

В ПАМЯТЬ О СЕРГЕЕ ИГНАТЬЕВИЧЕ МАГИДЕ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-86-99>
УДК 621.311

Обучающие системы и тренажеры в теплоэнергетике

Магид С. И.

АО «Тренажеры электрических станций и сетей»
Варшавское шоссе, д. 125Ж, корп. 6, 117587, г. Москва, Россия

Повторение статьи Надежность и безопасность энергетики. 2015 №2

Приведен анализ причин техногенной аварийности в РФ. Названы основные «внутренние» и «внешние» причины аварийности на опасных производственных объектах. Рассмотрены требования к обеспечению надежных, экономичных и безопасных режимов работы оборудования. Определена структура современной системы обучения персонала. Приведены научно-технические требования и рекомендации при моделировании эргатических распределенных систем для тренажеров эксплуатационного персонала энергетических объектов. Рассмотрены первые нормативные документы электроэнергетики СССР, регламентирующие требования к обучающим и тренажерным системам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техногенная аварийность, оперативный персонал, тренажерная подготовка, человеческий фактор, критерии научности, математическое моделирование, имитационные модели, системный подход

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

Для цитирования:

Магид С. И. Обучающие системы и тренажеры в теплоэнергетике. Надежность и безопасность энергетики. 2021. – Т. 14, №3. – С. 86 – 99.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-86-99>

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

For citation:

Magid S. I. [Training systems and simulators in thermal power engineering]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2021, vol. 14, no. 3, pp. 86 – 99 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-86-99>

Training systems and simulators in thermal power engineering

Magid S. I.

JSC «Simulators of power plants and networks»

bldg. 6, 125Zh, Varshavskoe shosse, 117587, Moscow, Russia

The article analyzes reasons of technogenic accidents in the RF. It mentions the key 'internal' and 'external' reasons of accidents at hazardous production facilities. The article deals with the requirements for ensuring reliable, economical and safe operating modes of the equipment. It sets forth a modern structure for personnel training. Certain scientific and technical requirements and recommendations are offered for simulation of ergatic distribution systems for trainers designed for operation personnel of power generation facilities. The article dwells upon the initial regulations of the power industry in the USSR that set forth the requirements for training and simulator systems.

KEY WORDS: technogenic accidents, operation personnel, simulator training, human factor, scientific criteria, mathematical simulation, simulation models, system approach

Анализ причин техногенной аварийности в РФ и определение принципов подхода к разработке современных тренажеров

Жизнеобеспечение человеческого сообщества в наше время в значительной степени зависит от поставок в места человеческого обитания топлива и электроэнергии. И если учесть факт взаимозависимости этих поставок, то массовые обесточения по своим последствиям могут быть приравнены к природным катаклизмам, угрожающим национальным экономикам и существованию миллионов людей.

Таким образом, фактор надежности электроэнергетики, то есть независимых субъектов рынка электроэнергии, приобретает приоритетное значение, особенно в современных российских условиях искусственного разделения на части единого технологического и единого временного процесса генерации, передачи и потребления электрической энергии.

Угрозы штатному функционированию энергообъекта, рассматриваемого как распределенная эргатическая система, могут исходить от следующих дестабилизирующих факторов.

— **Техногенных** (искусственных) дестабилизирующих факторов, а именно: отказы арматуры, отказы механизмов, разрывы трубопроводов, резервуаров воды, мазута, газопроводов, взрывы или пожары на технологическом оборудовании и т. д., и т. п.

— **Природных** (естественных) дестабилизирующих факторов, а именно:

- изменения воздействий внешней среды (качества топлива; температуры: наружного воздуха, охлаждающей воды; качества исходной воды и т. п.);
- природных катаклизмов (гололед, ураган, наводнение, пожар, землетрясение и т. п.).

— **Антропогенных** дестабилизирующих факторов (т. н. человеческий фактор), а именно:

- непрофессиональных действий специалистов по проектированию, изготовлению, монтажу, обслуживанию и ремонту технологического оборудования, АСУТП, тренажерных систем;
- террористических дестабилизирующих факторов.

По словам президента РФ Путина В. В.: «Ежегодно на ликвидацию последствий различного рода аварий и катастроф расходуется в России от 1,5 до 3% ВВП, а мировой ежегодный ущерб составляет около 150 млрд. долл. Доля техногенных катастроф в сумме чрезвычайных ситуаций в РФ уже превышает 70 процентов. Причем для предотвращения угроз аварий и катастроф необходимо рассматривать не только технологический и управленческий аспекты, но и человеческий фактор. Жизнь показывает, что большинство аварий происходит по вине человека» [1].

По данным Ростехнадзора [2] причины аварий на опасных производственных объектах (ОПО) (процент от общего количества аварий) следующие:

- несовершенство технологий — 13%;
- низкий уровень знаний — 11%;
- умышленное отключение защиты — 2%;
- нарушение производственной дисциплины — 15%;
- неэффективность производственного контроля — 13%;
- неправильная организация работ — 13%;
- нарушение технологий — 17%;
- неудовлетворительное состояние оборудования, зданий и сооружений — 16%;

Таким образом, аварийность на опасных производственных объектах (в том числе на электростанциях и сетевых предприятиях) в более чем 70% случаев определяется так называемым «человеческим фактором».

Указанное состояние аварийности обусловлено ростом сложности управления и напряженности работы персонала, значительным объемом физически и морально устаревшего оборудования, поступлением топлива пониженного или сильно меняющегося качества, недостаточной квалификацией персонала и нарушении правил производства оперативных переключений. Это «внешние» причины.

Анализ аварий по вине оперативного персонала позволяет назвать основные «внутренние» причины аварийности:

- отсутствие проверки профпригодности с учетом психофизиологических особенностей человека при отборе кандидатов в операторы;

- недостаточная теоретическая подготовка, вызванная разобщенностью изучаемых будущим оператором материалов;
- отсутствие систематизированных знаний о режимах работы оборудования и методах управления ими;
- недостаточный опыт управления как отдельными процессами, так и объектом в целом (оператор в период обучения не получает комплекса знаний, необходимых для успешного выполнения своих обязанностей);
- отсутствие навыков оперативного мышления, т. е. навыков построения причинно-следственных связей между показаниями приборов, а также информацией, отраженной на мнемосхеме или компьютере и ходом технологических процессов;
- отсутствие навыков предсказания аварийных ситуаций;
- повышенная утомляемость, вызываемая нерациональным построением щита управления или интерфейса АСУ, недостаточной связью с обходчиками, излишней напряженностью, связанной с неумением оператора анализировать и прогнозировать ситуации.

Количество технологических нарушений по вине персонала в зависимости от численности неподготовленного персонала (т. е. не прошедшего обучение на курсах и тренажерах) по округам РФ приведены на рисунке 1.

Анализ рисунка 1 позволяет сделать очевидный, но, тем не менее, необходимый вывод: чем больше персонала не охвачено обучением (подготовкой, тренажем), тем больше аварийность по вине персонала. Зависимость однозначно коррелирует аварийность почти по всем округам РФ, отсюда очевидно следует, что аварии допускает именно необученный персонал электрических станций и сетей.

Современное эффективное управление развитием человеческого потенциала с целью увеличения безопасности производства работ в промышленности, в том числе и в электроэнергетике невозможно без широкомасштабного применения информационных технологий (IT-технологий).

По данным Минтруда, в России только 5% работников обладает высоким уровнем квалификации, тогда как в США — 43%, а в Германии — 56% [3].

Одной из главных причин отставания современной системы поддержания и развития человеческого потенциала российской электроэнергетики от мирового уровня является тот факт, что состояние и возможности этой системы в начале XXI века уже не соответствует реалиям и тенденциям формирования системы развития человеческого потенциала в мировой электроэнергетике, ориентированной на все более широкое использование наукоемких технологий, информационных ресурсов общества, последних достижений в области информатики и электроники, а также компьютерных техноло-

гий информационно-телекоммуникационных систем.

И если считать, как и выше, указанные причины «внешними», то к «внутренним» — *организационным* причинам, по нашему мнению, следует отнести то, что:

- электрические станции и сети слабо оснащены современными техническими средствами обучения и тренажа персонала;
- нет утвержденных обязательных норм оснащения предприятий энергетики тренажерами и компьютерными средствами обучения и, как следствие, финансирование на эти цели выделяется по остаточному принципу;
- отсутствует научно обоснованная методика экономической оценки эффективности обучения оперативного персонала;
- не установлен контроль за техническими и программными средствами обучения и тренажа персонала на соответствие регламентам и стандартам РФ.
- отсутствует отраслевая система сертификации технических средств обучения персонала, соответствующая современному законодательству.

Сегодня «человеческий фактор» в человеко-машинных системах является одной из самых главных, основополагающих проблем нового века, решению которой посвящены многочисленные разработки, направленные на качественное улучшение пропорций во взаимодействии «человек-машина» в сторону человека, путем его *специальной подготовки (тренажа)*.

Это означает, прежде всего, поддержание у человека при всех условиях производственной деятельности *высокой готовности к действию*. Степень готовности к действию — важнейший показатель надежности человека как звена системы управления, так как она определяет эффективность и своевременность управления процессом в штатных ситуациях.

Вместе с тем, наиболее сложной и ответственной функцией деятельности человека является управление оборудованием в случае резких изменений режимов, приводящих к аварийному состоянию. В этом случае человек-оператор должен принимать ответственные решения, как правило, в условиях неполной информированности, неопределенности и дефицита времени.

Анализ инцидентов с ошибками персонала показывает, что наибольшее количество ошибочных действий совершается во время аварийных ситуаций, при пусках,

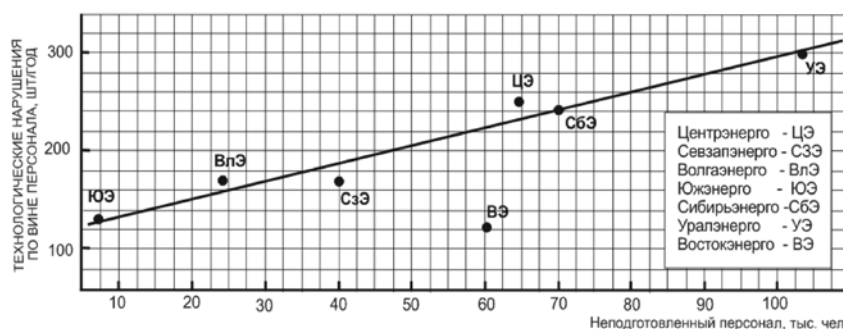


Рисунок 1. Зависимость технологических нарушений по вине персонала от численности неподготовленного персонала (по округам РФ).

остановах, при производстве плановых переключений и других воздействий на органы управления оборудованием. Частота ошибочных действий персонала зависит от его обученности навыкам управления оборудованием и готовности к парированию аварийных ситуаций.

Если навыкам проведения типовых и штатных переключений, с известными ограничениями, можно обучиться на реальном работающем оборудовании, то навыкам ликвидации нештатных и аварийных ситуаций невозможно обучиться без применения современных тренажеров, разработанных на базе информационных технологий.

Таким образом, развитие и закрепление способностей человека-оператора работать с высокой степенью готовности достигается целенаправленным обучением *на тренажерах в штатных режимах*, а также в условиях *предварийных и аварийных ситуаций*, максимально приближенных к реальным.

Чему учить оперативный персонал? Содержание «новой научной базы».

Чему же учить оперативный персонал электроэнергетики в современных условиях ее развития и реформирования? — задают вопрос менеджеры-кадровики, ежегодно разрабатывающие для ОГК, ТГК и проч. «новые» концепции подготовки персонала.

Да тому же, чему и всегда — *знаниям, умениям и навыкам*, причем и первое, и второе, и третье относятся только к эксплуатируемому оборудованию и режимам его работы в штатных и аварийных ситуациях.

Как известно, обеспечение надежных, экономичных и безопасных режимов работы оборудования достигается за счет:

- знания персоналом схем, устройства и конструкции энергетического оборудования;
- понимания персоналом технологических процессов;
- знания правил технической эксплуатации (ПТЭ), правил устройства электроустановок (ПУЭ), правил техники безопасности (ПТБ) и правил противопожарной безопасности (ППБ);
- обладания персоналом навыками планирования изменений штатных режимов и умениями (быстрой реакции) в нестандартных ситуациях при отказах оборудования.

Таким образом, требования к подготовке персонала, по существу, сводятся к двум позициям:

— **первая** — обеспечение знаний оборудования и процессов, правил технической эксплуатации (ПТЭ), правил устройства электроустановок (ПУЭ), правил техники безопасности (ПТБ) и правил противопожарной безопасности (ППБ),

— **вторая** — обеспечение навыкам умения качественно работать в штатных и аварийных ситуациях.

Исходя из этого, логично построить современную систему обучения персонала в двухступенчатом цикле:

- **первая ступень** (знания): изучение оборудования и технологических процессов, правил технической экс-

плуатации (ПТЭ), правил устройства электроустановок (ПУЭ), правил техники безопасности (ПТБ) и правил противопожарной безопасности (ППБ), с помощью специально разработанных компьютерных программ и экзамениров;

- **вторая ступень** (навыки и умения): обучение навыкам ведения штатных и аварийных режимов на специально разработанных тренажерах, адекватно имитирующих как рабочее место оператора, так и технологические процессы энергообъектов.

Сформулированный чрезвычайно простой и понятный подход к подготовке оперативного персонала при соответствующей регламентации со стороны отраслевых стандартов и других нормативных документов, поддержанный рыночными экономическими механизмами, то есть соответствующим финансированием, с гарантией обеспечит необходимую надежность работы эксплуатационного персонала электрических станций и сетей.

Указанный подход к подготовке персонала подтверждается и зарубежным опытом, в частности, вся система обучения оперативного персонала электроэнергетики в США и повышения его квалификации строится на получении знаний с помощью обучающих компьютерных программ (так называемое Web-обучение) и приобретение навыков и умений с помощью полномасштабных всережимных тренажеров [4].

Таким образом, по нашему мнению, научная новизна в подходе к кадровому обеспечению программы развития современной электроэнергетики должна относиться не к вопросу: «Чему учить?», а к вопросу: «Как и на чем учить?», то есть к вопросу разработки *действительно научных требований* к современной системе обучения персонала и к современным техническим средствам обучения.

Основными единицами образовательной матрицы являются технологические знания, а также современные информационные технологии (IT-тренажеры и IT-автоматизированные учебные курсы), способствующие формированию навыков и умений, которые включают обучаемого в реальный процесс управления энергетическими объектами.

Критерии научности, входящие в структуру научной методологии, призваны оценить все компоненты современного образовательного процесса персонала электроэнергетики на основании их соответствия или несоответствия стандартам науки. Критерии научности задаются набором предписаний, императивов, запретов и представляют собой совокупность экспертных установок.

В настоящее время, как правило, определяются следующие основные критерии естественнонаучной методологии: объективность, опытная подтверждаемость, рациональность, воспроизводимость, интерсубъективность, общезначимость, формальная непротиворечивость, когерентность.

Современные научно-технические требования при моделировании энергетических распределенных систем

для тренажеров эксплуатационного персонала энергетических объектов.

Основные проблемы, которые возникают при разработке математического и программного обеспечения современной тренажерной техники так или иначе связаны с:

- адекватным моделированием энергообъекта-прототипа, с учетом специфических свойств человека-оператора;
- моделированием и/или стимулированием¹ соответствующих систем контроля и управления;
- организацией системы обучения (функциональное обеспечение инструктора, — учебно-методическое обеспечение — УМО).

Перечисленные подсистемы определяют базовые составляющие структуры тренажера, рассматриваемого в качестве устройства, предназначенного для обучения человека-оператора, и требуют в постановочном плане отдельного рассмотрения и анализа.

В качестве первоочередной рассмотрим задачу адекватного моделирования энергообъекта-прототипа с учетом специфических свойств человека-оператора, т. е. адекватного отображения распределенных технологических эргатических систем.

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., Ротача В. Я., 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.

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 воспроизво-

дит 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 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) научно-познавательный процесс разработки моделей современного ИТ-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.

Таким образом, современные научно-технические требования и рекомендации при разработке методологии и реализации моделей эргатических систем энергообъектов для тренажеростроения, в нашем понимании [5–10], следующие:

1. 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.

2. Основным методом построения модели является редукция или сжатие информации.

Редукция информации означает поиски формы соотношений между различными массивами информации, то есть опознание структуры и функций моделируемой системы.

На основе выявленных и сформированных структур и функций возможны предсказания поведения системы с помощью моделей. Благодаря имитационным экспериментам с моделью можно разыгрывать разнообразные сценарии поведения реального объекта, то есть прогнозировать его реакции на любые входные воздействия, даже и на те, которые не встречались в действительности.

3. Широкое применение в современной методологии моделирования находит методика агрегирования

¹ стимулирование (*stimulation*, англ.) — метод воспроизведения операторской среды, при котором используется реальное системное аппаратное и программное обеспечение, модифицированное таким образом, чтобы оно могло надлежащим образом работать в среде тренажера.

грубых моделей. Основная идея агрегирования грубых (аналитических) моделей состоит в том, что начальное синтаксическое и 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.

4. Аналитическая модель — это, в общем случае, в энергетике — формула, представляющая математическую зависимость тепловых, гидравлических, аэродинамических, механических и электротехнических процессов в объекте моделирования, показывающая, что выходы модели находятся в функциональной зависимости от входов.

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.

5. Системная концепция фиксирует общие рамки модели, иначе говоря, она определяет структуру модели. Конкретная форма модели, в которой она уподобляется 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.

6. С точки зрения адекватности модели исходному объекту указанный подход гарантирует не только уменьшение избыточности при грубом аналитическом моделировании, но и такой синтаксис, то есть описание отношений между согласованными величинами в виде алгоритмов и формул модели, и такую семантику модели, то есть соответствие входных и выходных величин и состояний реальному объекту, при котором ее поведение будет адекватным поведению реального объекта.

7. Применительно к энергетике противоречие семантического содержания аналитической модели и эмпирических фактов 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, тепломассо-

обмена, 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 [11].

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.

8. Для преодоления указанных противоречий и проблем и создаются так называемые имитационные модели, которые с позиций классификации представляют некоторый симбиоз материальной и идеальной модели. То есть имитационную модель формально можно представить себе как идеальную (знаковую) модель, соединенную с материальным объектом (компьютером) и выраженную в виде программного обеспечения. Причем существенным признаком имитационной модели является способность ее к адаптации, то есть способность к преодолению противоречий между теоретическими познаниями и эмпирическими данными путем верификации и валидации. Естественно, что в таких условиях использование всей априорной информации практического изучения реальных процессов значительно ускоряет процесс получения 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.²

9. Методология решения проблемы управления

² По Дозорцеву В. М. (дополнительно к нашим доводам): «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» [12].

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 *организация 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* [13].

Причем «управление» осуществляется в соответствии с приемами и методами традиционной теории автоматического управления техническими объектами. Следует учесть, что основные положения этой теории исторически сформировались в связи с решением задач управления детерминированными объектами.

Под «регулированием» понимается *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 приведенное понятие «управление» не вызывает возражений, то определение понятия «регулирование» совершенно не соответствует тем функциям, которые оно реально выполняет на практике. Фактически регулированием является составная часть управления, цель которой состоит в устранении отрицательного влияния недетерминизма объекта на качество управления.

При этом безразлично, остается ли заданное значение управляемой величины постоянным, или оно как-то меняется во времени.

Недетерминизм объекта обусловлен действием неконтролируемых случайных возмущений и непредвиденным изменением динамических и статических свойств объекта.

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.

Таким образом, «управление» *квазидетерминированным энергообъектом в штатных режимах осуществляется с помощью традиционных АСУТП*.

Под термином «регулирование», исходя из вышеприведенных посылок, можно представить «управление» энергообъектом в условиях случайных помех и возмущений, т. е. в условиях недетерминированности. В этом случае объект может находиться в предаварийном состоянии; причем, чем больше помех и возмущений, тем ближе он к аварийному состоянию.

Аварийное состояние объекта характеризуется боль-

шой 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 интенсивное 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 и называем противоаварийным (контраварийным) управлением, или «контруправлением».

Таким образом, под термином «контруправление» мы понимаем такой *способ синтеза оптимальных целенаправленных воздействий на недетерминированный объект управления, находящийся в состоянии резкого изменения статических и динамических характеристик, который обеспечивает выполнение целей управления объектом с требуемым уровнем гарантий его безопасности*.

10. С точки зрения теории автоматического управления [13] 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.

В свою очередь этап проектирования должен содержать:

- выдвижение гипотезы о структуре закона управления;
- расчет оптимальных параметров выбранной структуры;
- разработку алгоритмов адаптации для завершения с их помощью процедуры синтеза на этапе ввода системы в действие, а также для коррекции настройки во время последующей эксплуатации при непредвиденном изменении свойств объекта.

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 дви-

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

Необходимость на этапе проектирования предварительного выдвижения гипотезы о структуре алгоритма управления определяется тем, что исходная модель объекта может быть достаточно хорошо аппроксимирована (с субъективной точки зрения проектировщика и произвольно принимаемого им критерия приближения) большим числом аналитических выражений. Соответственно может быть получено столько же оптимальных алгоритмов управления и регулирования, причем не исключено, что многие из них будут физически или технически нереализуемы.³

11. Имитационная модель является по существу программой для компьютера, а эксперимент над ней состоит в наблюдении за результатами расчетов по этой программе при различных задаваемых и вводимых экзогенных переменных. Имитационная модель должна обладать рядом присущих ей признаков, а именно, она должна быть динамической, то есть в модели как параметр обязательно должно присутствовать время, с другой стороны она должна быть адаптивной, ибо она корректируется и совершенствуется в процессе разработки и использования. Она может быть детерминированной, но чаще вероятностной (то есть содержащей стохастические элементы), а также содержать специальные блоки, где решения принимает человек.

³ По Дозорцеву В. М.: «При оценивании параметров в задачах управления модель должна приближать поведение объекта в эксперименте; но к тренажерам такой подход неприменим, поскольку эксперименты для большинства моделируемых режимов принципиально невозможны, а количество приближаемых переменных и проверяемых режимов чрезвычайно велико. Помимо всех технических трудностей, имеет место проблема воспроизводимости динамических (и, конечно, статических) режимов реального технологического процесса (ТП), близость к которым и должна обеспечивать тренажерная модель (ТМ). В практических условиях добиться «одинаковости» поведения ТП при «одинаковых» управлениях и внешних возмущениях невозможно: если об одинаковых управляющих воздействиях еще можно рассуждать хотя бы в теоретическом плане, то об одинаковости неуправляемых (а часто – и не наблюдаемых) возмущений говорить вообще не приходится. Более того, «лобовой» подход представляется некорректным и с постановочной точки зрения. Качество любой модели определяется существом решаемой с ее помощью задачи. Назначение компьютерного тренажера — формирование и закрепление навыков принятия операторских решений. В соответствии с принципом подобия такая задача может быть успешно решена, если моделируемая в тренажере деятельность оператора будет по своей функционально-информационной структуре соответствовать деятельности оператора по управлению реальным производственным объектом. Общеизвестно, что задача оператора – быстрое и надежное определение момента, когда система управления перестает справляться с поддержанием желаемого режима ТП, перевод управления на себя и грамотная компенсация нежелательных последствий отклонения режима [12].

Таким образом, имитационная модель представляет собой комплекс программного обеспечения, предназначенный для машинной имитации. Объединяет математическую (аналитическую) модель (или систему моделей), имитирующую исследуемый процесс, специальный набор алгоритмов и программ, разрабатываемый для данной системы и предназначенный для обеспечения возможности ее адаптации и эффективного диалога человека и компьютера, а также комплекс программ стандартного типа, который предназначен для того, чтобы решать возникающие в процессе имитации вспомогательные задачи типа ввода и вывода информации, накопления базы данных и т. п.

12. Машинная имитация 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).

13. Полное подобие имитационной модели объекту управления достигается при условии обеспечения однозначного количественного, качественного и временного соответствия тренажера реализации объекта управления при любом возможном возмущающем и управляющем воздействии.

Применительно к тренажерной технике имитация организуется, как правило, в форме диалога человека и машины. В этом случае у обучаемого появляется возможность, анализируя на ходу промежуточные результаты, как и на реальном объекте, менять те или иные управляющие параметры и тем самым — направление регулируемого процесса.

14. 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: «...событие, при котором система, начавшая свой процесс с неизвестного состояния, заканчивает 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» [14].

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. 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 [15].

Сказанное выше объясняется тем, что зрительное восприятие времени дискретно и минимальный квант времени примерно равен 50–100 мс. Грубая схема этой гипотезы такова: в мозгу имеется некий механизм, отмеряющий время и работающий с ритмом 8–10 в 1 с. Согласно теории сканирующего α -ритма, предложенной Уолтером [16], α -ритм представляет собой сканирующий механизм мозга и обусловлен движением волны возбуждения (восходящий эффект α -волны) по коре больших полушарий. Такой «просмотр» осуществляется в ритме 80–120 мс. В промежутках между волнами клетки недеятельны и сигнал, приходящий к ним, не может вызвать замыкания условной или безусловной связи. Таким образом, между двумя вспышками α -активности не имеет значения временной порядок появления сигналов, время здесь практически не имеет вектора.

Указанные психофизиологические особенности зрительного восприятия человеком-оператором пространственных и временных характеристик с учетом цели моделирования, т. е. создания модели с минимально различимыми человеком отличиями от объекта, определяют сущность предлагаемого метода, а именно, применение дифференцированного подхода к точности воспроизведения статических и динамических характеристик объекта моделирования.

Правомерность требования к точности статических и достаточно больших отклонений при моделировании динамических характеристик энергоблоков подтверждается как российскими исследователями [17, 18], так и зарубежными материалами [19–21].

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 [22].

15. Существенным моментом имитационного моделирования является проверка его истинности, то есть адекватности модели объекта моделирования — 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.

16. Современное, имитационное моделирование промышленных объектов (физико-статистическая идентификация) включает в себя два подхода: физико-технологический (аналитический) и функционально-статистический (верификация и валидация).

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 возмущении 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.

17. 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 (верификация), а также с оцениванием параметров и состояний модели объекта (валидация).

18. Исходя из требований предыдущих пунктов и применительно к моделированию энергообъектов в основу математического моделирования должен быть положен метод описания динамики процессов дифференциальными уравнениями, базирующимися на законах сохранения массы, количества движения и энергии для теплообменного и тепломеханического оборудования, законах Кирхгофа для электрических цепей и уравнениях Парка-Горева для генераторов.

Принцип системного подхода о необходимости и до-



Рисунок 2. Классификация процедур моделирования по уровням адекватности.

статочности в примененной методологии позволяет отразить все технологические особенности оборудования, его топологическую полноту и одновременно достичь приемлемой скорости счета.

Исходные «грубые» модели процессов в оборудовании базируются на нормативных методиках и коэффициентах уравнений, взятых также из нормативных материалов (рисунок 2).

Далее в соответствии с мировой практикой моделирования и тренажеростроения производится синтез «тонких» моделей, то есть верификация «грубых» моделей по имеющимся в распоряжении разработчика экспериментальным данным.

И, наконец, последним этапом моделирования является адаптация (валидация) «тонких» моделей к объекту-прототипу по экспериментальным данным энергообъекта и тестирования их совместно с оперативным и эксплуатационным персоналом.⁴

Указанные этапы и определяют уровень адекватно-

сти математической модели для тренажера⁵, а значит и соответствие таким современным критериям науки, как объективность и опытная подтверждаемость.

Нормативные документы, регламентирующие требования к техническим средствам обучения персонала электроэнергетики

Приведенные выше научно-технические требования, выдвигаемые при моделировании эргатических распределенных систем, являются лишь общим консолидированным мнением научного и экспертного сообщества и становятся подзаконным нормативным актом только лишь после публичного обсуждения и утверждения уполномоченными органами в виде стандарта, норм, указаний и пр.

Одним из первых нормативных документов электроэнергетики СССР, регламентирующих требования к техническим средствам обучения (ТСО) стали «Указания по построению комплекса обучающих и тренажерных систем для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков ТЭС, АЭС, предприятий электросетей, энергосистем и объединений» [23] (далее — «Указания»), утвержденные заместителем министра Минэнерго СССР Дьяковым А. Ф. 17.06.1986 г.

«Указания» были разработаны экспертной рабочей группой Минэнерго СССР во главе с Долгоносвым Н. С., в состав которой входили представители

⁴ По Дозорцеву В. М.: «На стадии восстановления параметров модели из системы тренажерных моделей (СТМ) выделяется конкретная ТМ путем задания значения ее параметров. Условия, позволяющие параметризовать ТМ, вытекают из информации о статических и динамических режимах моделируемого ТП. Эту информацию можно получить из разнообразных источников: технической документации, регламентных данных о штатных режимах ТП, оцифрованных показаний датчиков, исторических трендов технологических переменных, лабораторных анализов и, наконец, оценок экспертов (последние являются определяющими при создании ТМ, поскольку исходят непосредственно от будущих пользователей тренажеров)» [12].

⁵ Количественная оценка адекватности модели объекта проводится по энтропийному значению вариации переменных, т. е. по обобщенному информационно-экспертному критерию [5].

Главтехуправления, ПО «Союзтехэнерго», ПО «Атомэ-нергоналадка», ВТИ, ВНИИЭ, ЦКБ «Союзэнергоавтоматики», «Атомтеплоэнергопроекта», Энергосетьпроекта, ГИВЦ Минэнерго УССР, УТЦ Трипольской ГРЭС, Мосэнерго (ОЗАП, Мосэнергоналадка), в том числе и один из авторов настоящей статьи.

В «Указаниях» был обобщен опыт создания центров тренажерной подготовки, пунктов, тренажеров, обучающих вычислительных систем и учебных материалов, накопленного в Минэнерго СССР в период с 1972 по 1986 гг. [24–27].

Целью разработки «Указаний» являлось обеспечение единства структуры и функций технических систем и средств для подготовки персонала энергопредприятий, энергосистем и объединений.

Обучающие и тренажерные системы предназначались для подготовки эксплуатационного персонала в учебно-тренировочных центрах (УТЦ) и учебно-тренировочных пунктах (УТП), а также в учебных комбинатах при районных энергетических управлениях, в специализированных организациях, в институтах повышения квалификации, в высших учебных заведениях, техникумах, профессионально-технических училищах и т. п. При этом в полном объеме эти системы применялись в УТЦ и УТП, предназначенных для подготовки *оперативного* персонала. Для подготовки *неоперативного* персонала энергоблоков ТЭС, АЭС, предприятий электросетей, энергосистем и объединений те же обучающие и тренирующие системы использовались в *частичном объеме* на основе обучающих программ, ориентированных на *конкретную профессию*.

Следующим этапом в развитии нормативной базы российского (советского) тренажеростроения стала разработка «Основных технических требований к комплексным тренажерам для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков тепловых электростанций» [28], утвержденных Минэнерго СССР 21.05.1988 г.

«Основные технические требования» (ОТТ) уточняли, расширяли и конкретизировали положения и определения вышеприведенных «Указаний» и были предназначены для использования *заказчиками и разработчиками* тренажеров в целях определения *обязательных минимальных требований и критериев*, которым должен отвечать комплексный тренажер.

Итак, как же определялось понятие «тренажер» согласно нормативам («Указания» и ОТТ) и каковы были *те обязательные минимальные (!) требования и критерии*, которым должен он соответствовать? Ответы на указанные вопросы можно получить из рассмотрения таблицы 1.

Таковы были *обязательные минимальные требования к тренажерам и критериям их приемки*, которые регламентировались «Указаниями» и «Основными техническими требованиями».

Столь подробное рассмотрение содержания вышеприведенных нормативных документов объясняется тем, что указанные документы определили на будущее *основные принципиальные положения нового в то время направления — тренажеростроения* не только в

электроэнергетике для тепловых, атомных и гидравлических электростанций, но и в других отраслях промышленности.

Таким образом, новые нормативные документы регламентировали принципиальные требования к тренажерам как техническим средствам обучения по следующим разделам:

- *составление тезауруса;*
- *классификация тренажеров;*
- *определение структуры тренажера, как системы обучения персонала;*
- *определение требований к модели объекта-прототипа:*
 - *к составляющим общей адекватности;*
 - *к математической модели (принципам моделирования);*
 - *к масштабируемости процесса и дидактическим режимам (ускорение, замедление, замораживание, реализация снимков и возврата);*
 - *к параметрической точности статических и динамических режимов и учету погрешностей системы измерения;*
 - *к имитации исходных состояний объекта-прототипа;*
 - *к имитации штатных режимов объекта-прототипа (пусковых, остановочных, регулировочных);*
 - *к имитации нештатных и аварийных режимов;*
- *определение требований к системе управления;*
- *определение требований к рабочему месту оператора;*
- *определение требований к системе обучения;*
 - *к рабочему месту инструктора;*
 - *к вводным характеристикам;*
 - *к системе контроля и протоколирования;*
- *определение требований к приемочным испытаниям и критериям приемки.*

Следует отметить, что профессиональный состав рабочей группы Минэнерго СССР, разрабатывавшей указанные нормативы, был на то время *максимально компетентным* и включал в себя представителей всех ведущих научных, проектных, машиностроительных, пусконаладочных и эксплуатационных организаций энергетики СССР.

Прошли годы, разработаны и приняты новые стандарты, нормативы, технические условия, но *основные минимальные* требования остались и практически внесены во все отечественные и зарубежные нормативы. И, как верно выразился блестящий аналитик тренажерной подготовки «Интер РАО-Электрогенерация» Зенков А. Н. о двух рассмотренных нормативных документах: «требования к объему имитации в тренажере оборудования, режимов его работы с изложением принципов их определения — достойны нанесения на «скрижали» тренажеростроения».

Выводы

1. Аварийность на опасных производственных объектах (в том числе на электростанциях и сетевых пред-

Таблица 1. Обязательные минимальные требования и критерии к тренажерам эксплуатационного персонала энергопредприятий.
согласно нормативам («Указания» — РД 34.12.302 и ОТТ — РД 34.12.303).

№ п/п	Подсистема	Требования и критерии
1.	Определение понятия «тренажер»	Техническое средство подготовки персонала, реализующее логико-динамическую и (или) функциональную модель оборудования (блок, котел, турбина, генератор, участок и т. п.) и осуществляющее контроль качества тренировки. Предназначен для формирования навыков и умений управления энергооборудованием.
2.	Классификация	Тренажеры подразделяются по разным признакам на комплексные, специализированные, универсальные, групповые, индивидуальные, передвижные, стационарные, автоматизированные и неавтоматизированные.
3.	Состав тренажера	В состав тренажера должны входить: моделирующее устройство; рабочее место обучаемых (обучаемого); рабочее место обучающего (инструктора); аппаратура контроля подготовки.
4.	Моделирующее устройство тренажера	Должно обеспечивать: воспроизведение с оговоренной точностью потока информации, предъявляемой обучаемым в установленном масштабе времени; возможность временной остановки процесса обучения и возврата в начало учебной задачи с последующим повторением в заданном масштабе времени; возможность изменения сложности учебных задач в процессе тренировки; моделирование типовых неисправностей и возмущений.
5.	Рабочее место обучаемых (обучаемого)	Должно воспроизводить зрительную и акустическую обстановку, соответствующую рабочему месту оперативного персонала и адекватно связанную с алгоритмом деятельности. На рабочем месте должны быть предусмотрены средства отображения информации об ошибках, допущенных обучаемым в процессе выполнения учебной задачи и управления параметрами учебно-тренировочного процесса в режиме самообучения. Имитируемые панели и пульта управления должны воспроизводить размеры, форму, цвет и конфигурацию оборудования БЩУ энергоблока-прототипа. Аппаратные средства на имитируемых панелях и пультах БЩУ должны воспроизводить аппаратуру, находящуюся на БЩУ энергоблока-прототипа.
6.	Рабочее место инструктора	Инструктор должен иметь рабочее место, оборудованное необходимыми средствами отображения информации, управления и связи для эффективного контроля и управления процессом тренировки.
7.	Контроль подготовки обучаемых	Аппаратура контроля подготовки должна обеспечивать: регистрацию и анализ информации, необходимой для определения качества работы отдельных обучаемых; формирование информации о качестве деятельности обучаемых и оперативное предъявление ее на рабочие места обучаемых и обучающего.
8.	Модель объекта управления	При моделировании объекта управления следует использовать основные физические законы и соответствующие уравнения, описывающие процессы, которые происходят в объекте управления при различных режимах его работы.
9.	Точность моделирования, погрешность приборов	Точность моделирования должна определяться относительно полного значения шкалы (для параметров, измеряемых с помощью аналоговых датчиков) или расчетного значения параметра при номинальной мощности. Параметры, отображаемые на приборах БЩУ, должны учитывать дополнительную погрешность прибора, которая добавляется к расчетным значениям. Точность моделирования должна определяться как минимум в трех точках диапазона мощности.
10.	Информационная система тренажера	Тренажер должен иметь систему для автоматического сбора, хранения и вывода информации, относящейся к работе оператора во время обучения на тренажере.
11.	Имитация нормальных режимов	К нормальным режимам, наряду с работой энергоблока при максимальной и близкой к максимальной нагрузках при номинальных параметрах пара, относятся все основные переходные режимы, планируемые заранее, возникновение которых не связано с неисправностью оборудования или систем управления, а также с ограничениями в источниках тепла, охлаждения, воды и т. п.
12.	Имитация начальных режимов работы	Тренажер должен иметь как минимум 20 начальных режимов работы, которые должны отражать различные рабочие состояния энергоблока.
13.	Имитация нарушений в работе	Режимы с нарушениями работы оборудования должны имитироваться, как правило, с помощью тех же моделей, которые применяются при моделировании нормальной работы энергоблока-прототипа путем изменения параметров моделей и предельных условий и путем добавления моделей для специальных эффектов.
14.	Имитация неисправностей	Должна быть обеспечена возможность введения в программу и вывода удобным способом неисправностей. При этом должна быть предусмотрена возможность имитации одновременных и последовательных неисправностей в любой реалистичной комбинации. Введение неисправности не должно сопровождаться появлением информации, отличающейся от встречающейся на энергоблоке-прототипе.
15.	Имитация аварийных режимов работы	Тренажер должен быть способен имитировать в реальном времени аварийные и другие режимы с нарушением работы оборудования, являющиеся следствием различных неисправностей, в целях демонстрации характерной реакции энергоблока и функционирования его системы контроля и управления.
16.	Адекватность тренажера	Ответная реакция тренажера на его информационном поле на любые действия оператора, отсутствие действий с его стороны, неправильные его действия и действие систем авторегулирования, защит и блокировок должны совпадать с реальными в пределах установленных границ эксплуатационных характеристик до такой степени, чтобы опытный оператор не заметил разницы между реакцией систем отображения информации на рабочих местах тренажера и энергоблока-прототипа.
17.	Эксплуатационные свойства тренажера	Должны быть проверены путем их сравнения с соответствующими характеристиками энергоблока-прототипа при работе в нормальных режимах и режимах с нарушением работы оборудования. Требования к эксплуатационным свойствам должны обеспечить правильное понимание оператором ситуаций и условия для правильных с его стороны действий в этих ситуациях.

Таблица 1 (продолжение).

№ п/п	Подсистема	Требования и критерии
18.	Масштаб времени, дидактические режимы	Тренажер должен иметь возможность имитации в реальном, ускоренном и замедленном времени, замораживания, реализации снимков и возврата.
19.	Приемочные испытания	Приемочные испытания тренажера проводятся путем сравнения параметров на БЩУ тренажера с экспериментальными данными по энергоблоку-прототипу.
20.	Критерии приемки тренажера	Критерии приемки касаются только тех параметров, которые отображаются на БЩУ. В качестве критериев приемки должны применяться следующие: • Погрешность прибора тренажера не должна превышать погрешности соответствующего прибора, датчика и соответствующей системы измерения энергоблока-прототипа. • Изменение (дрейф) рассчитанных тренажером значений параметров для стационарного режима при полной мощности и работе систем автоматического регулирования не должно превышать +/- 2% в течение 60 мин. • Рассчитанные тренажером значения основных технологических параметров должны соответствовать параметрам энергоблока-прототипа с точностью +/- 2%. • Основные параметры: мощность энергоблока, давление свежего пара, температура свежего и вторично перегретого пара, уровень в барабанах (для барабанных котлов), давление до ВЗ (для прямоточных котлов). • Рассчитанные значения вспомогательных технологических параметров, относящихся к эксплуатации энергоблока и отображающихся на панелях и пультах БЩУ тренажера, должны соответствовать параметрам энергоблока-прототипа с точностью +/- 10%. • Должны анализироваться основные параметры каждого переходного режима. Изменения основных параметров во времени должны быть разделены на зоны, ограниченные существенными событиями, которые происходят в течение всего переходного режима. Существенными событиями могут быть быстрые остановки, действия оператора, действия автоматики или достижение основными параметрами определенных значений.

приятных) в более чем 70% случаев определяется так называемым «человеческим фактором».

Указанное состояние аварийности обусловлено ростом сложности управления и напряженности работы персонала, значительным объемом физически и морально устаревшего оборудования, поступлением топлива пониженного или сильно меняющегося качества, недостаточной квалификацией персонала и нарушении правил производства оперативных переключений.

2. Современное эффективное управление развитием человеческого потенциала с целью увеличения безопасности производства работ в промышленности, в том числе и в электроэнергетике невозможно без широкомасштабного применения информационных технологий (IT-технологий).

По данным Минтруда, в России только 5% работников обладает высоким уровнем квалификации, тогда как в США — 43%, а в Германии — 56%.

3. Научная новизна в подходе к кадровому обеспечению программы развития современной электроэнергетики должна относиться не к вопросу: «Чему учить?», а к вопросу: «Как и на чем учить?», то есть к вопросу разработки действительно научных требований к современной системе обучения персонала и к современным техническим средствам обучения.

Основными единицами образовательной матрицы являются технологические знания, а также современные информационные технологии (IT-тренажеры и IT-автоматизированные учебные курсы), способствующие формированию навыков и умений, которые включают обучаемого в реальный процесс управления энергетическими объектами.

4. В соответствии с традиционной классической гносеологией (теорией познания) научно-познавательный процесс разработки моделей современного IT-тренажера заключается в переходе от вопроса к пробле-

ме, 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.

5. Принцип системного подхода о необходимости и достаточности в примененной методологии позволяет отразить все технологические особенности оборудования, его топологическую полноту и одновременно достичь приемлемой скорости счета.

Исходные «грубые» модели процессов в оборудовании базируются на нормативных методиках и коэффициентах уравнений, взятых также из нормативных материалов.

Далее в соответствии с мировой практикой моделирования и тренажеростроения производится синтез «тонких» моделей, то есть верификация «грубых» моделей по имеющимся в распоряжении разработчика экспериментальным данным.

И, наконец, последним этапом моделирования является адаптация (валидация) «тонких» моделей к объекту-прототипу по экспериментальным данным энергообъекта и тестирования их совместно с оперативным и эксплуатационным персоналом.

Указанные этапы и определяют уровень адекватности математической модели для тренажера, а значит и соответствие таким современным критериям науки, как объективность и опытная подтверждаемость.

6. Одним из первых нормативных документов электроэнергетики СССР, регламентирующих требования к техническим средствам обучения (ТСО) стали «Указания по построению комплекса обучающих и тренажерных систем для подготовки эксплуатационного персонала

энергоблоков ТЭС, АЭС, предприятий электросетей, энергосистем и объединений», утвержденные заместителем министра Минэнерго СССР Дьяковым А. Ф. 17.06.1986 г.

Целью разработки «Указаний» являлось обеспечение единства структуры и функций технических систем и средств для подготовки персонала энергопредприятий, энергосистем и объединений.

Следующим этапом в развитии нормативной базы российского (советского) тренажеростроения стала разработка «Основных технических требований к комплексным тренажерам для подготовки эксплуатационного персонала энергоблоков тепловых электростанций», утвержденных Минэнерго СССР 21.05.1988 г.

«Основные технические требования» (ОТТ) уточняли, расширяли и конкретизировали положения и определения вышеприведенных «Указаний» и были предназначены для использования заказчиками и разработчиками тренажеров в целях определения обязательных минимальных требований и критериев, которым должен отвечать комплексный тренажер.

Указанные документы определили на будущее основные принципиальные положения нового в то время направления — тренажеростроения не только в электроэнергетике для тепловых, атомных и гидравлических электростанций, но и в других отраслях промышленности.

Список использованных источников

1. Совместное заседание Совета безопасности и президиума Госсовета РФ 13 ноября 2003 г., «Известия», 14.11.2003 г.
2. Пуликовский К. Б. Приоритет качеству подготовки, профессиональному обучению и аттестации работников организаций, поднадзорных Ростехнадзору. // «Безопасность труда в промышленности», №7, 2006 год.
3. «Экономика и жизнь» № 6, 2007.
4. Русские вопросы и американские ответы саммита «Подготовка персонала в электроэнергетике США». / С. И. Магид, М. Ю. Львов, С. В. Мищеряков, Л. В. Сысоева, Е. Н. Архипова // Сборник статей под редакцией д. т. н., профессора Магида С. И. «Человеческий потенциал в электроэнергетике — обеспечение качества и надежности». Москва-Краснодар, 2005.
5. Магид С. И. Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. — М.: Издательство МЭИ, 1998. 156 с.
6. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка Л. П. Надежность персонала — одна из основных гарантий безопасности. // Надежность и безопасность энергетики. 2008. №1. С. 22–33.
7. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка А. П., Машков А. В. Проблемы и приоритеты проектирования тренажеров для подготовки персонала энергообъектов, оснащенных современными автоматизированными системами управления. // Надежность и безопасность энергетики. 2008. №2. С. 27–35.
8. 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. С. 27–35.
9. Магид С.И., Архипова Е. Н., Беляев В. И. Научная методология

в тренажерной подготовке персонала электроэнергетики РФ. // Сборник статей под редакцией д. т. н., профессора Магида С. И. «Энергобезопасность и тренажерная подготовка», Москва-Краснодар, 2007. С. 7–28.

10. Магид С. И., Архипова Е. Н., Музыка Л. П. Зияющие высоты субъективизма и псевдопроблем при «сверхточном» аналитическом моделировании энергетических объектов. // Сб. «Развитие кадрового потенциала современной энергетики России» Майкоп, 2009 г.

11. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 416 с.

12. 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.

13. 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.

14. Винер Н. Кибернетика. М.: Наука, 1983. 340 с.

15. Багрова Н. Д. Фактор времени в восприятии человеком. Л.: Наука, 1980. 96 с.

16. Уолтер Г. Живой мозг. Пер. с англ. М.: Мир. 1966. 300 с.

17. Бичаев Б. П. Метод определения допустимой погрешности моделирования параметров, используемых для оценки обучаемых в тренажерах // Управляющие системы и машины. 1980. № 3. С. 117–120.

18. Плютинский В. И., Охотин В. В. Методика оценки точности динамических моделей тренажеров энергоблоков // Теплоэнергетика. 1985 №10. С. 19–22.

19. Arthorn C. H. Nuclear power plant training simulator // «ASEA-Journal» 1973. Vol. 46. №3. P. 73.

20. Schwarz O., Schlegel G. Ausbildung von Kraftwerks personal fur fossilbefeuerte Kraftwerke an Simulatoren, Konzepten, Qualifikation und Nutzen des KWS-Simulators. VGB Kraftwerkstechnik, 65, Heft 2, Februar 1985. S. 104–109.

21. Elliott N. S., Ferrell W. G. Nuclear plants get «hi-fi» simulators. Electrical World. 1981. Vol. 195. №9. P. 103–104.

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

23. РД 34.12.302 (ГО 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.

24. Магид С. И., Долгонос Н. С. Новые методы и средства подготовки оперативного персонала на электростанциях. Экспресс-информация. Серия: эксплуатация и ремонт электростанций. Вып. №9. М. 1985. С. 35–42.

25. Магид С. И., Долгонос Н. С. Опыт разработки и внедрения модели котла ТГМП-314 для тренажеров МОСЭНЕРГО. Экспресс-информация. Серия: эксплуатация и ремонт электростанций. Вып. №8. М. 1985. С. 16–21.

26. Авторское свидетельство СССР №1128286. Тренажер для обучения оператора энергетического объекта / С. И. Магид, Н. С. Долгонос и др. 1984.

27. Авторское свидетельство СССР №1238136. Тренажер оператора котельной установки / С. И. Магид, Н. С. Долгонос и др. 1986.

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