Основанием каждой модели, таким образом, является более или менее развитая теория объекта моделирования (аналитическая модель); эта теория укладывается в синтаксически установленные рамки, в концепцию системы, положенную в основу конкретного построения модели.

Системная концепция фиксирует общие рамки модели, иначе говоря, она определяет структуру модели. Конкретная форма модели, в которой она соответствует объекту моделирования, получается благодаря тому, что экспериментальные (эмпирические) данные приводят форму модели в соответствие с объектом, то есть для параметров модели, ее степеней свободы шаг за шагом устанавливаются все более достоверные знания. В этом смысле каждая разработанная модель выражает компромисс между теорией и практикой, теоретическими познаниями и эмпирическими данными.

3. Моделирование в условиях дестабилизации. Методология решения проблемы управления энергообъектами в условиях дестабилизации при разработке современных тренажерных средств имеет ряд важных концептуальных аспектов, рассмотрение которых необходимо начать, прежде всего, с определения основополагающих понятий таких как: «управление», «регулирование» и «контруправление».

Под «управлением» обычно понимается процесс воздействия на объект с целью изменения его текущего состояния в соответствии с изменением задания. Конкретно это сводится к обеспечению изменения управляемых величин объекта в соответствии с изменением заданных их значений.

Под «регулированием» понимают обеспечение равенства или близости управляемой величины ее заданному значению, вне зависимости от того, является ли

заданное значение неизменным или меняющимся во времени.

Во многих странах эти два понятия вообще не различаются, так в англоязычных странах они объединены словом «control».

Если учесть тот факт, что практически все объекты электроэнергетики недетерминированы, то становится ясным, почему так невелика эффективность традиционных АСУТП, исторически рассчитанных на решение задач управления только детерминированными объектами. Именно в этом и кроется еще один источник дестабилизации объектов электроэнергетики.

Аварийное состояние объекта характеризуется большой степенью недетерминированности, то есть резким изменением его статических и динамических характеристик. Здесь вступают в действие так называемые запретительные закономерности теории автоматического регулирования (защиты и блокировки). Однако до срабатывания защит, или при их несрабатывании необходимо правильное управление с целью обеспечения безопасности оперативного персонала и технологического оборудования.

Вот это управление энергообъектом в состоянии резкого изменения его статических и динамических характеристик, то есть управление в предаварийном или в аварийном состоянии объекта мы будем называть противоаварийным (контраварийным) управлением, или «контруправлением».

4. Системный парадокс модели объекта. С точки зрения теории автоматического управления возможность законченного синтеза практически жизнеспособных алгоритмов функционирования контроллеров и регуляторов непосредственно по априорной модели объекта сомнительна уже из-за противоречивости самой постановки задачи идентификации объекта (системного парадокса модели объекта). Кроме того, техническая реализация результатов синтеза обычно связана с появлением ряда неучтенных факторов, которые могут потребовать существенной корректировки получаемых результатов.

Это заставляет расчленять процедуру синтеза на два этапа, выполняемых во время проектирования системы и во время ввода ее в эксплуатацию на действующем объекте.

Системный парадокс модели объекта состоит в том, что принципиально невозможно сформулировать критерий приближения к реальному объекту его модели, по которой будет синтезироваться алгоритм управления или регулирования, если неизвестен этот алгоритм.

Системный парадокс модели объекта состоит в том, что принципиально невозможно сформулировать критерий приближения к реальному объекту его модели, по которой будет синтезироваться алгоритм управления или регулирования, если неизвестен этот алгоритм.

Выход из полученного порочного круга — в переходе к итерационной процедуре синтеза, в рамках которой синтез алгоритма по априорной модели объекта является только первым шагом. Остальные шаги движения

к оптимуму выполняются непосредственно на реальном объекте при вводе системы в действие и после ее ввода.

Для преодоления указанных противоречий и проблем и создаются так называемые имитационные модели, которые с позиций классификации представляют некоторый симбиоз материальной и идеальной модели. Результаты промышленных экспериментов, проводимых при испытаниях энергетического оборудования исследовательскими, наладочными и другими организациями, а кстати, и разработчиком модели (если он сможет это сделать), оказываются существенными при определении синтаксиса и семантики модели, то есть при решении задач выбора структуры модели, оценки параметров, стационарности, линейности, выбора информативных переменных, оценки степени адекватности модели реальному объекту и т. д.

Таким образом, главные трудности при создании тренажеров, то есть при разработке математических моделей энергооборудования и процессов обусловлены основным противоречием моделирования технологических объектов для тренажеров, а именно, противоречием между необходимостью учета действия большого количества факторов, определяющих процессы, протекающие в сложных технологических системах, и необходимостью быстрого получения надежных результатов, т.е. работы тренажера в реальном и ускоренном масштабе времени.

Выполнение этих противоречивых условий возможно только на основе разработки новых методов и алгоритмов, ориентированных на решение задач высокой и сверхвысокой размерности, уровень сложности которых должен определяться физиологическими возможностями восприятия среды человеком-оператором.

5. Разработка нового подхода к построению всережимной модели реального времени. Анализ методов и алгоритмов для решения задач моделирования показал, что процедура решения включает не только собственно алгоритм, позволяющий получить интересующие разработчика переменные (модель, реализуемую с помощью цифровой техники), но и алгоритм построения модели, т. е. алгоритм моделирования, формируемый по имеющейся информации о системе. Именно алгоритм построения и определяет эффективность реализуемой модели.

Оптимизируемыми считаются параметры модели в широком смысле, т. е. структура логических связей между отдельными блоками модели, уровень детализации моделируемых функций, исходя из психофизиологических свойств человека-оператора, тип блоков и их количество и т. д.

Опыт разработки математических моделей для тренажеров позволил авторам методологии предложить подход к упрощению моделирования объектов управления для тренажеров, основанный на учете объективных свойств как моделируемого оборудования, так и обслуживающего его человека-оператора. Анализ современного теплотехнического оборудования и его математических моделей показывает, что в боль-

шинстве случаев можно применить линеаризацию разрабатываемых для тренажера моделей относительно идентифицируемых параметров, что в свою очередь дает возможность разделить нелинейность и динамику объекта.

С целью разработки моделей энергообъекта, удовлетворяющих приведенным положениям, был предложен следующий подход:

- для упрощения математических моделей разделяются функции статического и динамического моделирования;

- статическое моделирование осуществляется в основном посредством решения нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений с высокой степенью точности;

- для моделирования динамики используется динамическая модель, полученная предварительным расчетом динамических характеристик на ЭВМ и упрощенная в пределах неразличимости этих упрощений в паре «объект-модель» человеком-оператором;

- образованная таким образом непрерывная нелинейная динамическая система управляется дискретной логикой, определяемой закодированной информацией о состоянии технологической схемы [6].

6. Определение основных принципов системного подхода. Далее необходимо определить основные принципы системного подхода, на основе которых должна разрабатываться методологическая база и схемы практической реализации всех этапов решения задач моделирования, анализа и синтеза.

За основные были приняты следующие принципы:

- единство функционально-целевых и причинно-следственных отношений;

- последовательное раскрытие неопределенности и избыточности; однозначное представление свойств и характеристик; многоуровневая функционально-целевая и причинно-следственная интеграция объекта моделирования и модели;

- целенаправленное эволюционное развитие топологии, структур операторов и параметров модели;

- выбор общего базиса для оценки влияния топологии, структур операторов и параметров на свойства, качество и характеристики модели.

Выбор общего базиса для оценки влияния топологии, структур операторов и параметров на свойства, качество и характеристики модели позволяет на всех этапах синтеза системы сравнить и оценить эффективность очередного шага эволюционного развития топологии, структур операторов и параметров модели и выбрать наиболее рациональное продолжение процесса.

7. Уровни детализации и применяемые модели объектов управления. Соответствие модели оригиналу может быть выражено в точных математико-логических терминах изо- и гомоморфизма [7]. 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 симме-

тричности 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.

При моделировании оборудования, работающего только в штатном режиме, достаточным уровнем детализации является, очевидно, разработка имитаторов, обеспечивающих оператору индикацию параметров систем объекта. Такие модели получили название «индикаторные» или «демонстрационные».

При моделировании нештатных (в том числе и аварийных) ситуаций такой уровень детализации оказывается недостаточным, так как часть подсистем и элементов объекта может быть вообще не рассмотрена при моделировании или рассмотрена в недопустимо упрощенном виде.

Адекватность реакции модели обеспечивается автоматическим учетом в математической модели изменившихся условий. Вмешательство человека (оператора или инструктора) дополняет процедуру реализации детерминированной модели неформализованными эвристиками, представляющими собой следствие деятельности человека. Это превращает «гибкие» модели в «имитационные», с помощью которых можно охватить все реально мыслимые состояния объекта. Имитационная модель позволяет рассчитать поведение частей сложного объекта и их взаимодействие с учетом влияющих факторов и в условиях, близких к реальным.

8. Модель Гаммерштейна и оперативные модели. Экспериментальные статистические исследования энергообъектов с учетом психофизиологических свойств человека-оператора показали, что для обучения допустимо свертывание информации за счет линеаризации модели нелинейного объекта относительно идентифицируемых параметров. Допущение линейности такого рода позволило построить достаточно простые и эффективные алгоритмы идентификации функциональных характеристик, а именно, разделить нелинейность и динамику объекта. Таким образом, в указанной модели допустимо использовать точную нелинейную безынерционную статику и качественную динамику (модель Гаммерштейна). Таким образом, модель Гаммерштейна, модифицированная с учетом логико-числовых функций, выделяется как подкласс из класса «оперативных» моделей.

К моделям последнего типа относятся параметрические, многомерные, динамические модели с сосредоточенными параметрами, обладающими свойствами непрерывности, линейности по параметрам и нелинейности по переменным, стационарности и детерминированности, работающие во временной области.

Оперативные модели в тренажерах по своим свойствам наиболее полно отвечают задачам поддержания уровня натренированности персонала непосредственно на электростанциях. Воспроизведение текущих со-

стояний реального объекта, возможность явного представления входной и выходной информации, а также подобие структуры модели структуре реального энергообъекта позволяют удовлетворить всем основным требованиям к моделям в тренажерах. Кроме того, иерархическая структура оперативных моделей обеспечивает достижение на каждом уровне иерархии различной (рациональной в смысле обучения) степени детализации модели по отношению к реальному объекту.

Весьма существенно и принципиально то, что модель, как динамическая структура хранения знаний, является элементом, связующим теоретические и эмпирические знания. Аналитическая модель (формализованная теория) позволяет описать большое число частных факторов с помощью небольшого числа общих формул. Следовательно, использование аналитической модели заключается, в том числе и в уменьшении избыточности, то есть в отсеке частных, несущественных факторов и, таким образом, в более формализованном описании основных закономерностей объекта моделирования.

9. Физико-статистический подход к идентификации имитационных моделей. Современное, имитационное моделирование промышленных объектов (физико-статистическая идентификация) включает в себя два подхода: физико-технологический (аналитический) и функционально-статистический (верификация и валидация). Указанные подходы обладают присущими им достоинствами и недостатками.

При физико-технологическом подходе было установлено, что аналитические методы и модели, достаточно хорошо описывающие физику и механизмы явлений технологического процесса, оказываются не всегда пригодными для объяснения конкретных данных, получаемых в условиях промышленного производства тепловой и электрической энергии. В свою очередь, статистические методы и функциональные модели, связывающие контролируемые переменные на входе и выходе объекта и случайные возмущения внешней среды, адекватно описывая конкретные данные технологического процесса, часто несовместимы с физическими представлениями о механизмах явлений.

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 [8].

Указанный подход полностью согласуется с действующим в настоящее время отраслевым нормативным документом по этому вопросу — «Нормы годности программных средств подготовки персонала энергетики» (СО 153-34.0-12.305-99), где указано, что «...построение модели должно базироваться на основе математического описания физических процессов, происходящих в реальном объекте, в виде систем дифференциальных, алгебраических и логических уравнений, а опре-

деление параметров должно производиться на основе технологических характеристик оборудования и экспериментальных данных о работе объекта».

Имитационное моделирование применяется в тех случаях, когда моделируемая система и ее процессы настолько сложны и нестабильны, что использование только аналитических методов для их описания не представляется возможным.

При моделировании энергообъектов такая ситуация неизбежна в связи с тем, что, как указывалось выше, реальные современные энергообъекты в большинстве своем нестационарны, нелинейны и многомерны, кроме того, все переменные (входные и выходные) по своей природе стохастичны. Указанные свойства обуславливают принципиальную неприемлемость чисто аналитических методов при моделировании энергообъектов с целью разработки имитационных моделей для тренажеров.

В то же время исследуемая система обычно естественным образом расчленяется на подсистемы и элементы, а моделируемый процесс — на элементарные акты-события так, что становится возможным с достаточной точностью разработать математическое описание каждого из них в отдельности.

Таким образом, в имитационных моделях моделирующий алгоритм строится как суперпозиция подалгоритмов, каждый из которых отражает функционирование какой-либо структурной единицы моделируемой системы (описание системы как структуры) или некоторый шаг моделируемого процесса (описание системы как процесса).

10. Верификация и валидация имитационных моделей. Существенным моментом имитационного моделирования является проверка его истинности, то есть

адекватности модели объекта моделирования путем проведения ее верификации и валидации.

Под верификацией имитационной модели обычно понимают проверку и корректировку алгоритмов и структуры (логики) разработанной модели. Подбираются некоторые исходные данные состояний моделируемого объекта с известными выходными параметрами, затем проводится имитационный эксперимент, по результатам которого производится корректировка алгоритмов и структуры модели. Вторым этапом проверки работоспособности модели является ее валидация или проверка статистики с корректировкой параметров модели. По результатам проведенной верификации и валидации модели делаются выводы о соответствии модели основному научному критерию — опытной подтверждаемости, то есть адекватности модели объекту-прототипу.

Адекватность математического моделирования (динамических моделей) в тренажере является доминирующей. От того, с какой точностью воспроизводятся параметры тепловых и электрических процессов, напрямую зависит качество всего тренажера и его дидактическая ценность (рисунок 3).

11. Современная научная классификация моделей и принципы их упрощения. Классификация видов моделей в современной теории моделирования приведена в работах [9, 10], причем имеется как минимум 2^{10} имитационных моделей, определенных на основе бинарных альтернативных соотношений следующих типов: детерминированные — стохастические, статические — динамические, непрерывные — дискретные и т. д. Получаем, что только имитационных моделей, определенных на основе бинарных соотношений, имеется $2^{10} = 1024$ типов, а с учетом других типов моделей

(аналитические, физические, информационные и т. д.), а также разнообразия применяемых критериев, методов решения систем уравнений и т. п., получим огромное множество вариантов описаний технологического объекта. Из этого «информационного моря» математических описаний энергообъекта не каждый «модельер» может уверенно выбрать на твердый «берег» системного подхода, основанного на принципах необходимости и достаточности, причем адекватность моделей которого определяется только физико-технологическим анализом. А если адекватность математического описания объекта определяется степенью верификации, то есть анализом технологическим, то и десять несведущих в технологии математиков сделают при моделировании не больше, чем один разбирающийся в математике технолог.

Очевидно, что в этом и кроется



Рисунок 3. Классификация процедур моделирования по уровням адекватности
Figure 3. Classification of simulation procedures by adequacy levels

основное противоречие современного российского тренажеростроения, а именно: проектированием моделей технологического оборудования занимаются математики, специалисты по автоматике, программисты, системотехники, психологи и т. п., то есть любые специалисты, кроме технологов, владеющих вопросами устройства и режимов эксплуатации технологического оборудования.

Существующая современная классификация [10] разделяет модели на два класса:

- дескриптивные (description models);
- прескриптивные (prescription models, normative models).

Дескриптивные модели предназначены для следующих целей: осмысления действительности — объяснения и описания наблюдаемых фактов, общения, обучения человека, реализации эксперимента, инструмента прогнозирования.

Прескриптивные модели предназначены для нахождения желательного состояния объекта, например, оптимального: технико-экономические и конструктивные расчеты при проектировании (в том числе нормативные методики расчета).

Причем дескриптивные модели (в том числе и в некоторых российских разработках) развиваются в настоящее время, в сторону адаптирования и контроля адекватности.

Адаптивность означает способность приспособления к новым условиям среды, и, таким образом, выделяются дескриптивные модели с адаптивным теступравлением (adaptive test-control):

- самонастраивающиеся тест-модели;
- самоорганизующиеся тест-модели.

У самонастраивающихся тест-моделей при изменении внутренних свойств объекта изменяются математические характеристики моделей, то есть производится валидация или проверка статистики модели с корректировкой параметров модели.

У самоорганизующихся тест-моделей при изменении внешних (структурных) свойств объекта изменяется структура модели, то есть производится верификация или проверка и корректировка структуры модели.

Таким образом, в энергетическом тренажеростроении, по нашему мнению, в соответствии с современной научной классификацией должны применяться дескриптивные, самонастраивающиеся и самоорганизующиеся параметрические многомерные динамические модели, обладающие свойствами непрерывности, линейности по параметрам и нелинейности по переменным, стационарности и стохастичности, работающие во временной области.

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 обыкновен-

ные дифференциальные уравнения для дискретного контрольного объема, где свойства изменяются только по направлению потока.

Таким образом, более быстрые динамические процессы позволяют значительно упрощать модели, построенные для их анализа человеком с помощью систем контроля и управления.

В этом случае 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 [11].

Допустимость достаточно больших отклонений временных характеристик при моделировании технологических процессов с точки зрения психофизиологических свойств оператора можно объяснить следующим. По современным представлениям, у человека нет специального временного анализатора, равнозначного по физиологическому смыслу зрительному или слуховому [12]. 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 [13, 14], так и зарубежными материалами [15, 16, 17].

Пренебрежение принципами системного анализа приводит к тому, что разработчик модели такой 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 [11]).

Таким образом, «борьба» некоторых российских тренажеростроительных фирм с упрощениями при моделировании энергообъектов [18, 19] с целью улучшения «внутренних качеств тренажеров» носит, по нашему мнению, лишь спекулятивный, коммерческий и рекламный характер, относящийся скорее к области «ситуативной этики».

Выводы

1. Начальные и все последующие нормативные документы, касающиеся цифровых технологий тренажерных систем, имели целью обеспечение единства структуры и функций технических систем и средств для подготовки персонала энергопредприятий, энергосистем и

объединений отрасли. Однако, по ряду объективных причин (см. начало статьи) указанное единство практически не было достигнуто, что и определило снижение эффективности обучения персонала на тренажерах большинства разработчиков из-за отсутствия в моделях объекта регулирования таких основополагающих свойств как полномасштабность, всережимность, топологическая и параметрическая адекватность.

2. Таким образом, основной причиной недостижения поставленной цели принятыми нормативами был тот факт, что все они определяли только требования к готовому изделию и его подсистемам, а вопросы методологии разработки модели и ее цифровой (программной) реализации вообще не рассматривались.

3. Объективность причин сложившегося в тренажеростроении положения объясняется, по нашему мнению, следующим. Классификация видов моделей в современной теории моделирования определяет то, что имеется, как минимум, 2^{10} имитационных моделей, определенных на основе бинарных альтернативных соотношений типов: детерминированные — стохастические, статические — динамические, непрерывные — дискретные и т. д. Получаем, что только имитационных моделей, определенных на основе бинарных соотношений, имеется $2^{10}=1024$ типов, а с учетом других типов моделей (аналитические, физические, информационные и т. д.), а также разнообразия применяемых критериев, методов решения систем уравнений и т. п., получим огромное множество вариантов описания технологического объекта.

4. Из этого «информационного моря» математических описаний энергообъекта не каждый «модельер» может уверенно выбрать на твердый «берег» системного подхода, основанного на принципах необходимости и достаточности, причем адекватность моделей которого определяется только физико-технологическим анализом. А в связи с тем, что адекватность математического описания объекта определяется только степенью верификации, то есть анализом технологическим, то и десять несведущих в технологии математиков сделают при моделировании не больше, чем один разбирающийся в математике технолог.

5. Очевидно, что в этом и кроется основное противоречие современного российского тренажеростроения, а именно: проектированием моделей технологического оборудования и процессов в нем занимаются по отдельности математики, специалисты по автоматике, программисты, системотехники, психологи, то есть любые специалисты, кроме технологов, владеющих вопросами устройства и режимов эксплуатации технологического оборудования.

6. То есть возникает следующая парадоксальная ситуация: люди, не обладающие профессиональными технологическими знаниями, создают технические средства для переподготовки и повышения квалификации специалистов-технологов.

Отсюда следует второй системный парадокс модели объекта, который состоит в том, что принципиально невозможно сформулировать критерий

приближения к реальному объекту его модели, по которому будет синтезироваться алгоритм ее рекурсивной идентификации, если неизвестен этот алгоритм.

7. Таким образом, для преодоления «порочного круга» второго системного парадокса модели объекта необходимо разработать новый нормативный методологический документ, в котором была бы раскрыта цель его разработки, а именно: обеспечение единства методологии разработки структуры и функций цифровых технологических систем для подготовки персонала энергопредприятий.

Список использованных источников

1. Магид С. И., Загреддинов 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.
2. 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.
3. РД 34.12.303. Основные технические требования к комплексным тренажерам для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков тепловых электростанций 1988.
4. Нюберг Н. Д. О познавательных возможностях моделирования. В кн.: Математическое моделирование жизненных процессов. М.: Мысль 1968.
5. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка Л. П. Проблемы и научно-технические принципы современного компьютерного моделирования технологических объектов для тренажеров оперативного персонала // Надежность и безопасность энергетики 2009; 1(4): 27–35.
6. А. с. СССР №1128286. Тренажер для обучения оператора энергетического объекта / С. И. Магид, С. С. Токаев, Н. И. Серебряников и др. // Оpubл. БИ. 1984; 45.
7. Изоморфизм. Философская энциклопедия 1962; (2).
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. Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. М.: МЭИ 1998.
10. Магид С. И., Оразбаев Б. Е., Камнев В. И., Ибрагимов И. М. Моделирование энергетических систем. М.: «Апарт» 2002.
11. Винер Н. Кибернетика. М.: Наука 1983.
12. Багрова Н. Д. Фактор времени в восприятии человеком. Л.: Наука, 1980.
13. Бичаев Б. П. Метод определения допустимой погрешности моделирования параметров, используемых для оценки обучаемых в тренажерах // Управляющие системы и машины 1980; (3).
14. Плютинский В. И., Охотин В. В. Методика оценки точности динамических моделей тренажеров энергоблоков // Теплоэнергетика 1985; (10).
15. Arthorn C. H. Nuclear power plant training simulator // «ASEA-Journal». 1973; 46(3): 73.
16. Schwarz O., Schlegel G. Ausbildung von Kraftwerks personal fur fossilbefeuerte Kraftwerke an Simulatoren, Konzepton, Qualification

und Nutzen des KWS-Simulators. VGB Kraftwerkstechnik, 65 1985; 65 (2): 104–109.

17. American National Standard Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator Training ANSI/ANS-3.5-1985.

18. Теория и практика построения и функционирования АСУТП М. 2005.

19. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка Л. П. Зияющие высоты субъективизма и псевдопроблем при «сверхточном» аналитическом моделировании энергетических объектов // Надежность и безопасность энергетики 2009; 3(6): 28–36.

References

1. Magid S. I., Zagretdinov I. Sh., Mishcheryakov S. V., Arkhipova Ye. N., Samoylov V. L. Normalization of digital technologies of training simulator systems as a way to ensure the reliability of conditions of maintenance of electric power engineering facilities (part 1) // Safety and reliability of power engineering 2019; 12(3): 177–189.

2. RD 34.12.302 (CO 153-34.12.302). Instructions for building a set of training and simulator systems for training the operating personnel of TPP, NPP power units, power utility companies, power systems and associations. 1986.

3. RD 34.12.303. Basic technical requirements for integrated simulators for training the operating personnel of power units of thermal power plants. 1988.

4. Nyuberg N. D. On cognitive possibilities of simulation. In the book: Mathematical modeling of vital processes. M.: Mysl. 1968.

5. Magid S. I., Arkhipova Ye. N., Muzyka L. P. Problems and scientific-engineering principles of modern computer simulation of technological facilities for operational personnel training simulators // Safety and reliability of power engineering 2009; 1(4): 27–35.

6. USSR author's certificate No. 1128286. Simulator for training an

operator of a power engineering facility / S. I. Magid, S. S. Tokayev, N. I. Serebryanikov et al. // Publ. by BI. 1984; 45.

7. Isomorphism. Philosophic encyclopedia. 1962; (2).

8. Magid S. I., Arkhipova Ye. N., Muzyka L. P. Reliability of personnel as a key safety guarantee. // Safety and reliability of power engineering 2008; (1): 22–33.

9. Magid S. I. Theory and practice of simulator construction for thermal power plants. M.: MPEI. 1998.

10. Magid S. I., Orazbayev B. Ye., Kamnev V. I., Ibragimov I. M. Simulation of power engineering systems. M.: Apart. 2002.

11. Wiener N. Cybernetics. M.: Nauka. 1983.

12. Bagrova N. D. Time factor as perceived by humans. L.: Nauka, 1980.

13. Bichayev B. P. Method for determination of allowable error of simulation of parameters used for assessment of trainees in simulators // Controlling systems and machines 1980; (3).

14. Plyutinskiy V. I., Okhotin V. V. Methodology for estimation of accuracy of dynamic models of power unit simulators // Thermal power engineering 1985; (10).

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

16. Schwarz O., Schlegel G. Ausbildung von Kraftwerks personal fur fossilbefeuerte Kraftwerke an Simulatoren, Konzepton, Qualification und Nutzen des KWS-Simulators. VGB Kraftwerkstechnik, 65 1985; 65 (2): 104–109.

17. American National Standard Nuclear Power Plant Simulators for use in Operator Training ANSI/ANS-3.5-1985.

18. Theory and practice of construction and functioning of APCS. M. 2005.

19. Magid S. I., Arkhipova Ye. N., Muzyka L. P. Yawning heights of subjectivism and pseudo-problems in "super-precise" analytical simulation of power generation facilities. // Safety and reliability of power engineering 2009; 3(6): 28–36.

