Department «Technical educational
systems in energy technologies»

TEST UNESCO

«Тренажеры электрических
станций и сетей»

АО ТЭСТ

Магид С. И., Архипова Е. Н.

Тренажерная подготовка персонала энергетики

Москва 2017 г.

Магид С. И., Архипова Е. Н.

Тренажерная подготовка персонала энергетики.

История. Состояние. Нормы.

Москва

Издательство «Энергобезопасность»

2017 г.

УДК 621.311.22

ББК 31.37

М 125

Рецензент д.т.н., проф. НИУ «МЭИ» В. В. Куличихин

Магид С. И., Архипова Е. Н.

М 125 Тренажерная подготовка персонала энергетики. — М.: Издательство «Энергобезопасность», 2017. — 158 с.: ил.

ISBN 978-5-600-02001-6

Изложена история развития и современное состояние зарубежной и отечественной техники для обучения и переподготовки оперативного, обслуживающего и ремонтного персонала современных тепловых и атомных электрических станций. Особое внимание уделено осуществлению Тренажерного проекта в энергосистеме Мосэнерго. Представлены основы методологии разработки системы оперативных (тренажерных) логико-динамических моделей оборудования и процессов генерации, трансформации и распределения электрической энергии и тепла на электрических станциях, сетевых и потребляющих предприятиях. Большое внимание уделено развитию и формированию новой, современной системно-имитационной методологии и современным научно-техническим требованиям при моделировании энергетических распределенных иерархических систем для тренажеров оперативного и эксплуатационного персонала энергетических объектов. Рассмотрены вопросы качества моделирования энергетических объектов при разработке тренажеров и эффективности технических средств обучения в процессе их эксплуатации и сертификации, а также вопросы организации современной системы обучения персонала с помощью технических средств и современных научных требований к указанной системе. Приведены примеры практической реализации тренажеров на ТЭС и АЭС. Особое внимание уделено вопросам нормативно-правового обеспечения средств тренажерной подготовки персонала предприятий электроэнергетики.

Для специалистов учебных центров электроэнергетики, научных работников энергетических и политехнических университетов, специалистов в области тренажеростроения, эксплуатационного персонала электростанций, студентов старших курсов, бакалавров, магистров и аспирантов теплоэнергетических и электроэнергетических специальностей.

УДК 621.311.22

ББК 31.37

ISBN 978-5-600-02001-6

DOI: 10.24223/978-5-600-02001-6

© Магид С. И., Архипова Е. Н., 2017

*Устойчивое развитие каждой
станы имеет свою цену.*

*Современная поговорка
экспертов UNESCO*

*Нельзя ввести точность в раз-
суждения, если она сначала не
введена в определения*

Д. Гершель

In medias res. Зри в корень

К. Прутков

Введение. Человеческий фактор и надежность электроэнергетики.

Современная проблема взаимоотношения человека и техники, заключающаяся в основном противоречии между все усложняющейся техникой и неизменными с древности свойствами и возможностями человека, приводит к значительному увеличению влияния «человеческого фактора» на общую надежность человеко-машинных систем. 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).

Другая, еще более глобализированная проблема состоит в том, что не только устойчивое развитие, но и само 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 (человеко-машинная) 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 нарушением 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.

Рисунок 1. Зависимость технологических нарушений по вине персонала от численности неподготовленного персонала. (Данные Департамента генеральной инспекции РАО «ЕЭС России»).

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 технологий 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.

Система *специальной подготовки (тренажа)* 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, 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 *предаварийных и аварийных ситуаций*, максимально приближенных к реальным.

1. Краткая история развития, современное состояние зарубежной и отечественной тренажерной техники.

1.1. Терминология.

Что же такое **тренажер**? Что означает это слово?

Справка.

Слово происходит от английского **train** — **тренировать, обучать**.

Русский энциклопедический словарь 1890 года «Брокгауз и Ефрон» [4]: **«Тренировка** — такъ называется воспитаніе организмовъ (главнымъ образомъ животныхъ, особенно же лошадей), направленное къ достижению известныхъ целей (напр., къ развитію у лошади быстроты, у атлетовъ — мускула, у велосипедистовъ — выносливаго и быстрого хода и т. п.) и, соответственно этому, соединенное съ употребленіемъ известныхъ приемовъ, могущихъ оказать на организмъ желательное действие».

Ровно 100 лет спустя — 1990 год «Русский энциклопедический словарь» [5]: **«Тренажер: учебно-тренировочное устройство для выработки навыков и совершенствования техники управления машиной (механизмом)».**

Там же: «Навык — действие, сформированное путем повторения, характеризующееся высокой степенью освоения и **отсутствием поэлементной сознательной регуляции и контроля**».

1.2. Авиационные тренажеры.

Энциклопедия «Britanica» 1998 год [6]: **«Авиационные тренажеры** (англ. *flight simulator*) — электронная или механическая система для тренажа летчиков или космонавтов в условиях полной имитации полета».

Первые тренажеры были связаны с авиацией. Причина: высокая цена ошибки и требование действий по управлению машиной, доведенных до автоматизма, желательно на устройстве, находящемся на земле.

Первый авиационный тренажер был построен в Англии в 1910 году. Однако достаточно эффективный тренажер был создан Эдвином А. Линком

лишь в 1927 году для обучения летчиков США в специализированном центре под Нью-Йорком.

После открытия коммерческих авиалиний в США в 1934 году усовершенствованный тренажер Линка получает широкое распространение.

Однако, на первых порах, вокруг применения тренажеров велась большая дискуссия. Некоторые специалисты категорически отрицали полезность наземной подготовки из-за низких технических возможностей авиационных тренажеров того времени. Они требовали от тренажеров обязательного «ощущения полета», без чего, по их мнению, нельзя сформировать навыки и умения выполнять дозированные движения и реализовывать дозированные усилия. Очевидно, что возможности техники того времени не позволяли выполнять эти требования.

В конце 30-х и начале 40-х годов руководство отдела Специальных устройств ВМС США собрало по этому вопросу мнение большинства крупных ученых, в числе которых был **Альберт Эйнштейн**. Специалисты высказались за безусловное внедрение наземных авиационных тренажеров в практику обучения летного состава.

Мощный толчок в тренажеростроении дала Вторая мировая война. И в Англии и в США создаются новые, более приближенные к реальности, тренажеры.

Статистические исследования английских ученых, проведенные во время войны показали, что 85% как английских, так и немецких летчиков погибают не от попадания в самолет зенитных и др. снарядов, а от неумелых и неправильных действий по управлению самолетом в боевой обстановке.

Бесспорным доказательством высокой эффективности тренажеров является тот факт, что использование их в ВВС США во время Второй мировой войны позволило ежегодно сберечь не менее 524 жизней, около 133 млн. долл. США, 31 млн. чел./часов и высвободить около 15 тыс. человек для выполнения других военных задач. Причем наибольшая эффективность достигалась в тех случаях, когда тренажеры использовались для подготовки пилотов до принятия самолетов на вооружение.

В 50-е годы на основе аналоговой техники создаются тренажеры для Военно-воздушных сил США, полностью имитирующие кабину самолета и управление полетом в реальных условиях.

В 60–70-е годы после изобретения цифровой электроники на базе гибридных цифро-аналоговых устройств делаются еще более совершенные моделируемые системы.

И, наконец, в 80–90-х годах на основе компьютерной программной технологии создаются тренажеры, еще более приближенные к реальной жизни. Однако во всех реализациях авиационной тренажерной техники тре-

бование к адекватной конструкции кабины пилота является обязательным.

Такова вкратце история авиационного тренажеростроения в Англии и США [7].

В нашей стране авиационные тренажеры появились в середине 30-х годов. В 1936 году старший лейтенант Панов А. Г. сконструировал и построил подвесную кабину, позволяющую в наземных условиях проводить отработку пилотирования при выполнении таких важных маневров, как развороты, вираж, пикирование и даже посадка. Несколько ранее появились другие тренажеры, отличающиеся, главным образом, схемой подвески кабины. Так, например, были созданы тренажеры типа «журавль» и «штырь». Начал внедряться и тренажер Линка [8]. Дальнейшее развитие отечественных авиационных тренажеров примерно совпало с зарубежным.

1.3. Тренажеры в промышленности США.

В промышленности США развитие тренажеростроения происходило следующим образом.

В 1958 году в США с целью поощрения изучения точных наук, математики и инженерного дела был принят закон «National Defense Education Act» («Закон об образовании для нужд национальной обороны»).

Закон призван создавать равные возможности для получения образования в стратегически важных областях науки и техники. По этому закону студентам могут предоставляться займы для получения образования.

Половина суммы займа не подлежит возврату, если выпускник в течение пяти лет после окончания работает по специальности или преподает в колледже. По этому закону также выделяются средства для выплаты стипендий аспирантам и приобретения оборудования для муниципальных школ (Public School) и в том числе тренажеров для учебных центров (Center Training).

В соответствии с указанным законом получил развитие и такой новый тип организации исследований (но одновременно и образования, а также связи исследовательской сферы с производственной), как учебно-научные комплексы.

Один из таких учебно-научных комплексов был создан в течение 60-х годов в районе Dallas — Fort Worth (Даллас — Форт Уэрт, штат Техас). Он не только стал фактически первым крупным центром науки в этом штате, но и обеспечил потребности промышленных корпораций «Тексас инструментс», «Коллинз рэдио», «Сан ойл» и других в научных и профессионально-технических кадрах [9].

Аналогичный учебно-научный комплекс был создан примерно тогда же для удовлетворения потребностей электроэнергетической промышленности в профессиональных кадрах при научно-исследовательском энерге-

тическом институте EPRI (Energy Power Research Institute) г. Шарлотт, штат Северная Каролина.

В сфере деятельности научно-исследовательского энергетического института EPRI фактически присутствуют два основных направления [10]:

- собственно исследовательская работа по современной проблематике тепловых и атомных электрических станций;
- подготовка оперативного персонала для тепловых и атомных электрических станций.

Первое научно-исследовательское направление деятельности EPRI в основном связано с дефектоскопией сварных соединений и металлографическими исследованиями трубопроводов, лопаток турбин и т. п., то есть проводятся углубленные исследования надежности-прочностных характеристик оборудования электрических станций.

Все работы исследовательского характера производятся по заявкам энергокомпаний и финансируются ими же.

Второе направление — подготовка оперативного, инструкторского и др. персонала электрических станций, для чего при EPRI работает NDE (Nondestructive Examination) Center Training (Обучающий центр неразрушающего контроля).

Финансирование второго направления частично производится за счет государственных субсидий, но основное финансирование происходит опять-таки за счет энергокомпаний.

При институте EPRI создано объединение энергокомпаний EPRI Nuclear Power Group — NPG, куда входят и тепловые электростанции, за счет членских взносов которых происходит частичное финансирование исследовательских работ и обучения персонала. Члены объединения NPG получают значительные скидки при оплате услуг EPRI. В объединение NPG входит порядка 125 энергокомпаний, а общее число обслуживаемых энергокомпаний около 600.

В большинстве случаев энергокомпания сама формирует группы кандидатов на занятие оперативных должностей, оплачивает обучение и присылает людей в EPRI. Впрочем, бывают и частные волонтеры, они оплачивают учебу сами, причем, если человек отслужил в армии, то учебу оплачивает Пентагон; бывают стипендиаты различных фондов, стипендиаты союзов ветеранов родов войск, религиозных объединений и т. п.

Срок обучения — 4 года и образование EPRI приравняется к обычному техническому колледжу, т. е. образование высшее с присуждением степени бакалавра (Undergraduate Liberal Arts or General 4 years — 4-х летний колледж общего типа).

Место Center Training — центров профессиональной подготовки в

общей системе образования в США [11] можно увидеть на рисунок 2.

Оперативный персонал на электростанциях США делится на три уровня [10]:

I уровень — руководящий оперативный персонал (начальник смены),

Рисунок 2. Система образования в США.

II уровень — действующий оперативный персонал (машинист котла, турбины, блока и т. д.),

III уровень — вспомогательный оперативный персонал (обходчики).

В соответствии с этими **тремя уровнями**, или **тремя степенями компетентности** и строится система обучения.

Основной (базовый) — 4-х летний курс готовит специалистов III уровня, которые и приходят работать на электростанцию.

Для дальнейшего повышения квалификации персонал в рабочее и в нерабочее время занимается на тренажерах, установленных непосредственно на электростанциях (рисунок 3).

Кроме того, в тренажерном центре EPRI работают постоянно действующие курсы повышения квалификации персонала для всех 3-х уровней компетентности, инструкторского персонала, инженеров-инспекторов по ультразвуковой дефектоскопии, сварщиков, инженерного персонала, прямо не связанных с оперативной работой и др.

Тренировки проходят как на полномасштабных, всережимных тренажерах (обязательна полная копия реальных рабочих мест операторов см. рисунок 3), так и с помощью интерактивных мультимедийных программ (так называемое Web-обучение), которые позволяют индивидуально и удобно изучать материал.

Для повышения квалификации персонала первого и второго уровня пре-

Рисунок 3. Тренажер электростанции Roxboro Plant.

доставляются обучающие компьютерные Web-программы по изучению топочных процессов, а также приобретению фундаментальных знаний по теории внутрикотловых процессов и теории теплообмена.

Программы включают современные Web-приложения, такие как: тексты, анимация, гипертексты, гиперканалы, звук и онлайн-опрос (дистанционное тестирование).

Тренажеры включают в себя подсистемы технологического оборудования, например, для парогазового энергоблока: модели паровой и газовой турбин, генератора, котла-утилизатора; предусмотрены режимы пуска, останова, снижения и повышения нагрузки, аварийных остановов. Представлен сводный экран параметров пуска энергоблока, в котором приведена информация по положению запорной и регулирующей арматуры, пуску и останову насосов, по давлению газа, воды и конденсата, измерению остальных параметров, по системе защит, аварийной и предупредительной сигнализации и др.

Обучающие программы (Web-программы, интеллектуальные обучающие системы) представляют собой отдельные технологические подсистемы с подробным поузловым описанием, с интерактивным изучением и экзаменом, построенном на нескольких типах вопросов.

Успехи и достижения EPRI NDE Center Training:

- испанская и английская версии тренажеров, связанные с различными системами единиц измерений;
- типовые тренажеры, настраиваемые в соответствии с вашими технологическими схемами и вашими нуждами;
- программы, построенные на интернет-технологиях, а также по стандартам RS для дистанционного терминала;
- оценка эффективности обучения.

Таким образом, вся система обучения оперативного персонала в США и повышения его квалификации строится на **получении знаний** с помощью обучающих программ (так называемое Web-обучение) и **приобретении навыков и умений** с помощью полномасштабных всережимных тренажеров.

Оставив без комментариев единичные стоимостные характеристики системы обучения центра EPRI (см. таблицу 1), заметим однако, что суммарную стоимость обучения одного специалиста можно легко вычислить, если учесть, что цена обучения в колледже (университете) США в среднем составляет 20 – 25 тыс. долл/год.

Впрочем, для сравнения можно привести стоимость обучения одного иностранного специалиста в фирме ABB (~ 1200 \$ за 1 день).

Практически на каждой электростанции США существует пункт обучения

Таблица 1. Стоимость обучения и технических средств.

Стоимость обучения	для членов NPG / для не членов NPG
Стоимость обучения одного ассистента инструктора за курс в неделю	2600 \$ / 3250 \$
То же, за 1 час	110 \$ / 135 \$
Экзамен операторов первого, второго и третьего уровня	1075 \$ / 1350 \$
Тренировка с инструктором	1000 \$ / 1500 \$
Инспекторская тренировка	1500 \$ / 2250 \$
Стоимость технических материалов	
Курс оператора I уровня на 9 видеокассетах	1500 \$ / 2550 \$
Курс оператора II уровня на 10 видеокассетах	1500 \$ / 2550 \$

персонала (Eng. Tech. Support Specialist), оборудованный полномасштабными тренажерами (рисунок 3) и укомплектованный опытными инструкторами (2–3 инструктора).

Причем, инструкторами назначают, как правило, опытных специалистов с большим производственным стажем и платят им зарплату в 1,5–2 раза большую, чем оперативному персоналу.

Таким образом, на электростанции создается система непрерывного обучения персонала и повышения его квалификации с ведением статистического анкетирования каждого человека. Причем оперативный персонал имеет высокую мотивацию в повышении квалификации, так как это напрямую связано с его официальной профессиональной и должностной градацией и размером заработной платы.

При посещении электростанции Roxboro Plant (штат Северная Каролина) делегацией из России на вопрос, как наказывается персонал, допустивший аварию, наш гид (инструктор пункта обучения) ответил, что никак. Все оборудование электрической станции застраховано, и ущерб от аварии оплачивает страховая компания. Если авария произошла по вине оператора, то он просто проходит дополнительное обучение на тренажере по тем режимам и ситуациям, в которых произошла авария.

Вопрос о проведении соревнований оперативного персонала вызвал у американцев недоумение. Когда они поняли, о чем идет речь — они, в свою очередь, поинтересовались, а за чей же счет проводятся эти мероприятия? Обменявшись вопросами и убедившись, что соревнования они не проводят, а проводят только противоаварийные тренировки и учения, мы как-то отошли от этой темы и обсудили более интересную тему о точности стати-

ческого и динамического моделирования оборудования для тренажеров.

Причем, по словам нашего гида-инструктора электростанции Roxboro Plant, начальная точность моделирования технологического оборудования и процессов для тренажеров далеко не идеальна, в связи с чем, фирмы-разработчики тренажеров периодически проводят постдоговорные работы, связанные с корректировкой программного обеспечения по замечаниям оперативного и инструкторского персонала.

Здесь же следует отметить, что качественные характеристики тренажеров, разрабатываемых для электростанций, сжигающих органическое топливо, колеблются в довольно большом диапазоне. Определяющим параметром здесь является *конечная стоимость тренажера*.

В соответствии с Американским Национальным стандартом ANSI/ISA-77/20-1993 — «Тренажеры для электростанций, работающих на органическом топливе — Функциональные требования» [12] устанавливаются требования к тренажерам *трех* различных типов:

1. Высокореалистичный тренажер с *полной зоной применения*.
2. Высокореалистичный тренажер с *уменьшенной зоной применения*.
3. Тренажер *общего применения*.

Тренажер первого типа — точная копия щита управления (приборы, панели, индикаторы). Динамические и статические характеристики оборудования полностью соответствуют аналогичным показателям объекта-прототипа. Основным недостатком тренажера первого типа является его высокая цена и достаточно долгий срок изготовления, как правило, от двух до трех лет.

Тренажер второго типа — не полная копия щита управления (~ 80%) и ограниченная зона режимов. Благодаря упрощенной структуре моделируемой системы, управление эмуляцией можно осуществлять при помощи менее точной компьютерной системы. Как правило, моделируется от 80 до 90% стандартных элементов управления электростанцией, степень реалистичности достигает ~ 90%. Время изготовления продукта от одного года до двух лет.

Тренажер третьего типа — для данного стандарта принято, что тренажер считается тренажером общего применения, если интерфейс оператора не был разработан с целью сделать точную или очень похожую копию конфигурации блочного щита управления (БЩУ).

Необходимо заметить, что в соответствии с данным определением, тренажер, полностью повторяющий приборы и средства управления конкретного БЩУ, но использующий модели обобщенной электростанции, все равно считается тренажером общего применения. Аналогично, тренажер, построенный на моделях точного программного обеспечения конкрет-

ной электростанции, но с постами с электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ-мониторами) вместо панелей управления, реализованными на электростанции, также считается тренажером общего применения.

Таким образом, качество тренажерной техники полностью определяется конкретными возможностями заказчика, т. е. ценовыми характеристиками и потенциальными возможностями фирмы-разработчика программного обеспечения.

Одну из таких фирм-разработчиков программного обеспечения для тренажеров — Western Services Corporation (WSC) — г. Фредерик, штат Мэриленд и посетила российская делегация.

Фирма сравнительно небольшая, но, по нашему мнению, оптимальная в смысле численности персонала и объема заказов. По национальному признаку — 65% специалисты из России (так называемые «новые русские американцы») — выпускники МИФИ, МФТИ, МЭИ и других институтов¹, остальные — «старые американские американцы».

Из докладов, прочитанных для нашей делегации в фирме WSC, можно было понять, что разработки фирмы держатся на более или менее крепком научном и работающем фундаменте примерно пятилетней давности («объектно-ориентированная программная среда реального времени для эффективной разработки и модификации физических моделей тренажеров»). Но говорить в наше время, что «это принципиально новая технология создания моделей», можно с большой натяжкой и, причем где угодно, но только не среди профессионалов.

Использование современных IT-технологий при создании тренажеров в российском тренажеростроении предполагает применение ряда принципиально новых методологических концепций, находящихся на патентном уровне.

Программное обеспечение для тренажеров и обучающих систем, установленных в EPRI NDE Center Training и непосредственно на электрических станциях, разрабатывают специализированные фирмы типа Western Services Corporation. Таких фирм в США и Канаде в настоящее время существует сравнительно немного (порядка пятнадцати)², но, тем не менее, благодаря конкуренции цены на программный продукт снизились значительно.

¹ Здесь уместно заметить, что по данным ЮНЕСКО, ежегодный ущерб Российской Федерации от «утечки мозгов» только в 90-х годах прошлого века составил 50–60 млрд. долл. В целом же российская наука утратила около 40 % специалистов мирового класса (ежегодно эмигрировало примерно 2 тыс. специалистов, работавших в сфере науки и образования)

² CAE Electronics LTD, STI Simulation Int., GSE System Inc. и др.

Так, если в 90-е годы цена полномасштабного тренажера крупных фирм Westinghouse, Singer, General Electric, Combation Engineering и др. для блока 400–700 МВт составляла 25–30 млн. долл., причем цена программного обеспечения составляла около 85%, то в настоящее время такой тренажер, поставленный фирмой GSE Power System Inc. для Ленинградской АЭС стоил уже 15 млн. долл.

На внутреннем рынке США и Канады программное обеспечение тренажера энергоблока 300–800 МВт, оснащенного современной АСУ ТП, без дидактического сопровождения стоит уже 3–4 млн. долл., что, тем не менее, значительно превышает цены российского рынка.

Какова же эффективность от внедрения тренажеров и, вообще, от повышения образовательного уровня персонала?

По расчетам экономиста Э. Денисона 16% современного экономического роста США достигнуты благодаря повышению образовательного уровня рабочей силы, 34% — в результате технических нововведений и «ноу-хау», также связанных с образованием, и лишь 12% определяются ростом затрат на оборудование [13].

Профессиональное обучение обслуживающего персонала в промышленности обеспечивает формирование и повышение его квалификационного уровня. Школа «человеческого капитала» утверждает, что существует прямая зависимость между экономическим ростом и образованием, увеличением численности персонала³ и уровнем инвестиций *не в машины*. На основании этой зависимости Р. Лукас и П. Ромер предложили *эндогенный механизм генерации экономического роста*, источники которого связываются с накоплением человеческого капитала. Смысл его заключается в том, что в длительном периоде времени выработка продукции на единицу капитала может увеличиваться, даже когда вложения в основной капитал исчерпывают себя, и именно тогда, когда технически подготовленные работники благодаря возросшей квалификации обеспечивают прирост производства [14].

Профессиональная подготовка повышает производительность труда, что обеспечивает рост доходов. Проведенные исследования показали, что увеличение обучения персонала на один год может привести к 3%-ному дополнительному росту ВВП. По мере увеличения сроков обучения рентабельность ассигнований в профессиональную подготовку человека превосходит прибыльность вложений в физический капитал. В связи с этим затраты на обучение персонала выступают не как непроизводительное потребление, а как один из видов наиболее эффективных капиталовложений.

³ естественно, по американским меркам и при увеличении объема производства.

1.4. Тренажеры в отечественной энергетике. Родоначальники и исполнители тренажерного проекта.

В отечественной энергетике тренажеры начали входить в практику подготовки оперативного персонала в 60-е и 70-е годы прошлого века, сначала в атомной энергетике (Нововоронежская АЭС), а затем и в традиционной энергетике (Трипольская ГРЭС).

В РСФСР первые работы по тренажеростроению в традиционной энергетике — так называемый «тренажерный проект», начали проводиться в Мосэнерго в 1978 году следующими организациями:

- разработка математических моделей оборудования и процессов для тренажеров и учебно-методического обеспечения (УМО) — Специализированное наладочное предприятие «СНП Мосэнергоналадка» (в дальнейшем ЗАО «ТРЭЛЕКС», АО «ТЭСТ»), руководитель проекта — Магид С. И.,
- аппаратная реализация тренажеров на аналоговой и цифровой вычислительной технике — Опытный завод автоматики и приборостроения «ОЗАП Мосэнерго», руководитель проекта — Токаев С. С.

Специализированное наладочное предприятие «Мосэнергоналадка» было создано в соответствии с приказом Министра энергетики и электрификации СССР Непорожнерго П. С. от 24 февраля 1974 г. №83.

Непорожний Петр Степанович — Министр энергетики СССР в 1965 – 1985 гг.

Ершов И. Н. — Управляющий Мосэнерго в 1968 – 1983 гг.

Серебряников Н. И. — Управляющий Мосэнерго в 1988 – 2000 гг.

Аналогичный приказ, но уже с перечислением объема работ, возложенных на «Мосэнергоналадку», был выпущен в РЭУ «Мосэнерго» 24 апреля 1974 г.

Обязанности по организации нового предприятия с целью внедрения новых энерготехнологий, передовых методов эксплуатации, в том числе тренажерной подготовки персонала, были возложены на главного инженера РЭУ «Мосэнерго» Серебряникова Н. И., который вложил много сил и энергии в это дело, не выпуская его из сферы своего внимания практически никогда, и, уже будучи управляющим Мосэнерго, вот что он написал об этом времени в одной из своих статей:

«Широкий размах ввода энергоблоков сверхкритических параметров на Каширской и Рязанской ГРЭС, мощных тепло-

Кудрявый В. В. — Заместитель министра топлива и энергетики России в 1996–2000 гг.

Магид С. И. — генеральный директор АО «ТЭС».

фикационных турбин на ТЭЦ-21, 22, 23, строительство высоковольтных линий электропередач и подстанций потребовало участия в пусковых и наладочных работах большого количества высококвалифицированных инженеров-наладчиков всех специальностей.

Поэтому в 1974 году, в соответствии с приказом Минэнерго, руководство Мосэнерго приступает к формированию специализированного наладочного предприятия, основной задачей которого стала техническая помощь коллективам электростанций энергосистемы при вводе и освоении новейшего энергетического оборудования, доведение его технико-экономических показателей до проектных, внедрение передовых энерготехнологий и методов эксплуатации, в том числе и тренажерной подготовки персонала. Формирование предприятия развернулось на базе группы наладчиков Центрального ремонтно-механического завода (ЦРМЗ) Мосэнерго».

Во главе этой группы был шеф-инженер ЦРМЗ Магид С. И.⁴ — опытный инженер-наладчик, принимавший активное участие в пуске и освоении головных энергоблоков сверхкритических параметров на Каширской и Рязанской ГРЭС, головных теплофикационных турбин Т-250 МВт на ТЭЦ-22 Мосэнерго в

⁴ Магид Сергей Игнатьевич — после окончания в 1963 году Московского энергетического института работал в Московском отделении Центрального котло-турбинного института (МОЦКИ), где занимался научно-исследовательскими и экспериментальными работами по математическому и физическому моделированию энергетических установок для Министерства обороны СССР и одновременно закончил двухлетний курс механико-математического факультета Московского государственного университета, далее работал в тресте ОРГРЭС, где проводил пуско-наладочные и экспериментальные работы на вновь вводимых энергоблоках линейки мощностей 50÷1200 МВт на электростанциях РСФСР, Украины, Белоруссии, Прибалтики и Казахстана.

Архипова Е. Н. — технический директор АО «ТЭСТ».

Токаев С. С. — Главный инженер проекта СКБ ОЗАП Мосэнерго.

качестве руководителя сводной комплексной бригады наладчиков Мосэнерго, подчинявшейся непосредственно Председателю Государственной пусковой комиссии Серебряникову Н. И.

Причем в состав бригады входили ведущие по тому времени специалисты Мосэнерго: Кудрявый В. В., Тажиев Э. И., Сивов А. П., Самаренко В. Н., Зарецкий В. С., Бычук О. А. и др., ставшие впоследствии руководителями ряда предприятий Мосэнерго и подразделений Минэнерго СССР.

В разном составе бригада проводила работы по наладке оборудования на Загорской ГАЭС мощностью 1200 МВт и на ГРЭС-3, где осваивались головные газовые турбины 100 и 150 МВт.

Далее, в 1978 г., с целью разработки тренажеров, в составе СНП «Мосэнергоналадки» по указанию Н. И. Серебряникова был организован «Цех технологического моделирования» (нач. цеха — Магид С. И.), преобразованный по его же приказу в 1990 году в дочернее предприятие Мосэнерго «Тренажеры электрических станций и сетей» (ЗАО «ТРЭЛЕКС»), а в результате реформирования Мосэнерго в 2000 году было образовано уже самостоятельное Акционерное общество «Тренажеры электростанций и сетей» (АО «ТЭСТ») — генеральный директор — Магид С. И., технический директор — Архипова Е. Н.

Активнейшее участие в создании предприятия по разработке тренажеров для подготовки эксплуатационного персонала принял и будущий заместитель Министра топлива и энергетики РФ В. В. Кудрявый. Он, будучи начальником службы эксплуатации и ремонта (СЭРМО) Мосэнерго, первым предложил организовать в энергосистеме подготовку оперативного персонала на технических средствах — тренажерах. И далее на всех этапах своей благородной и патриотической деятельности Виктор Васильевич, несмотря на свою занятость и неравную борьбу с неправомерной (в том числе и по нашему мнению) реформой электроэнергетики,

постоянно помогал «Тренажерному проекту» по мере своих сил и возможностей.

Таким образом, *«родоначальниками* тренажерного проекта» можно считать представителей старшего поколения энергетиков — Непорожного П. С., Ершова И. Н., Серебряникова Н. И., Кудрявого В. В., а исполнителями их идей и замыслов — представителей уже нового поколения энергетиков — Магида С. И., Токаева С. С., Архипову Е. Н. и др.

2. Методика построения системы оперативных (тренажерных) логико-динамических моделей оборудования и процессов энергетических объектов

2.1. Основные принципы и подходы к моделированию энергообъектов. «Ручное управление в человеко-машинной системе».

Процесс создания моделей энергообъектов базируется на двух широко распространенных подходах к построению моделей систем. Первый — классический подход, основанный на раскрытии явлений, происходящих внутри рассматриваемой системы. При этом проводится внутреннее описание системы, излагающее взаимодействие составляющих ее элементов и внутреннее состояние. Такой подход служит логической основой обычного физического и математического моделирования на физическом и математическом подобию внутренних процессов.

Второй подход, характерный для методологии кибернетики, позволяет анализировать систему как некоторый «черный ящик» с доступными для наблюдения только входными и выходными переменными. Он сводит изучение системы к наблюдению за ее реакцией при известных воздействиях, поступающих на вход, т. е. независимых от ее внутреннего состояния.

Модель системы строится как ее описание в виде преобразователя (оператора) входных переменных в выходные, т. е. как внешнее описание, абстрагирующееся от механизма внутренних процессов [15].

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 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 и др.) в большинстве случаев вызывает затруднения. Это можно объяснить следующими причинами:

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

- 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.

Эти и другие причины значительно усложняют построение моделей энергообъекта. Естественно, что в таких условиях 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. Таким образом, применяя множество способов, можно получить множество моделей, гомоморфных физическому объекту. Это означает, что существует некое абстрактное соответствие между множеством моделей и моделируемым объектом.

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.

В результате конкретная модель объекта должна являться таким отображением процесса, которое позволяет выделить наиболее существенные его свойства для поставленной задачи.

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. Следует отметить, что такая модель, синтезированная специально для потребностей обучения, может и не отражать внутренних механизмов явления, ей достаточно лишь констатировать наличие конкретной формальной связи между входом и выходом объекта. Характер и особенности этой связи и составляют основу модели, получаемой в процессе идентификации объекта управления. Специфика такой модели определяется особенностями восприятия человека-оператора, рассматриваемого как звено в системе «человек-машина», а также характеристиками технологического прототипа и разрешающими способностями применяемой для реализации модели вычислительной техники.

На рисунке 4 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:

X — неуправляемая, но контролируемая через систему отображения

Рисунок 4. Общая схема «ручного» управления в человеко-машинной системе.

информации (СОИ), составляющая воздействия среды; X'' — управляемая составляющая (управление объектом воспринимается так же, 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 (Φ). 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 необходим 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:

$$\langle X'', I = \langle X'', Y' \rangle, S, T \rangle, \quad (2.1)$$

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 $X - X'$ и $Y - Y'$. Однако если у человека-оператора не сформирована концептуальная модель (KM) 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 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 KM_1 — выработки тактики управления на основании оценки производственной ситуации по неполной оперативной информации I , необходимой для выбора наиболее целесообразной стратегии S , а затем из KM_2 — выработки частной концептуальной модели планируемого развития технологическо-

Рисунок 5. Блок-схема управления с помощью тренажера.

го процесса при данном управляющем воздействии на объект X'' .

В обычных условиях формирование концептуальной технологической модели достигается у человека-оператора за счет длительного дублирования на рабочем месте, а также методом «проб и ошибок», что приводит зачастую к известным нежелательным последствиям. При обучении человека-оператора на тренажере концептуальная модель формируется целенаправленно на достаточно 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 (рисунок 5):

- 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.

2.2. Методология имитационного моделирования энергетических объектов.

Главные трудности при создании тренажеров, то есть при разработке математических моделей энергооборудования и процессов обуславливаются *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 было 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.

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 аналоговой или цифровой техники), но и алгоритм построения модели, т. е. алгоритм по имеющейся информации о системе, формирующий или назначающий собственно алгоритм моделирования. Именно алгоритм построения и определяет эффективность реализуемой модели.

С данной точки зрения алгоритм моделирования можно разбить на две основные части:

- алгоритм построения модели;
- алгоритм решения задачи, т. е. модель, которая впоследствии должна быть представлена в виде программы.

Если для реализации второй части алгоритма моделирования существовали формальные процедуры, то первая часть выполнялась, преимущественно исходя из интуитивных и эвристических соображений с последующей опытной проверкой.

Была предпринята попытка формализовать процедуру моделирования, рассматриваемую как оптимизационная задача, где минимизируется стоимость решения задачи моделирования при известных (или назначенных):

- моделируемой системе (оригинале);
- цели моделирования;
- ограничениях на качество решения.

Оптимизируемыми считались 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.

Действовавший в СССР ГОСТ 20921-75 требовал подобия учебно-информационной модели тренажера информационной модели в системе «человек-машина», не выдвигая количественных требований к статической и динамической адекватности модели объекту моделирования.

Степень подобия согласно ГОСТ необходимо устанавливать, исходя из специфических особенностей конкретной информационной модели и технико-экономической целесообразности. Тем не менее, ГОСТ 20921-75 требовал обязательного воспроизведения потока информации, предъявляемого обучаемым в реальном масштабе времени, а также, при необходимости, иметь возможность регулирования масштаба времени.

Анализ указанных положений, а также опыт разработки математических моделей для тренажеров позволили авторам 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 тепло-технического оборудования и его математических моделей показывает, что в большинстве случаев можно применить линеаризацию разрабатываемых для тренажера моделей относительно идентифицируемых параметров, что в свою очередь дает возможность разделить нелинейность и динамику объекта. Научно обоснованный анализ психофизиологической чувствительности человека-оператора, заключающийся в допустимости достаточно больших отклонений временных характеристик при моделировании технологических процессов, позволяет применять качественный подход к моделированию динамики процессов для тренажера.

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 человеком-оператором;
- образованная таким образом непрерывная нелинейная динамическая система управляется дискретной логикой, определяемой закодированной информацией о состоянии технологической схемы.

Предложен подход к построению всережимной модели реального времени, состоящий в разделении функций статического и динамического моделирования с направленной асимметрией точности разделенных функций (моделирование осуществляется с помощью точного нелинейного статического и упрощенного динамического преобразований входных управляющих и возмущающих воздействий). Полученная непрерывная нелинейная

динамическая система управляется дискретной логикой (А. с. №1128286) [16].

Сначала было 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 системного подхода:

- 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.

Принцип системного единства функционально-целевых и причинно-следственных отношений заключается в одновременном использовании концептуальной функционально-целевой и формализованной причинно-следственной информации в целях создания системы моделей и представлений, единых для разработчика математических моделей и конструктора тренажера и организация их диалога на всех этапах анализа и синтеза модели. На основе этого принципа эффективно решаются задачи декомпозиции и интеграции систем.

Последовательное раскрытие неопределенности и избыточности разрешает:

- установить строгий порядок последовательного введения необходимой функционально-целевой и причинно-следственной информации;
- выяснить круг задач, которые могут быть решены на данном этапе исследования системы;
- выбрать направления исследований и разработок;
- определить задачи на следующем этапе.

Однозначное представление свойств и характеристик обуславливает обоснованный выбор частных моделей и критериев, однозначно оценивающих свойства и характеристики объекта управления моделирования на всех этапах исследований.

Многоуровневая функционально-целевая и причинно-следственная интеграция (композиция, агрегирование) обеспечивают формирование сложной системы и ее соответствующего представления в виде множества моделей интеграции различных уровней.

Целенаправленное эволюционное развитие топологии (структура системы), структуры операторов и параметров моделей — ведущий принцип эффективной реализации моделей сложных систем. Этим принципом обусловлена необходимость разбиения процесса построения моделей на последовательно реализуемые этапы с оценкой и выбором на каждом предпочтительного направления развития из множества возможных.

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.

Перечисленные принципы приняты при построении функционально-целевых и причинно-следственных моделей энергообъекта, его подсистем, частных моделей для изучения свойств передач и процессов объекта моделирования, раскрытия неопределенности и избыточности свойств, критериев функционалов моделей, решения задач анализа, прямого и целенаправленного эволюционного синтеза модели, ее многоуровневой интеграции, оценки влияния топологии, структур операторов и параметров модели на ее свойства, качества и характеристики.

Кроме того, при разработке моделей энергообъекта авторами была сделана попытка достижения компромисса между требованиями ограничения объема моделируемого оборудования по технико-экономическим соображениям (минимальные стоимость тренажера и затраты на его обслуживание) и требованиями к определенному уровню детализации моделируемых функций и систем объекта. Это связано с необходимостью создать у обучаемого оператора иллюзию реальной действительности и уникальности моделируемых событий с тем, чтобы ощущения человека-оператора при обучении были близки к его ощущениям в реальной оперативной деятельности.

Как показывает опыт, отказ от такого компромисса приводит:

- с одной стороны, к созданию недопустимо упрощенных «жестких» моделей, компрометирующих себя в процессе обучения оперативного персонала;
- с другой стороны, к избыточной сложности модели, что приводит помимо снижения надежности и увеличения стоимости — к значительному возрастанию трудоемкости при разработке тренажера.

Таким образом, следуя [17], было необходимо разработать модель, неотличимую от моделируемого объекта в отношении некоторых свойств, полагаемых «существенными» и отличную по всем остальным свойствам, полагаемым «несущественными». При этом отсутствие в модели «несуще-

ственных» элементов не менее важно, чем присутствие «существенных».

Соответствие модели оригиналу может быть выражено в точных математико-логических терминах изо- и гомоморфизма [18]. Следует заметить, что для любых физически реализуемых систем отношение изоморфизма всегда есть идеализация. Отношение же гомоморфизма, будучи рефлексивным и транзитивным, симметричным не является.

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

- модель проще оригинала и отношение «быть моделью» оказывается не отношением типа равенства (эквивалентности), а отношением сходства или толерантности;
- реализуется идея не тождества, а всего лишь подобия.

Главное в гомоморфных моделях сводится к свертыванию доступной нам информации об исследуемых процессах и объектах, содержащих множество второстепенных, не существенных данных в гораздо более компактную, удобообрабатываемую и обозримую форму. Причем соотношение между степенью свертывания второстепенной информации об объекте и уровнем детализации имитируемых функций и систем объекта, по мнению авторов, одно из принципиальных положений при построении математических моделей для тренажеров.

Подход к решению вопроса об уровне детализации сформулирован авторами при анализе режимов эксплуатации моделируемого объекта. Так, при моделировании оборудования, работающего только в штатном режиме, достаточным уровнем детализации является, очевидно, разработка имитаторов, обеспечивающих оператору индикацию параметров систем объекта. Эти 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. В этом случае возможны два подхода:

- посредством разработки специальных алгоритмов, имитирующих поведение реального объекта при возникновении такой ситуации. Этот подход характерен для «жестких» или «ситуационных» моделей, где возможно воспроизведение только заранее предусмотренных ситуаций, для каждой из которых создается свой алгоритм или программа;
- без создания специальных алгоритмов и программ. Увеличение степени детализации разработки модели до уровня отдельных элементов

позволяет построить так называемую «гибкую» модель, адекватно реагирующую на любые, даже заранее не предусмотренные внешние или внутренние воздействия. Нештатная ситуация создается здесь исключением (отказом) какого-либо узла оборудования (электродвигателя, арматуры и т. п.), а также при изменении штатной последовательности включения отдельных элементов или при превышении значений каких-либо ограниченных параметров и т. д.

Адекватность реакции модели во втором случае обеспечивается автоматически 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.

В этом случае топологическая структура модели — гомоморфное отображение тепловой схемы объекта на технологический граф, узлы и дуги которого дополняются технологическими кодами преобразов этих элементов в реальной установке, т. е. дифференциальными, алгебраическими, трансцендентными логическими уравнениями. Таким образом, модель, формируемая логически-числовыми функциями по условиям конкретного графа, превращает «гибкие» модели в «имитационные».

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). Это, по мнению авторов, наиболее разумно при рассмотрении множества конкретных классов моделей, которые могут быть реализованы в тренажере с учетом сугубо нелинейных функциональных характеристик прототипа и определенных психофизиологических свойств человека-оператора при зрительном восприятии пространственных и временных характеристик объекта. Такие модели имитационного класса называются *оперативными*. Таким образом, модель Гаммерштейна, модифицирован-

ная 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.

В отличие от несмещенных имитационных моделей, оперативные (смещенные) модели обладают следующими свойствами:

- не обязательно содержат полный информационный базис — часть факторов (в статике или динамике) может отсутствовать и заменяться другими, коррелированными с ними переменными;
- не отражают (полностью или частично) механизм действия объекта моделирования;
- могут связывать одновременно и мгновенные, и усредненные факторы с различными интервалами усреднения;
- опорная функция, выражающая точную физическую закономерность, может быть аппроксимирована другой достаточно сложной функцией или дифференциальным уравнением, среди решений которого имеется удобная аппроксимирующая функция.

Оперативные модели в тренажерах по своим свойствам наиболее полно отвечают задачам поддержания уровня натренированности персонала непосредственно на электростанциях. Воспроизведение текущих состояний реального объекта, возможность явного представления входной и выходной информации, а также подобие структуры модели структуре реального энергоблока 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.

Однако следует учитывать, что объем модели и, следовательно, трудозатраты и время ее реализации при переходе от «жестких» к «гибким» имитационным и оперативным моделям увеличиваются. Естественно, что достижение компромисса между степенью детализации и свертыванием информации зависит от конкретных условий применения тренажера в процессе обучения персонала. Так, для первичного обучения нового персонала электростанций допустима меньшая степень детализации объекта при моделировании, т. е. допустимо применение «жестких» ситуационных тренажеров. Однако при переподготовке персонала с целью поддержания уровня натренированности необходима значительно большая степень де-

тализации, т. е. требуется использовать «гибкие», всережимные имитационные оперативные модели.

Указанные подходы были с успехом применены авторами в Мосэнерго, где проектировались и изготавливались тренажеры с моделями указанных типов.

Система оперативных моделей (СОМ) энергоблока была положена в основу при проектировании комплексного и специализированных тренажеров для УТЦ Мосэнерго на ТЭЦ-25.

Разрабатываемая СОМ энергоблока должна быть оптимальной в смысле соответствия задачам обучения персонала и гибкой по отношению к изменениям этих задач. Процесс разработки СОМ энергоблока включает синтез алгоритмов построения моделей элементов и состояний моделируемого оборудования с оптимизацией некоторого показателя качества указанного процесса, а также синтез и анализ средств интерактивного взаимодействия разработчика СОМ с моделируемой системой.

Разработка алгоритма построения СОМ основана на функционально-целевом подходе, предполагающем соответствие целей и структур СОМ функциям и свойствам предметной области, т. е. функциям и свойствам энергоблока и управляющего им человека-оператора. Такое соответствие обеспечивает как формальную постановку и решение, так и практическую реализацию задач синтеза структуры СОМ и алгоритма моделирования, оптимальных в смысле определенных критериев.

В основе методологии построения СОМ лежит имитационное моделирование, составными частями которого являются вычислительный эксперимент и свертывающее (упрощающее) моделирование, т. е. реализуется процесс постепенного построения и использования информационно-вычислительной модели объекта совместно человеком и ЭВМ. Термины «свертывающее» или «упрощающее» моделирование введены, следуя высказыванию У. Эшби [19] о том, что «теория систем должна строиться на методах упрощения (simplification) и по сути дела представлять собой науку упрощения».

Задача эргономического обеспечения тренажерной техники разрешается при создании СОМ на основе комплексного учета физических и психологических возможностей человека-оператора. Эргономическое обеспечение имеет целью придать тренажерной технике свойства, обеспечивающие наиболее эффективное функционирование системы «человек – техника» при минимальном расходе ресурсов человека.

Методология построения СОМ предполагает «мягкую» формализацию, основанную на объединении формальных и неформальных методов исследования объекта, диалоге группы специалистов и машины в процессе

построения информационной модели. Динамическая модель строится в диалоговом режиме, связанном с вариативным и сценарным анализом — ответами на вопросы типа — «что произойдет с моделью, если ...?», анализом вариантов, построением математических моделей (сценариев) возможных альтернативных путей развития моделируемого процесса. Применение в «оперативных» моделях логико-числовых функций позволяет говорить не только о формализации знания, но и формализации деятельности. Учет человеческого фактора в СОМ позволяет согласовывать как внешние условия техники, так и собственные средства человека-оператора. Кроме того, степень детализации моделируемого объекта в СОМ позволяет снять противоречие между повторимостью и единственностью (уникальностью) событий, происходящих на модели и на технологическом оборудовании.

С учетом изложенных выше обоснований упрощения ряда характеристик объекта моделирования, являющихся следствием выявленных свойств объекта (первая часть предметной области) и психофизиологических свойств человека-оператора (вторая часть предметной области), а также сформулированных принципов системного подхода [20], алгоритм построения СОМ применительно к энергоблоку ТЭС может быть выражен в виде ориентированного графа (рисунок 6)

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (2.2)$$

где $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ — множество вершин графа, отождествляемых с этапами процесса создания СОМ; $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ — множество дуг графа, определяющих связи между этапами V_n и порядком их выполнения.

Смысловое значение вершин G :

V_1 — постановка целей и задач разработки СОМ (ПЦ — постановка целей);

V_2 — сбор и анализ исходной расчетной, проектной и экспериментальной информации по моделируемому объекту и режимам его эксплуатации (СИ — сбор информации);

V_3 — проведение идентификационных (модельных) испытаний технологического объекта (МИ — модельные испытания);

V_4 — формирование структуры модели (ФС);

V_5 — задание внутренних связей (ЗС);

V_6 — ввод ограничений входных и выходных сигналов (ВО);

V_7 — определение и расчет функциональных статических характеристик элементов системы (ОС — определение статики);

V_8 — определение и расчет динамических характеристик элементов

Рисунок 6. Ориентированный граф построения тренажера (СОМ).

V_1 — постановка целей (ПЦ); V_2 — сбор информации (СИ); V_3 — модельные испытания (МИ); V_4 — формирование структуры модели (ФС); V_5 — задание внутренних связей (ЗС); V_6 — ввод ограничений сигналов (ВО); V_7, V_8, V_9 — определение статистики (ОС), динамики (ОД), логики (ОЛ); V_{10}, V_{12} — оценка качества (ОК_I) и II (ОК_{II}) этапы; V_{11}, V_{13} — агрегирование отдельных имитаторов (АИ) и моделей (АМ); V_{14}, V_{15} — разработка схем, соответственно, структурных (СОМ-РС), функциональных (СОМ-РО); V_{16} — реализация СОМ-РМ; V_{17} — комплексная оценка качества СОМ — III этап — (ОК_{III}); V_{18} — комплексная отладка СОМ-ОМ; V_{19} — обучение персонала (ОП); V_{20} — оперативные знания (ОЗ).

синтеза (ОД — определение динамики);

V_9 — формирование логической части моделей (ОЛ — определение логики);

V_{10} — оценка качества параметрической идентификации по критерию максимального правдоподобия (ОК_I);

V_{11} — агрегирование отдельных имитаторов (АИ);

V_{12} — оценка качества имитаторов по критериям регрессионного анализа (ОК_{II});

V_{13} — агрегирование моделей (АМ);

V_{14} — разработка структурных схем СОМ (РС);

V_{15} — разработка функциональных и принципиальных схем СОМ (РФ);

V_{16} — реализация СОМ (РМ);

V_{17} — комплексная оценка качества СОМ по информационно-экспертному критерию (ОК_{III});

V_{18} — комплексная отладка СОМ (ОМ);

V_{19} — обучение персонала (ОП);

V_{20} — оперативные знания (ОЗ).

В реализации алгоритма построения СОМ принимает участие определенный круг специалистов с различной профессиональной ориентацией и разными приложениями в системе. Естественно, что формализация построения СОМ должна учитывать как формы представления знаний различными специалистами, так и характер их взаимодействия с СОМ.

Анализ взаимодействия специалистов с элементами формальной модели построения СОМ может быть проведен при рассмотрении двудольного графа (рисунок 7)

$$Q = \langle U, V \rangle, \quad (2.3)$$

где $U = \{U_1, U_2, U_k\}$ — множество вершин графа, отождествляемых с группами специалистов, занятых разработкой и обслуживанием СОМ; $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ — множество вершин графа, отождествляемых с этапами процесса создания СОМ.

Смысловое значение вершин из множества U_k :

U_1 — технологи-математики (ТМ);

U_2 — технологи-экспериментаторы (ТЭ);

U_3 — системотехники (СТ);

U_4 — специалисты по радиоэлектронике (РЭ);

U_5 — программисты (ПР);

U_6 — эксплуатационный персонал тренажера (ЭП);

U_7 — инструкторы по обучению (ИО).

Рисунок 7. Двудольный граф взаимодействия групп специалистов при создании СОМ тренажера.

U_1 — технологи-математики (ТМ); U_2 — технологи-экспериментаторы (ТЭ); U_3 — системотехники (СТ); U_4 — специалисты по радиоэлектронике (РЭ); U_5 — программисты (ПР); U_6 — эксплуатационный персонал тренажера (ЭП); U_7 — инструкторы по обучению (ИО); $U_1 - U_3 - X$; $U_4 - U_5 - Y$; $U_6 - U_7 - Z$.

Перечисленные группы специалистов работают в различных областях знаний, применяют разные приемы при анализе и решении задач, а также принятии решений. Технологи-математики (ТМ – U_1):

- формируют цели и задачи разработки СОМ (V_1);
- работают над процессом создания имитаторов и оперативных моделей оборудования и процессов;
- разрабатывают тесты и структурные схемы (V_{14});

- проводят экспертные опросы ($V_2 - V_{13}$);
- поэтапно контролируют качество моделей (V_{10}, V_{12}, V_{17});
- проводят комплексную отладку COM и тренажера в целом (V_{18}).

Технологи-экспериментаторы (ТЭ – U_2):

- занимаются сбором исходной информации по моделируемому объекту (V_2);
 - проводят «модельные» испытания технологического оборудования с целью определения эталонных характеристик (V_3);
 - принимают участие в некоторых других этапах создания COM ($V_4 - V_9, V_{18}$).
- Системотехники (СТ – U_3): решают комплексные общесистемные вопросы;
- определяют необходимую структурно-алгоритмическую организацию COM, т. е. формируют структуру модели (V_4) на основании анализа
 - качественных и количественных характеристик информационных потоков объекта моделирования;
 - участвуют в остальных этапах создания COM ($V_1, V_2, V_4 - V_9, V_{11}, V_{13}, V_{18}$).

Специалисты по радиоэлектронике (РЭ – U_4), владеющие приемами построения внутренней структуры элементов технического обеспечения COM:

- разрабатывают структурные, функциональные и принципиальные схемы имитаторов (V_{14}, V_{15});
- реализуют COM и остальные технические системы тренажера (V_{16});
- участвуют в комплексной отладке COM и остальных систем тренажера (V_{18}).

Программисты (ПР – U_5):

- разрабатывают и отлаживают программы при расчете на ЭВМ статических и динамических характеристик объекта моделирования (V_7, V_8);
- участвуют в разработке структурных и функциональных схем или программ (V_{14}, V_{15}), в реализации и отладке COM (V_{16}, V_{18}).

Эксплуатационный персонал тренажера (ЭП – U_6):

- участвует в реализации и оценке качества моделей (V_{16}, V_{17});
- проводит комплексную отладку тренажера (V_{18});
- обеспечивает функционирование COM и остальных подсистем во время обучения персонала (V_{19}).

Инструкторы обучения (ИО – U_7):

- участвуют в постановке целей и задач разработки COM (V_1);
- контролируют ход реализации моделей (V_{16});
- осуществляют оценку качества (V_{17}) и комплексную отладку COM (V_{18});
- обучают оперативный персонал (V_{19});
- определяют объем и содержание оперативных знаний обучаемого персонала (V_{20}).

Оперативные знания — плод деятельности всех групп специалистов по созданию и использованию СОМ.

О величине трудозатрат отдельных групп специалистов можно судить по полустепеням захода $D(U_j)$ для вершин графа Q (рисунок 8). Наибольшее значение полустепени захода, а следовательно, и трудоемкости затрат при разработке СОМ, имеют техники математики (U_1) и системотехники (U_3):

$$D(U_1) = 7,5; D(U_3) = 5,5.$$

На основании анализа рисунка 8 выдаются рекомендации о количественном составе групп специалистов, формируемых для разработки СОМ.

Трудоемкость отдельных этапов создания СОМ можно оценить по величине полустепеней захода $D(V_j)$ для вершин графа G (рисунок 9). Наибольшую трудоемкость имеют этапы:

- идентификационных (модельных) испытаний технологического оборудования (V_3);
- определения и расчета функциональных статических характеристик элементов системы (V_7);
- агрегирования отдельных имитаторов (V_{11});
- агрегирования модели (V_{13}):

$$D(V_3) = 4; D(V_7) = 3,5; D(V_{11}) = 4,5; D(V_{13}) = 4,5.$$

Таким образом, для сокращения времени разработки СОМ необходимо особенно тщательно готовить указанные этапы работы, выделять необхо-

Рисунок 8. Полустепени захода по группам специалистов при создании СОМ тренажера.

Рисунок 9. Полуустепени захода по этапам создания COM.

димое число специалистов и т. д.

Из анализа графа Q (см. рисунок 7), множество вершин U_j , отождествляемое с группами специалистов, по числу и характеру связей с элементами множества V_j можно разбить на три подмножества X , Y , Z . Причем подмножество X содержит те элементы множества U_j , которые в основном смежны вершинами $V_1 - V_{18}$, подмножество Y , смежное вершинам $V_7, V_8, V_{14} - V_{18}$ и подмножество Z , смежное вершинами $V_{16} - V_{20}$.

Элементы множества X — специалисты, в основном связанные с проблемно-физической и структурно-алгоритмической стороной COM. Группа $X = \{U_1 - U_3\}$ — «технологии».

Элементы множества Y — специалисты, решающие аппаратно-программные задачи обеспечения COM. Группа $Y = \{U_4, U_5\}$ — «электронщики» или «программисты».

Элементы множества Z — специалисты, обеспечивающие эксплуатационно-дидактическую сторону COM и тренажера в целом. Группа $Z = \{U_6, U_7\}$ — «эксплуатационники».

Таким образом, в процессе создания COM и тренажера в целом принимают участие три группы специалистов с различной профессиональной ориентацией, приложением в системе и специфическими средствами повышения эффективности основной деятельности. Для преодоления организационной разобщенности перечисленные группы во время создания COM и тренажера были объединены в единую рабочую группу под идеологическим руководством «технологов».

Естественное лидерство технологов-теоретиков (технологов с математическим и системотехническим уклоном) объясняется тем, что един-

ственно правильное (и признанное другими группами разработчиков) понимание и качественное интегрирование предметной области, подлежащей моделированию, являлось основой разработанной ими методологии.

Применяемый математический анализ процесса разработки СОМ как со стороны поэтапной декомпозиции, так и со стороны ресурсного обеспечения позволил значительно сократить сроки разработки и реализации за счет перехода от долгосрочного директивного планирования к краткосрочному, реальному адаптивному планированию. Последнее позволяет при учете поэтапного распределения трудозатрат оптимизировать процесс разработки СОМ по использованию ресурсов и более быстро адаптироваться в соответствии с изменением внешних условий. Естественно, что на сокращение сроков создания и реализации СОМ в значительной степени повлияла и разработанная методология, а именно, применение оперативного упрощающего (внешнего) моделирования, основанного на функционально-целевом подходе, разделении нелинейности и динамики объекта моделирования с направленной асимметрией точности отдельных функций. Кроме того, применение многокритериальной трехуровневой системы контроля и управления качеством СОМ позволило сравнительно легко оптимизировать сложность моделей относительно выбранных критериев. Таким образом, разработанная методология и применение адаптивного планирования позволили в три-четыре раза сократить сроки создания высококачественного тренажера для подготовки и переподготовки оперативного персонала.

2.3. Анализ и содержание этапов разработки системы оперативных тренажерных моделей.

При разработке имитационно-оперативных моделей тепловая часть энергоблока с прямоточным котлом была условно разделена на следующие системы:

- пароводяной тракт котла на сепараторном и прямоточном режимах;
- топка и газозвоздушный тракт;
- тракт промперегревателя;
- тракт природного газа;
- собственно турбина;
- питательная установка;
- конденсационная установка;
- тракт основного конденсата и питательной воды;

- маслосистема;
- система регенерации высокого и низкого давления;
- теплофикационная установка.

Такое отображение предметной области должно отвечать целям организации восприятия человеком-оператором информационной модели объекта управления, анализа информации и принятия решений, а также формирования и совершенствования у оператора профессиональных навыков и умений. Основная задача при создании модели энергоблока — наиболее целесообразная разработка такого отображения процесса управления объектом, которое позволяет выделить его наиболее существенные свойства для поставленной цели.

Таким образом, целевая функция человеко-машинной системы при обучении оператора на тренажере (т. е. и процесса создания COM) состоит в следующем:

- обеспечение адекватного воспроизведения человеку-оператору информационной модели прототипа объекта управления;
- обеспечение возможности анализа информации и принятия решений;
- формирование и совершенствование у оператора профессиональных навыков и умений при заранее заданных отклонениях (смещениях) модели относительно моделируемого прототипа с минимумом стоимости изготовления и обслуживания тренажера с обеспечением необходимой эффективности обучения.

После постановки целей и задач разработки COM (V_1) переходят ко второму этапу (V_2) — сбору и анализу исходной расчетной, проектной и экспериментальной информации по моделируемому объекту и режимам его эксплуатации.

Так, для разработки модели котлоагрегата необходимо рассмотреть следующую расчетную документацию:

- расчет котла: тепловой, аэродинамический, гидравлический; расчет тракта природного газа;
- расчет паромазутопроводов (или расчет системы пылеприготовления);
- аэродинамический расчет горелочных устройств.

Кроме того, разработчику следует изучить проектные материалы по защита, блокировкам, сигнализации и схемам автоматического регулирования. Необходимо иметь сведения о паспортных данных всей регулирующей аппаратуры, характеристиках дозаторов твердого топлива и мазутных форсунок.

Конструкторская документация должна содержать чертежи общих видов элементов энергоблока и основных его узлов, а также общие виды оперативных и неоперативных панелей и пультов управления, чертежи мнемосхемы и перечни регистрирующих и показывающих приборов, а также пе-

речень параметров, выведенных на систему централизованного контроля управления.

Помимо этого разработчик обязан изучить эксплуатационные материалы-инструкции, сводные эксплуатационные ведомости, отчеты о наладке и исследованиях данного или подобного ему энергоблока и др.

Особенное внимание уделяется техническим отчетам о наладке и испытаниях энергоблоков, так как имеющиеся в них графики и сводные таблицы содержат много сведений, представляющих интерес при структурной и параметрической идентификации.

Под структурной идентификацией понимается процесс определения структуры оператора модели F . Если же его структура была определена или априори известна, то процесс идентификации сводится к выявлению параметров этой структуры. Такой процесс называется *параметрической идентификацией*. Иногда о первом процессе говорят как об идентификации в широком смысле, о втором — в узком.

Таким образом, идентификация структуры связана, прежде всего, с предварительным выбором структуры модели, а идентификация параметров — только с нахождением параметров этой модели при заданной структуре.

На этапе формирования структуры модели необходимо решить следующие задачи идентификации:

- выделение объекта из среды;
- определение числа уровней структуры;
- выделение подсистем и элементов объекта моделирования;
- ранжирование входов и выходов объекта по степени их влияния на выполнение целей управления на объекте и обучение;
- определение рационального числа входов и выходов объекта, учитываемых в модели.

Процесс выделения объекта из среды полностью характеризуется целями и алгоритмом управления.

Пусть цель T формулируется в виде множества состояний объекта $T = \{Y\}$, которые должны быть достигнуты в процессе управления на модели тренажера. Это означает, что управляющее воздействие U должно быть таким, чтобы состояние объекта совпадало с целевым, т. е. $Y \rightarrow Y^*$.

Однако всякое управляющее воздействие ограничено некоторым ресурсом R . Пусть $\{U\}_R$ — ресурсное множество управлений, которым располагает модель тренажера, т. е. $U \in \{U\}_R$.

Таким образом, для определения объекта необходимо знать множества целей $\{Y^*\}$ и располагаемых управляющих воздействий $\{U\}_R$.

Воспроизводимое в тренажере информационное и моторное поля оператора должны быть по конструкции идентичными информационному и

моторному полям реальной установки. Этот принцип основан на психологических требованиях и исключает возможность переноса отрицательных навыков при переходе операторов к управлению реальной установкой. Поэтому пульт и щит управления по своему внешнему виду, расположению и конструкции индикаторов и органов управления должны в точности соответствовать пульту и щиту реальной установки.

При конструировании пульта и щита комплексного тренажера в качестве прототипа был взят блочный щит управления (БЩУ) теплофикационного энергоблока. Рабочее место обучаемых сформировано в виде БЩУ, практически полностью повторяющего щиты и пульта управления соответствующего энергоблока.

Формальная реализация процедуры выделения объекта однозначно возможна, если для каждого варианта выделения объекта идентификация проводится до конца, т. е. до составления полной модели объекта. Для этого необходимо располагать экспериментальными данными, которые можно получить только при наличии уже выбранной структуры (иначе неизвестно, что же именно измерять). Столь громоздкую процедуру с выходом на эксперимент формализовать очень сложно. Поэтому на стадии структурной идентификации широко пользуются методом экспертного опроса, по результатам которого принимается решение о структуре объекта, его взаимоотношениях со средой, возможным состоянием среды и т. д.

При разработке модели объекта сначала необходимо определить число уровней структуры, выделить подсистемы и элементы.

Обычно в модели вводятся три уровня структуры моделируемого объекта: элементы, подсистемы и система. В общем случае возможны дополнительные уровни, например, элементы подсистемы первого уровня, подсистемы второго уровня, система. Количество уровней зависит от объема моделируемого технологического оборудования. Так, для модели котла достаточным количеством считаются три уровня, для энергоблока — четыре и т. д.

В применении к моделированию технологического оборудования изложенным общим соображениям целесообразно придать конкретный топологический смысл. Если системой служит, например, прямоточный котел, работающий в прямоточном режиме, то в качестве подсистем можно выделить:

- расход и давление: природного газа, питательной воды и пара по тракту котла;
- горение и газозвоздушный тракт;
- параметры среды по: пароводяному тракту котла, тракту промпароперегревателя.

В качестве элементов подсистем принимаются имитаторы формирова-

ния отдельных выходных переменных, имеющих или не имеющих выход на приборы БЩУ. Так, для первой подсистемы подачи топлива за элементы приняты имитаторы расхода природного газа на полутопки котла, гидравлических характеристик тракта, а также давление газа за регулирующим клапаном по сторонам котла. Для второй подсистемы «топка и газоздушный тракт» — имитаторы разрежения сверху топки, расхода воздуха, давления воздуха в перемычке за РВП, содержания кислорода в дымовых газах, температуры газов в поворотной камере и т. д.

Объем моделируемого оборудования и процессов, т. е. количество элементов подсистемы определяется, исходя из основного назначения модели тренажера, а именно, обучение человека-оператора. Таким образом, модель котла должна отражать только те физические явления и процессы, которые наблюдаются оператором через СОИ на пульте и щите оператора, соответствуя структуре его деятельности в различных режимах управления энергоблоком.

Дополнительно разрабатываются имитаторы, принятые вспомогательными при формировании «ненаблюдаемых» параметров, например имитаторы коэффициента избытка воздуха, энтальпии, расхода дымовых газов и т. п.

Отметим, что чем сложнее система, тем больше уровней подсистем целесообразно вводить в модель. Выполняемые при моделировании операции совершаются на нескольких уровнях анализа. На каждом из них необходимо оперировать двумя понятиями, обозначающими объекты соседних структурных уровней, элементы и система, так как подсистемы более низкого уровня могут рассматриваться как элементы подсистемы более высокого уровня, а последняя — как система.

Число уровней анализа K для любой модели отвечает условию

$$K = n + 1,$$

где $n \geq 0$ — число уровней структуры подсистем.

После нахождения числа уровней структуры и выделения подсистем проводится ранжирование входов и выходов объекта методом экспертных оценок, т. е. выясняется, какие именно входы и выходы объекта будут включены в его модель. Для этого выделяются наиболее существенные из всех реальных входов и выходов, которые затем и образуют многополюсник модели размерностью $m \times n$.

Отбор «претендентов» на роль воздействия среды должен подчиняться следующим требованиям:

- отбираются те и только те входы $X_1, \dots, X_n$, состояние которых влияет на реализацию цели в объекте;

- состояние каждого входа X_i должно эффективно, т. е. легко и надежно контролироваться (измеряться).

Селекция входов среды выполняется после ранжирования по степени их влияния на реализацию цели управления в объекте. Ранжирование означает, что каждому входу X_i ($i = 1, \dots, n$) следует поставить в соответствие его ранг — число K_i .

$$X_i \rightarrow K_i \ (i = 1, \dots, n),$$

где единичный ранг ($K_i = 1$) имеет вход, наиболее влияющий на реализацию цели в объекте. Второй ($K_i = 2$) и т. д. последующие ранги имеют входы, влияющие не столь существенно, как единичный. Теперь, если в модели следует по каким-то соображениям оставить лишь q входов, ими будут факторы с номерами от i_1 до i_q , т. е. имеющие первые q рангов.

Составить ранжированную последовательность при отсутствии модели объекта можно с помощью специалистов-экспертов, хорошо осведомленных об особенностях среды объекта, а также о цели и способах ее достижения, т. е. имеющих представление о будущем алгоритме управления этим объектом. Аналогично проводится ранжирование входов управления $U = (U_1, \dots, U_q)$ и выходов модели $Y = (Y_1, \dots, Y_m)$. учитывая в первом случае фактор управляемости, т. е. определение возможности управлять каким-либо фактором, а во втором, принимая за критерий количество информации о близости к реализации целей управления в объекте, которое несет данный выход.

В качестве экспертов привлекаются опытные технологи (операторы энергоблоков, инженеры-наладчики и т. п.). Процедура экспертных оценок имеет две основные модификации: метод непосредственного ранжирования и метод парных сравнений.

После обработки данных экспертизы получают ранжированные ряды всех претендентов на входы и выходы модели:

$$\left. \begin{array}{l} X_1 > X_2 > \dots X_n; \\ U_1 > U_2 > \dots U_q; \\ Y_1 > Y_2 > \dots Y_m; \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

где знак «>» обозначает предпочтительность.

Рациональные числа n, q, m характеризующие модель, т. е. размерность ее входов и выходов, выбираются также экспертным методом.

Первая, простейшая модель, характеризуется тремя числами $F_1 = \langle n_1, q_1, m_1 \rangle$, причем характер связи $Y = F_1(XU)$, где $Y = (y_1, \dots, y_{m_1})$; $X = (x_1,$

..., x_{n1}); $U = (u_1, \dots, u_{q1})$; не выясняется, так как на данном этапе модель рассматривается как «черный ящик».

Вторая модель, $F_2 = \langle n_2, q_2, m_2 \rangle$, выбирается экспертами из трех:

$$\begin{aligned} F_2' &= \langle n_1 + 1, q_1, m_1 \rangle; \\ F_2'' &= \langle n_1 + 1, q_1, m_1 \rangle; \\ F_2''' &= \langle n_1 + 1, q_1, m_1 \rangle \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким образом, используя ранжированные ряды (2.4) и тройки (2.5), получаем последовательность моделей объекта $F_1, F_2, \dots, F_p$, расположенных в порядке их уточнения и усложнения. Далее также экспертным путем устанавливается предпочтение в этом ряду, например,

$$F_1 < F_2 < \dots F_2 > F_{2+1} > \dots < F_l.$$

Это означает, что модель $F_2 = \langle n_2, q_2, m_2 \rangle$ будет идентифицироваться.

После определения уровней иерархии модели, ранжирования и селекции ее входов и выходов проводится внутренняя структуризация модели теплоэнергетической установки на основании имеющейся априорной информации.

Информация о моделируемом теплоэнергетическом оборудовании условно делится на три вида:

- топологическая (ТИ);
- параметрическая (ПИ);
- режимная (РИ).

В соответствии с этим все необходимые для модели данные могут быть представлены в виде трех списков (или информационных массивов):

1. Связи элементов системы (номера: элементы первой связи, второй связи и т. д.).
2. Характеристики элементов системы (номер и название элемента, его характеристика и т. д.).
3. Данные о режиме системы (номер связи или элемента, название режима работы и его параметры).

Таким образом, для решения задачи моделирования с помощью вычислительной техники системы, представленной в виде графа, достаточно информации о соединенных между всеми входящими в нее элементами, характеристиках каждого элемента и заданных параметрах режима. Основная ТИ, заключенная в графе, состоит в графическом выражении связей между вершинами графа. Положительные стороны этого метода ис-

пользуются для решения задачи моделирования, так как технологическая схема любой реальной теплоэнергетической установки по своей топологической структуре эквивалентна некоторому графу.

Представление схемы теплоэнергетической установки в виде графа позволяет осуществить математически строгое и в то же время достаточно наглядное ее рассмотрение. Систему элементов и связей, моделирующую, например котельную установку, можно представить в виде графа, где каждому элементу оборудования котельной установки соответствует вершина графа, а связи между элементами оборудования или с внешними объектами — дуга графа. Некоторые смежные вершины могут быть соединены не одной, а двумя противоположно или одинаково направленными дугами. Последний случай отражает наличие двух связей, осуществляемых при помощи разных теплоносителей (например, связи горелок котла с воздухоподогревателем по воздуху и дымовым газом). В качестве примера на рисунке 10 приведена расчетная тепловая схема прямооточного котла и соответствующий ей ориентированный граф.

Внутренние (и внешние) связи в модели котельной установки задаются в виде так называемой матрицы соединений вершин графа, дополненной

Рисунок 10. Расчетная тепловая схема прямооточного котла и соответствующий граф. Элементы оборудования котла: I — горелка; II, III, IV — нижняя, средняя, верхняя радиационные части; V — потолочный экран; VI — ширмы; VII, VIII — конвективный и вторичный пароперегреватели; IX — экономайзер; X — воздухоподогреватель; XI — дымосос; XII — дутьевой вентилятор; XIII — питательный насос; XIV — цилиндр высокого давления; XV, XVI — первый и второй впрыски; B — воздух; T — топливо.

матрицей видов связей по энергоносителям. На рисунке 11 справа показана матрица соединений для графа, изображенного на рисунке 10. Единицы в J -х строках правой матрицы дают логический признак K -го элемента оборудования, из которого исходит («+») или в который входит («-») данная J -я связь. При этом строка, соответствующая связи между элементами оборудования установки (внутренняя связь), всегда имеет в правой матрице два ненулевых члена, а именно, +1 и -1, а строка, соответствующая связи между элементом оборудования установки и внешним объ-

Признак наличия связи посредством						Номер связи	Признак наличия связи для элемента оборудования К																		
							γ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI		
					1	1	-1																		
				1		2	1	-1																	
					1	3	-1									1									
				1		4		1	-1																
1						5		1	-1																
				1		6			1	-1															
1						7			1	-1															
				1		8				1	-1														
			1			9				1	-1														
				1		10					1	-1													
			1			11					1												-1		
1						12																	-1		
			1			13						-1										1			
				1		14						1	-1												
			1			15						1												-1	
1						16																	-1		
			1			17							-1										1		
				1		18							1	-1											
			1			19							1									-1			
	1					20								-1								1			
	1					21									1										
				1		22									1	-1									
1						23										-1						1			
1						24																-1			
1						25		-1								1									
				1		26										1	-1								
					1	27												-1							
				1		28										-1		1							
			1			29										1	-1								
			1			30											1								

Рисунок 11. Матрица соединений и вывод связей по энергоносителям для прямоточного котла. 1 — топливо; 2 — воздух; 3 — дымовые газы; 4, 5 — первичный и вторичный пар соответственно; 6 — вода.

ектом (внешняя связь), имеет один ненулевой член: + 1 для исходящих и –1 для входящих внешних связей системы. Матрица соединений, которую также называют *структурной матрицей*, полностью отображает топологическую структуру графа технологической схемы котельной установки и позволяет перевести эту структуру на язык алгебры или теории множеств, что имеет важное практическое значение при моделировании энергетических установок.

Единицы в L -х столбцах матрицы видов связей по энергоносителям дают логический признак вида L -го энергоносителя, посредством которого осуществляется J -я связь, в той или иной фазе его состояния. Случаи изменения фазы энергоносителя в процессе, происходящем в каком-либо элементе оборудования, определяются из столбцов левой матрицы по признаку прекращения связей с помощью данного энергоносителя в одной фазе и появления связей в другой фазе (например, преобразование в тракте котла после встроенной задвижки). Случаи смешения энергоносителей в элементах оборудования также определяются из столбцов левой матрицы по признаку прекращения их связей и появления связей соответствующей смеси.

Так, в горелках котла (см. рисунок 10, элемент 1) имеет место прекращение связи по воздуху (связь 1, энергоноситель 1) и связи по топливу (связь 2, энергоноситель 2) с появлением новой связи по продуктам сгорания (связь 3, энергоноситель 3). По признаку вида энергоносителя выбираются соответствующие уравнения параметров состояния и характеристик процессов. Все параметры и зависимости между ними рассматриваются соответственно как переменные и функции, заданные на графе. Полное число V параметров связей котельной установки при общем числе связей J и числе однопараметрических связей N составляет:

$$V = 3J - 2N \quad (2.6)$$

Следующий этап формирования модели — ввод ограничений входных и выходных сигналов. Термодинамические и расходные входные и выходные параметры установки X и Y не могут принимать совершенно произвольные значения, они могут изменяться в пределах физически возможных и технически осуществимых состояний энергоносителей и конструкций, а также в пределах технически допустимых начальных и эксплуатационных состояний материалов в элементах оборудования. Это в условиях технической эксплуатации оборудования большей частью регламентируется уставками технологических защит. Перечисленные ограничения для различных элементов оборудования и энергоносителей можно отразить в виде неравенств

$$\begin{aligned} X^* &\leq X \leq X^{**}; \\ U^* &\leq U \leq U^{**}; \\ Y^* &\leq Y \leq Y^{**}, \end{aligned} \tag{2.7}$$

где индексы «*» и «**» относятся соответственно к минимальным и максимальным допустимым значениям параметров. Ограничения вида (2.7) определяют в многомерном пространстве переменных некоторую область, называемую *допустимой*. Термодинамические и расходные параметры в процессе моделирования могут принимать лишь такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области. Геометрически допустимая область в силу разнообразия характера учитываемых ограничений может иметь весьма сложный характер.

Четкое указание допустимой области изменения параметров входит в математическое описание моделируемого объекта и считается совершенно необходимым условием при моделировании любой теплоэнергетической установки. В некоторых случаях для повышения дидактических возможностей модели тренажера ограничения могут быть больше (или меньше) уставок технологических защит и достигать максимальных (или минимальных) значений шкал вторичных приборов. Допустимая область задается отдельно по каждой переменной и имеет большое значение при разработке программного обеспечения.

После априорного формирования структуры модели, задания номенклатуры внутренних связей и ввода ограничений на входные и выходные сигналы решается вопрос об объеме специальных («модельных») идентификационных экспресс испытаний котлоагрегата для определения недостающих данных для разработки модели.

Организация этих испытаний, имеющих цель найти неизвестные связи между выходным параметром и множеством входных параметров (независимых переменных), основывается на известной математической теории планирования эксперимента.

Учитывая, что конечная цель разработки модели — реализация устройства для тренажера человека-оператора, где восприятие информации происходит считыванием ее с приборов, выбирается соответствующий класс испытаний. Обычно эти испытания проводятся по 2 классу точности, т. е. без организации специальных теплотехнических измерений, характерных, например, для 1 класса точности и исследовательских работ.

Особенность «модельных» испытаний — необходимость определения таких функциональных зависимостей, которые обычно не выявляются в ходе стандартных («прейскурантных») экспериментально-наладочных работ. Так, моделирование системы газоснабжения котла требует детального

исследования всех элементов газопроводов для разработки математической модели расходов и давлений природного газа.

Основное внимание экспериментатора при подготовке и проведении «модельных» испытаний должно быть уделено тому, чтобы при минимальных затратах получить максимальную информацию о моделируемом объекте. Этому требованию более всего отвечает организация испытаний с применением упомянутой выше методики планирования эксперимента. Часть информации, необходимая для моделирования, может быть получена из имеющихся материалов по блоку (заводские расчеты, нормативные документы и др.), недостающая же часть — методом идентификации «черного ящика» (т. е. получение аппроксимирующих функций типа «вход – выход»). Такая функция почти не имеет познавательного (физического) значения, но при имитационном моделировании значение ее велико.

При планировании эксперимента математической моделью служит функция отклика, связывающая выходной параметр, представляющий собой результат опыта, с переменными параметрами — независимыми переменными. Последние называются факторами, координатное пространство с координатами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ — *факторным пространством*, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве — *поверхностью отклика*.

Математическая модель при планировании эксперимента чаще всего представляется в виде полинома, отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция.

Использование традиционных методов экспериментирования связано с проведением большого числа опытов и потерей части полезной информации. Методы планирования эксперимента, когда одновременно варьируются все факторы, позволяют получать количественные оценки не только от воздействия основных факторов, но и от их взаимодействия между собой. Таким образом, интересующие эффекты определяются с меньшей ошибкой, чем при традиционных методах исследования. В зависимости от числа исследуемых переменных различают однофакторный и многофакторный эксперименты.

Вопрос о выборе числа и вида необходимых факторов следует рассматривать прежде всего с точки зрения цели исследования. Необходимо решить какие отклики интересуют нас в первую очередь. Так, в случае построения модели энергоблока для тренажа переменными откликами считаются показания основных приборов щита управления (температура, давление, расходы и т. д.). После выбора переменных откликов определяются факторы, влияющие на эти переменные. Обычно число таких факторов довольно велико, поэтому необходимо выбрать наиболее существенные.

Следующий шаг состоит в определении числа уровней, на которых следует устанавливать и измерять данный фактор. Очевидно, что число уровней следует выбирать минимально возможным и в то же время достаточным для достижения цели эксперимента. Так, если интерес представляют только линейные эффекты, достаточно выбрать два уровня на концах интервала изменения данного фактора. При изучении квадратичных эффектов необходимо использовать три уровня, для кубических — четыре и т. д. В общем случае число уровней равно минимальному числу необходимых для установления функции точек. Анализ экспериментальных данных и определение коэффициентов полиномиальной функции существенно упрощается при ортогональном разбиении. Выбирают две крайние точки области изменения входной переменной в качестве двух уровней, а остальные уровни располагают так, чтобы они делили полученный отрезок на равные части.

Факторный принцип «модельного» эксперимента базируется на дисперсионном анализе, который особенно эффективен при изучении нескольких факторов. Задача дисперсионного анализа — выявление влияния разнообразных факторов на изменчивость средних значений, наблюдаемых случайных величин. При выполнении анализа полагают, что случайные ошибки наблюдений имеют нормальное распределение, опыты проведены с одинаковой точностью и факторы оказывают влияние только на изменение средних значений при неизменной дисперсии. Методы дисперсионного анализа и техника статистических вычислений подробно изложены в ряде работ.

В заключение отметим, что при «модельных» экспериментах рассматривается большое число факторов. Однако при этом выполнение факторного эксперимента даже на двух уровнях приводит к значительному увеличению опытов и усложнению обработки результатов. Кроме того, точность поиска снижается по мере увеличения числа искомых коэффициентов уравнений регрессии. Поэтому всюду, где это возможно, следует заменять многочлен простейшей трансцендентной функцией.

Этап определения функциональных статических характеристик — один из основных этапов разработки модели. Он заключается в составлении таких математических описаний элементов системы, которые позволяют вычислить значение выходных переменных при известных входных. Опираясь математическими описаниями такого рода, можно выделить связи между переменными, интересующими разработчика модели, не определяя при этом связей других переменных. Такой подход принципиально отличается от обычного, требующего для исследования системы воспроизведения всех происходящих в ней процессов. Функциональное описание

позволяет представить в качестве элемента, не раскрывая его внутреннего содержания, часть системы, содержащую любое количество исходных элементов, т.е. элементов, заданных при формировании исходной модели. Так, при составлении модели пароводяного тракта котла отдельные его поверхности объединяются в элементы системы по принципу наличия выходных переменных. Таким образом, посредством функционального описания можно представить в качестве «черного ящика» — элемента любую сколь угодно сложную часть системы (в один элемент объединяются, например, экономайзер, НРЧ, СРЧ и ВРЧ).

В соответствии с природой рассматриваемого явления — детерминированной или стохастической — различают жесткие или вероятностные функциональные характеристики. В моделях теплоэнергетических установок, как правило, рассматриваются только жесткие функциональные характеристики. Они описывают детерминированные процессы без применения вероятностных характеристик. Но из этого не обязательно следует, что лежащие в их основе явления не имеют вероятностей природы, наоборот, процессы в энергетических установках по своей природе — стохастичны.

Дело в том, что мы оперируем со средними значениями (математическими ожиданиями), а не с распределениями величин. Таким образом, с целью упрощения модели проводится детерминированное описание объекта моделирования, имеющего стохастическую природу. Для повышения дидактических возможностей тренажера при реализации модели при необходимости осуществляется рассеивание выходных детерминированных сигналов с помощью специально устанавливаемого генератора случайных сигналов таким образом, чтобы математическое ожидание рассеянного сигнала совпадало с математическим ожиданием выходного сигнала объекта моделирования. Величина выходного сигнала модели Y в этом случае будет состоять из детерминированной составляющей $F(X_1, \dots, X_n)$, обусловленной влиянием и изменением факторов $X_1, \dots, X_n$ и составляющей ξ , обусловленной действием генератора случайных сигналов:

$$Y = F(X_1, \dots, X_n) + \xi,$$

причем ξ должна быть случайной величиной, имеющей нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием.

Как было отмечено выше, исследования энергетических установок с учетом фильтрующих психофизиологических свойств человека-оператора показали, что для обучения допустима линеаризация модели нелинейного объекта относительно идентифицируемых параметров. Линейность такого

рода позволяет построить относительно простые и достаточно эффективные алгоритмы идентификации функциональных характеристик, т. е. разделить нелинейность и динамику объекта (модель Гаммерштейна) [21]. Модель позволяет представить нелинейный объект F_0 в виде последовательной комбинации двух звеньев: нелинейного безынерционного (F_{01}) и динамического линейного (F_{02}):

$$F_0 = F_{01} \times F_{02}, \quad (2.8)$$

где F_{01} — функция $f(\bullet)$; F_{02} — линейный дифференциальный оператор, определяемый весовой функцией $\omega(t)$ (рисунок 12 а).

В одномерном случае ($n = m = 1$) необходимо идентифицировать две функции $f(\bullet)$ и $\omega(t)$, характеризующие выход модели

$$y(t) = \int_0^\infty \omega(t) f[x(t - \tau)] d\tau. \quad (2.9)$$

Рисунок 12. Модель Гаммерштейна и ее многомерные обобщения.

Представим $f(\bullet)$ и $\omega(t)$ в виде разложения по заданным системам функций:

$$\varphi_j(\bullet) \ (j = 1, \dots, q) \text{ и } \omega_l(t) \ (l = 1, \dots, p);$$

$$f_j(\bullet) = \sum_{j=1}^q d_j \varphi_j(\bullet); \quad \omega_t = \sum_{l=1}^p l_l \omega_l(t). \quad (2.10)$$

Подставляя эти выражения в (2.8), получаем

$$y(t) = \sum_{j=1}^q \sum_{l=1}^p d_j l_l y_{jl}(t), \quad (2.11)$$

где $y_{jl} = \int_0^\infty \omega_l(\tau) \varphi_j[x(t - \tau)] d\tau \quad \left(\begin{smallmatrix} j=1, \dots, q \\ l=1, \dots, p \end{smallmatrix} \right)$ — выход линейного динамического элемента с весовой функцией, на вход которой подан сигнал $\varphi_j[x(t)]$.

Многомерная модель Гаммерштейна ($n > 1$; $m = 1$) образуется естественным обобщением

$$y(t) = \int_0^\infty \omega(\tau) Z[x(t - \tau)] d\tau, \quad (2.12)$$

где нелинейное звено $Z(\bullet)$ имеет n входов $x_1, \dots, x_n$ и один выход (рисунок 12 б)

$$Z(X) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i);$$

Здесь идентифицируются функции $\omega(t), f(\bullet), \dots, f_n(\bullet)$.

Еще более общая форма модели Гаммерштейна связана с представлением (рисунок 12 в)

$$Z(X) = F(X), \quad (2.13)$$

где $f(\bullet)$ — скалярная функция векторного аргумента, которую следует представить в виде разложения по системе функций многих переменных.

И, наконец, обобщая, можно линейное звено (рисунок 12 г) записать как

$$u(t) = \sum^n \int^T \omega_i(\tau) f_i[x_i(t - \tau)] d\tau, \quad (2.14)$$

где $\omega(t)$ и $f(\bullet)$ ($i = 1, \dots, n$) — идентифицируемые функции. Все эти модели линеаризуются относительно соответствующих идентифицируемых параметров и сводятся к виду

$$y(t) = \sum_{j=1}^k c_j y_j(t), \quad (2.15)$$

где c_j — идентифицируемые параметры модели, $y_j(t)$ — функционалы, зависящие явно от входа объекта.

Приведенные выше принципиальные соображения по поводу идентификации функциональных характеристик и были положены в основу разработки модели энергоблока.

При идентификации статических математических моделей элементов энергоблока F_{0l} , основанной на рассмотрении физической природы процесса, обычно составляется система балансовых уравнений. В каждом K -м элементе оборудования теплоэнергетической установки характер, количественные зависимости и направленность процессов определяются законами термодинамики, гидродинамики, аэродинамики и т. д. Зависимости между параметрами связей можно однозначно и единообразно описать уравнениями энергетического, расходного и гидравлического балансов в элементах оборудования, а также уравнениями изменения энтальпии каждого из видов энергоносителя.

Уравнения для всей установки и ее внешних связей, отнесенные к одинаковому промежутку времени, имеют следующий вид:

балансовое уравнение энергии для каждого K -го элемента оборудования

$$\sum_{j=1}^{J_k - N_k} (\gamma Gh)_j + \sum_{n=1}^{N_k} (\gamma P_{эм})_n = 0; \quad (2.16)$$

уравнение материального баланса для каждого l -го энергоносителя для K -го элемента оборудования

$$\sum_{j=1}^{J_{KB}} G_j = 0; \quad (2.17)$$

балансовое уравнение гидродинамического (аэродинамического) напора для каждого l -го энергоносителя K -го элемента оборудования

$$(P' - \Delta P - P'')_{kl} = 0; \quad (2.18)$$

или

$$(P' + \Delta P - P'')_{kl} = 0; \quad (2.19)$$

уравнение изменения энтальпии l -го энергоносителя в K -м элементе оборудования

$$(h' - \Delta h - h'')_{kl} = 0; \quad (2.20)$$

или

$$(h' + \Delta h - h'')_{kl} = 0; \quad (2.20a)$$

где $(k = 1, 2, \dots, K; j = 1, \dots, J_{kl}; l = 1, \dots, l_k; n = 1, \dots, N_k)$.

Здесь G — расход энергоносителя, отнесенный к принятому промежутку времени; $P_{эм}$ — мощность электрической или механической связи; P и h — давление и энтальпия энергоносителя на исходящей (') или входящей (") связи элемента оборудования; ΔP_p и Δh — характеристики изменения давления и энтальпии процессов в элементах оборудования; γ — коэффициент, учитывающий потери энергии связующего потока в окружающую среду; для входящей связи он соответствует обычно употребляемому коэффициенту теплового потока, механическому или электрическому КПД, а для исходящей связи — обратной величине.

Например, для модели пароперегревателя котла составляется пять балансовых уравнений: теплового баланса, материального расхода пара, материального баланса расхода продуктов сгорания, баланса гидравлических напоров пара и баланса аэродинамических напоров для продуктов сгорания.

Соотношения (2.18) и (2.20) имеют место в моделях с процессами расширения, дросселирования или охлаждения теплоносителей; напротив, при сжатии или нагревании теплоносителей справедливы выражения (2.19) и (2.20a).

Совокупность системы уравнений вида (2.17)–(2.20a), системы неравенств вида (2.8) и схемы связей в виде матрицы соединений (см. рисунок 11) и представляют собой исходную математическую модель стационарных состояний теплоэнергетической установки, которую далее необходимо будет дополнить логической и динамической частями. В геометрической интерпретации приведенная система уравнений представляет нелинейную поверхность стационарных состояний теплоэнергетической установки в многомерном пространстве, координатами которого служат термодинамические и расходные параметры связей Z и конструктивные параметры элементов Z^k , т. е.

$$\Phi(Z, Z^k) = 0, \quad (2.21)$$

где $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ — совокупность уравнений балансов вида (2.17)–(2.20а).

Таким образом, систему уравнений (2.21) необходимо решить относительно совокупности термодинамических и расходных параметров Z применительно к заданным показателям и характеристикам внешних факторов $A = A_c$ (например, для котла к теплотворной способности топлива, давлению природного газа, температуре окружающего воздуха и т. п.) и к заданным значениям конструктивных параметров.

Полную совокупность параметров связей теплоэнергетической установки Z удобно разделить на независимые X и зависимые Y . Подмножество или частичная совокупность независимых переменных X формируется из полной совокупности параметров связей Z , если число параметров связей превышает число уравнений (2.21). Остальные параметры связей полностью определяются системой уравнений (2.21) и относятся к совокупности зависимых параметров $Y(X)$, причем $Z = (XY)$. Превышение числа параметров над числом уравнений для отдельных элементов оборудования и теплоэнергетической установки в целом означает, что система уравнений имеет бесчисленное множество решений. Иначе говоря, ряд стационарных сбалансированных состояний установки можно получить совместным изменением термодинамических и расходных параметров. Именно благодаря этому обстоятельству и достигается имитация множественности численных значений зависимых параметров (показаний приборов) при задании на модели тренажера человеком-оператором тех или иных независимых термодинамических или расходных параметров.

Конкретный состав совокупности X , например для конкретной котельной установки энергоблока (рисунок 10) можно определять при помощи специальной матрицы функциональных связей (рисунок 11). Единицы в i -х строках матрицы дают логический признак наличия непосредственной связи i -й переменной с одной или несколькими переменными, отображаемой i -м уравнением балансов. Как видно из рисунка 10, граф котельной установки имеет значительное число пересекающихся контуров подграфов по энергоносителям. Поэтому прямой расчет зависимых переменных $Y(X)$ возможен лишь по отдельным ветвям деревьев подграфов. Согласно матрице функциональных связей, для каждого U_k -го уравнений K -го элемента оборудования оставляется по крайней мере один такой независимый параметр $Y_{ик}$, определяемый из этого уравнения в явном виде. Он не может быть найден из уравнений балансов для соседнего элемента оборудования. Такой подход обеспечивает совместность уравнений по отдельным элементам оборудования и системе в целом.

В элементах оборудования, замыкающих контуры графа, выделяются

зависимые параметры связей, определяемые итерационно (или же ими приходится задаваться). В целом даже для достаточно сложной системы котельной установки такие параметры относительно немногочисленны.

Характер взаимосвязей между параметрами котельной установки определяется тем, что она относится к многоэлементным неоднородным системам, где имеют место направленные непрерывные процессы. Последние связаны с энергоносителями таким образом, что конечные или «выходные» параметры связей предшествующих процессов служат начальными или «входными» параметрами для некоторого последующего процесса. Поэтому в системе уравнений балансов элементов оборудования (2.21) каждый зависимый параметр представляется в виде неявной функции от всей совокупности независимых параметров X и зависимых параметров Y . Такую «замкнутую» взаимосвязь параметров можно представить в векторно-матричной форме

$$Y = Y[X, Y(X)] \quad (2.22)$$

Для каждого K -го элемента оборудования теплоэнергетической установки в роли независимых параметров выступают:

- во-первых, независимые параметры системы, относящиеся к связям и конструкциям этого элемента оборудования X_{ck} ,
- во-вторых, зависимые параметры системы Y_{ck} , относящиеся к связям K -го элемента оборудования и вычисляемые из уравнений других, связанных с ним элементов оборудования.

Структура взаимосвязей параметров в уравнениях (2.21) принимает следующий вид:

$$Y_k = Y_k(X_k) = Y(X_{ck}, Y_{ck}) \quad (2.23)$$

Количество уравнений в моделируемых подсистемах теплоэнергетической установки (2.21) с учетом упрощений типа (2.22) и (2.23) может достигать нескольких сотен. Обычно переменных значительно больше, чем уравнений, поэтому в процессе моделирования часть из них следует принять за исходные данные или их должен задать инструктор (с пульта инструктора), или обучаемый оператор (с пульта оператора).

Часть зависимостей между переменными невозможно или затруднительно представить в виде обычных алгебраических или трансцендентных уравнений, их приходится использовать в виде процедур, или произвольных алгоритмов, включающих арифметические и логические операторы.

Кроме того, в практике эксплуатации теплоэнергетической установки постоянно проводятся различные переключения запорной и регулирующей арматуры, приводящие к изменению расходных и термодинамических зависимостей, граничных условий и т. п.

Таким образом, перейдем к этапу формирования логической части модели. Значение ее относительно велико, так как из общего объема операций, выполняемых вычислительным комплексом тренажера, примерно 60% составляют математические операции и около 40% — логические.

При формировании логической части модели используются комбинационные функции (функции алгебры логики, булевой алгебры выбора, функции суммирования и сравнения) и предикаты или последовательностные функции (функции памяти, задержки, перехода и т. п.). Для этой цели также применяются и гибридные функции Терно, представляющие собой произведения числовой функции и функции предикатов [22].

Если все предыдущие этапы касались непрерывной параметризации моделируемой системы, то на данном этапе проводится дискретная параметризация, т. е. такая параметризация, когда в описание модели вводятся параметры, принимающие только целочисленные значения. С их помощью можно описывать объекты и процессы, которые не могут быть охарактеризованы с помощью обычных непрерывных числовых параметров, а различаются лишь качественно. Особое значение для моделирования технологических процессов и установок имеют качественные параметры с двухбалльной областью определения (0, 1), называемой булевой. Цифры 1 и 0 означают, соответственно, наступление и не наступление рассматриваемого события. Например, открытие или закрытие запорной арматуры, включение или отключение электродвигателей собственных нужд, достижение непрерывными параметрами процесса пределов срабатывания технологических защит и т. п.

Необходимо отметить, что цифры 0 и 1 не выражают количественных соотношений и являются не числами, а символами.

Обобщенное описание состояния подсистемы (или ее элемента) достигается сочетанием непрерывной и дискретной параметризации. Характер этих зависимостей может быть любым:

- для количественных (непрерывных) параметров зависимости обычно задаются в виде систем уравнений (алгебраических, трансцендентных или дифференциальных);
- для качественных параметров могут использоваться табличные способы задания зависимостей, основанные на перечислении всех возможных (штатных) комбинаций значений параметров.

Сочетание непрерывной и дискретной параметризации достигается в

виде произвольного алгоритма, связывающего количественные и качественные параметры. Так, для котла с уравновешенной тягой разрежение вверху топки задается в виде системы произвольных алгоритмов

$$S''_T = [(S''_T)_1 + (S''_T)_2 + (S''_T)_3]S_0; \quad (2.24)$$

$$(S''_T)_1 = [(P_6 S_1 + V_{\Delta 2} S_2) (S_3 K_1 + S_4 K_2 + S_8 K_3 + S_6 K_4)]S_{01}; \quad (2.25)$$

$$(S''_T)_2 = 2(\delta_{\Delta 1} S_T + \delta_{\Delta 2} S_8)S_{02}; \quad (2.26)$$

$$(S''_T)_3 = (K_5 S_9 + K_6 S_{10} + K_7 S_{11} + K_8 S_{12})S_{03}; \quad (2.27)$$

где $(S''_T)_1$, $(S''_T)_2$, $(S''_T)_3$ — составляющие разрежения вверху топки; P_6 — давление воздуха в общем коробе за регенеративным воздухоподогревателем (РВП); $V_{\Delta 2}$ — объем дымовых газов; $\delta_{\Delta 1}$, $\delta_{\Delta 2}$ — степень открытия направляющих аппаратов дымососов; S_0 , ..., S_{12} — булевы параметры.

Функция $S''_T = f(S_1, S_2, \dots, S_n)$ задается в табличном (матричном) виде, например, для $(S''_T)_1$:

$\begin{matrix} S_T \\ K_i \end{matrix}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_{01}	Условие работы оборудования
K_1	1	0	1	0	0	0	1	Дымосос «А» до растопки котла
K_1	1	0	1	0	0	0	1	То же «Б»
K_2	1	0	0	1	0	0	1	Два дымососа до растопки котла
K_3	0	1	0	0	1	0	1	Дымосос «А» при горении в топке
K_3	0	1	0	0	1	0	1	То же «Б»
K_4	0	1	0	0	0	1	1	Два дымососа при горении в топке

Здесь $K_1 - K_4$ — численные коэффициенты непрерывных уравнений, зависящие от сочетания включенного оборудования (один или два работающих дымососа при наличии горения в топке или без него и т. д.).

Таким образом, зависимости между параметрами при формировании модели с учетом логической части задаются в общем случае не простыми формулами, а произвольными алгоритмами с исполь-

зованием любых средств как количественных, так и описательных.

Различают булевы модели с односторонними и двусторонними переходами. В первой модели сначала все параметры имеют значение 0 и какие-то моменты времени (разные для разных параметров) могут переменить это значение на 1, после чего их обратный переход (к 0) оказывается уже невозможным.

В модели с двусторонними переходами параметры могут любое число раз менять свои значения с 0 на 1 и обратно.

Примером модели с односторонними переходами может служить система технологических защит (при их срабатывании), а моделями с двусторонними переходами — система сигнализации и системы запорной арматуры и шиберов котла.

Все эти модели связаны с активной деятельностью человека в человеко-машинной системе. Переходим к применению «имитационных» моделей.

Имитационными принято называть модели реальных управляемых объектов, используемые в человеко-машинных системах при воспроизведении на ЭВМ состояний системы, которые соответствуют различным условиям ее работы. К ним относятся внешние и внутренние возмущения, наносимые как инструктором — внешние (влияние среды), так и оператором — внутренние. Вмешательство оператора в работу модели дополняет процедуры реализации детерминированных алгоритмов модели неформализованными эвристиками — следствиями деятельности человека. Эффективное усечение множества перебора вариантов, необходимое для реализации единственного решения, характеризует положительный опыт, получаемый на тренажере в процессе обучения.

Термин «имитационная» тем самым определяет то обстоятельство, что с помощью этой модели можно получить (имитировать) все реакции объекта моделирования на любые реально мыслимые (внешние и внутренние) возмущения.

К классу имитационных можно отнести модель, которая:

- обладает структурным и функциональным гомоморфизмом (в том числе адекватной реакцией на внешние и внутренние возмущения);
- представляет собой информационный эквивалент образа;
- эффективна в системе «человек – машина».

Разработанная автором математическая модель тепловой части энергоблока, удовлетворяет указанным условиям, поэтому пригодна для решения всех вопросов, определяющих организацию процесса обучения оперативного персонала.

Структурный гомоморфизм модели энергоблока достигается отображением тепловой схемы установки на технологический граф, узлы и дуги

которого дополнены технологическими кодами прообразов этих элементов в схеме установки. Количественные отношения между параметрами моделируемых процессов отображаются системой алгебраических, трансцендентных и дифференциальных уравнений и неравенств. Размеры и качественный состав системы уравнений зависят от технологического графа (т. е. не числовой, а логической информации). Автоматическое формирование системы согласно приведенным выше произвольным алгоритмам (логически числовым функциям) по условиям конкретного графа является ключевым моментом в модели.

В качестве универсального средства структурно-функционального описания объекта моделирования использованы логически числовые функции, позволившие создать самонастраивающуюся (естественно, по желанию человека-оператора или инструктора) оперативную модель теплоэнергетической установки. При этом числовые функции логически числовых операторов определены в пространстве числовых характеристик узлов, а логические функции на множестве предметных переменных технологического графа.

Каждый элемент технологического графа характеризуется некоторой информацией (логически числовые характеристики дуг и узлов). С этой точки зрения технологический граф представляет собой информационную сеть, по каждой дуге которого протекает некоторый поток информации, а узлы отмечают места функционального согласования инцидентных им потоков информации.

Таким образом, примененные методы сжатых представлений структур графом больших систем и машинной идентификации по технологическим принципам их прообразов, разделение нелинейной статики и динамики, логически числовая интерпретация тепловой схемы и использование научно обоснованных упрощений при ее математическом описании позволили создавать эффективную в смысле обучения человека в человеко-машинной системе, оперативную модель теплоэнергетической установки.

Итак, начальная концепция моделирования энергообъектов для тренажеростроения, запатентованная в СССР в виде способов и устройств, формулировалась следующим образом.

Подход к построению всережимной модели реального времени состоит в разделении функций статического и динамического моделирования с направленной асимметрией точности разделенных функций, причем моделирование осуществляется путем точного нелинейного статического и качественного динамического преобразования входных управляющих и возмущающих воздействий. Полученная непрерывная нелинейная динамическая система управляется дискретной логикой (Авторские свидетельства

ства СССР №№1128286, 1319065, 1444861, авторы: Магид С. И., Токаев С. С., Архипова Е. Н.).

Таким образом, в указанной модели допускается использовать точную нелинейную безынерционную статику и качественную динамику. Это является наиболее разумной альтернативой при рассмотрении множества конкретных моделей, которые могут быть реализованы в тренажере с учетом нелинейных функциональных характеристик объекта-прототипа и определенных психофизиологических свойств человека-оператора при зрительном восприятии им пространственных и временных характеристик объекта.

В 1984 г. в учебно-тренировочном центре Мосэнерго на ТЭЦ-25 (рисунок 13) введен в эксплуатацию комплексный полномасштабный тренажер теплофикационного энергоблока мощностью 250 МВт с котлом ТГМП-314, турбиной Т-250/300-240 и генератором ТВФ-320 (см. рисунки 14, 15), а также специализированные (локальные) тренажеры и автоматизированные учебные курсы по указанному оборудованию.

В течение 1985÷1990 гг. по указанию РУ Мосэнерго комплексные тренажеры энергоблоков Т-250 были внедрены на электростанциях ТЭЦ-23 и ТЭЦ-21 (см. рисунки 16, 17).

В этот же период были внедрены тренажеры станций с поперечными

Рисунок 13. ТЭЦ-25 Мосэнерго.

Рисунок 14. Тренажер энергоблока Т-250 МВт, установленный на ТЭЦ 25 Мосэнерго.

Рисунок 15. Тренажер энергоблока Т-250 МВт, установленный на ТЭЦ 23 Мосэнерго.

Рисунок 16. Тренажер энергоблока Т-250 МВт, установленный на ТЭЦ 21 Мосэнерго.

Рисунок 17. Тренажеры станции с поперечными связями, водогрейных котлов.

связями, водогрейных котлов, тренажеров химводоочистки, электросетевых предприятий, то есть тренажерной подготовкой была охвачена практически вся энергосистема Мосэнерго.

Здесь следует отметить, что довольно значительный объем необходимых к выполнению разработок по моделированию энергетических объектов за сравнительно короткое время потребовал корректировки используемой методологии в части уточнения следующих требований: обязательной (нормативной) *топологической полноты* моделирования энергообъектов, необходимой и достаточной *точности моделирования* в соответствии с теорией погрешностей, преодоления противоречивости самой постановки задачи *идентификации объекта* по априорной модели и, наконец самое главное, применения *естественно-научного подхода* к определению понятия *адекватности* модели энергетическому объекту.

Указанная корректировка потребовала от разработчиков принципиально нового и, причем, системного подхода к разработке тренажеров для подготовки персонала.

3. Новая системно-имитационная методология и современные научно-технические требования при моделировании эргатических распределенных систем для тренажеров эксплуатационного персонала энергетических объектов.

3.1. Проблемы, состояние моделирования, структура и сущность современных моделей энергообъектов.

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 стимулированием⁵ 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 необходимо рассмотреть 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.,

⁵ *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.*

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.

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) научно-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.

3.2. Современные требования новой методологии при разработке моделей эргатических систем.

Современные научно-технические требования и рекомендации при разработке новой методологии и реализации моделей эргатических систем энергообъектов⁶ для тренажеростроения в нашем понимании [20, 23 – 27], 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 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

⁶ Патент на изобретение №2611669 «Устройство подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования» от 28 февраля 2017 г. Патентообладатель: Акционерное общество «Тренажеры электрических станций и сетей» (RU), авторы: Магид Сергей Игнатьевич (RU), Архипова Елена Николаевна (RU).

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 эмпирическими фактами выглядит следующим образом. Современные энергообъекты, рассматриваемые как объект моделирования, в большинстве своем нестационарны, нелинейны, многомерны, со многими внутренними обратными связями, невелика или отсутствует вовсе априорная информация о форме и степени взаимосвязи между переменными в динамике в реальных условиях эксплуатации. Это значительно усложняет получение их адекватного математического описания. Использование разработчиком модели для этой цели априорной информации, которая имеется, например, в распоряжении конструктора (физические, химические, механические закономерности, нормативные документы) в большинстве случаев вызывает затруднения. Это определяется следующим.

Закономерности (уравнения кинетики, тепломассообмена, материального баланса и пр.) при эксплуатации энергообъекта значительно искажаются, т. е. изменяется форма и степень связи между переменными из-за изменения масштабов процесса, влияния помех, шумов различного рода, отклонения от идеальных условий [28].

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.⁷

⁷ По Дозорцеву В. М.: «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» [29].

9. 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 *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*.

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

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 нереализуемы⁸.

11. Имитационная модель является по существу программой для компьютера, а эксперимент над ней состоит в наблюдении за результатами

⁸ 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» [29].

расчетов по этой программе при различных задаваемых и вводимых экзогенных переменных. Имитационная модель должна обладать рядом 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.

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 элементные 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

ется 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»* [31].

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 [32].

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, измеряющий время и работающий с ритмом 8–10 в 1 с. Согласно теории сканирующего α -ритма, предложенной Уолтером [33], 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 недействительны 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 [34, 35], так и зарубежными материалами [36 – 38].

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 [12].

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 ана-

лиза 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 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 (рисунок 18).

Далее 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 персоналом⁹.

Указанные этапы и определяют уровень адекватности математической

⁹ 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

Рисунок 18. Классификация процедур моделирования по уровням адекватности.

модели для тренажера¹⁰, а значит и соответствие таким современным критериям науки, как объективность и опытная подтверждаемость.

Далее необходимо определить требования к собственно системе обучения персонала, а также сформулировать цели и сформировать структуру системы.

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)» [29].

¹⁰ Количественная оценка адекватности модели объекта проводится по энтропийному значению вариации переменных, т. е. по обобщенному информационно-экспертному критерию [23].

3.3. Требования к современной интегрированной системе обучения оперативного и обслуживающего персонала электроэнергетики. Цели и структура системы обучения.

В соответствии с научно-техническими требованиями и представлениями современная интегрированная система обучения и тренажа должна быть:

1. Стандартизированной, то есть соответствующей государственным и отраслевым стандартам, нормативно-техническим документам и регламентам, принятым в энергетической отрасли;

2. Научно-обоснованной, то есть научная методология системы обучения должна определять все ее компоненты: цели и средства, принципы и формы, методы и результаты;

3. Горизонтально-интегрированной, то есть охватывать в процессе обучения все производственные подразделения энергопредприятия (основные и вспомогательные цеха);

4. Вертикально-интегрированной, то есть охватывать процессом обучения практически все штатные единицы производственного персонала (от обходчика до главного инженера).

5. Адаптированной, то есть приспособляющейся к различному уровню подготовки персонала, а также к изменяющейся структуре и условиям эксплуатации энергооборудования.

Подробное рассмотрение разделов требований к современной интегрированной системе обучения и тренажа приведено в [26].

Анализ оперативной деятельности операторов энергоустановок показал, что оператор должен иметь:

- определенный объем теоретических знаний, необходимых для понимания оперативных ситуаций, возникающих при эксплуатации оборудования;
- навыки и умения: обнаружения, опознавания и идентификации сигналов, логического мышления, т. е. навыки построения причинно-следственных связей между теми или иными значениями параметров и положением исполнительных органов регулирующей аппаратуры (как систем автоматического, так и дистанционного управления), дистанционного управления (регулирования) технологическими параметрами, взаимодействия с аппаратурой автоматического регулирования, взаимодействия с аппаратурой, входящей в состав вычислительного комплекса.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно организовать процесс подготовки оператора следующим образом:

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ:

Автоматизированные учебные курсы (АУК) на базе ПЭВМ позволяют обучаемому усвоить принципы устройства и действия энергетического обо-

рудования, особенности его эксплуатации, получить знания и понятийные навыки управления этим оборудованием.

ВТОРОЙ УРОВЕНЬ:

Комплексный тренажер с полномасштабной имитацией рабочего места оператора и всережимными физическими моделями всего энергообъекта, позволяющими реализовать полученные на предыдущем уровне знания и навыки, осуществлять процесс обучения, используя практически любое, необходимое количество параметров и возмущающих воздействий при адекватной имитации поведения энергоустановки в режиме реального, ускоренного и замедленного времени.

При этом обучаемый должен усвоить и закрепить навыки и умения:

- взаимодействия с интерфейсом АСУ ТП, средствами управления, включая навыки считывания показаний, первоначальной классификации и обработки полученной информации;
- построения причинно-следственных связей между отклонениями тех или иных параметров от нормы, а также состоянием табло сигнализации или мнемосимволами с причинами этих отклонений;
- построение плана ликвидации тех или иных отклонений от нормы;
- управление технологическим процессом в нестационарных режимах (пуск, останов, предаварийные и аварийные ситуации).

3.4. Требования к современным тренажерам и автоматизированным учебным курсам (АУК) для подготовки персонала энергетики. Эффективность тренажерной подготовки.

Современное тренажеростроение при научно-методологической постановке задач моделирования объекта управления, анализа и синтеза подсистем тренажера, должно руководствоваться системными принципами единства функционально-целевых и причинно-следственных отношений модели и объекта с целью создания системы моделей и представлений, единых для разработчика тренажера и пользователя.

Принцип единства функционально-целевых отношений модели и объекта-прототипа означает реализацию целевой функции человеко-машинной системы — тренажера, а именно, обеспечение возможности обучения человека-оператора.

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

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

- обеспечение возможности качественного и количественного анализа информации и принятия решений;
- формирование и совершенствование у оператора профессиональных навыков и умений при заранее заданных отклонениях (смещениях) модели относительно моделируемого прототипа, то есть погрешности моделирования, обеспечивающих необходимую эффективность обучения.

Принцип единства причинно-следственных отношений модели и объекта характеризует методологию разработки тренажера, а именно, системно-эргономический подход, обеспечивающий системную адекватность тренажера объекту-прототипу.

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

- адекватность целей и условий;
- адекватность интерфейса (рабочих мест операторов энергообъектов);
- адекватность информационных потоков;
- адекватность математического моделирования;
- эргономическую адекватность;
- психологическую адекватность.

Принцип единства представлений означает возможность формирования у пользователя концептуальной модели объекта-прототипа адекватной модели, заложенной в проект разработчиком тренажера.

Реализация в тренажере трех системных принципов научной методологии — единства отношений: модели, объекта и представлений позволяет сконструировать дидактически совершенный тренажер, обеспечивающий формирование у обучаемых адекватных управлению объектом моделирования и процессами в нем: знаний, навыков и умений.

Соблюдение указанных принципов при разработке современного IT-тренажера позволяет регламентировать наличие в тренажере, как в средстве обучения персонала следующих ингредиентов: средств и методов математического моделирования объекта-прототипа, средств и методов системно-эргономического подхода при синтезе подсистем тренажера, средств учебно-методического обеспечения и контроля обучения, а также признаков цели обучения: обеспечение надежности и безопасности персонала и объекта управления.

Таким образом, современный IT-тренажер должен состоять из следующих блоков (см. рисунок 19):

- рабочего места оператора;
- рабочего места инструктора;
- модели объекта управления;
- модели АСУТП, включающей в себя штатный интерфейс, средства управления и базу данных;
- блока учебно-методического обеспечения;
- блока информационной поддержки оператора;
- блока ПО корректирующей рекурсивной идентификации (верификации, валидации).

Внедрение научной методологии в структуру образовательного процесса электроэнергетики подразумевает два аспекта: первый — разработка современных всережимных и полностью адекватных объекту регулирования IT-тренажеров, соответствующих целевой функции человеко-машинной системы, методология создания которых соответствует системно-эргономическому подходу, и второй — разработка автоматизированных учебных курсов и учебно-методического обеспечения процесса тренажерной подготовки, соответствующих современным научно-педагогическим подходам.

Рисунок 19. Структурная схема IT-тренажера АО «ТЭСТ».

Обозначения: РМО — рабочее место оператора, РМИ — рабочее место инструктора.

С точки зрения современной науки внедряемая система программно-технических средств синтезирует три подхода в организации процесса обучения:

- автоматизированные обучающие курсы (АУКи) — предназначены для получения персоналом знания схем, устройства и процессов энергетического оборудования — ориентированы на контекстный (предметный) подход к получению профессиональных знаний специалистами, основанный на прозрачности границ между учебной и профессиональной деятельностью;
- современные IT-тренажеры — предназначены для овладения персоналом навыками планирования штатных режимов и быстрой реакции в нестандартных ситуациях при отказах оборудования, то есть умения качественно работать в штатных и аварийных ситуациях — ориентированы на контекстный и андрагогический подходы, то есть на обучение на основе опыта и научение через действие;
- учебно-методическое обеспечение — автоматизированные сценарии тренировок (АСТ), сценарии парирования аварийных ситуаций (ПАС), компьютерные мастер-классы (МК) — ориентировано на развивающий подход, состоящий в том, что здесь ведущей становится тренажерная практика, имеющая своей целью не только овладение обучающимся известным, конкретным способом ликвидации аварийной ситуации, но и овладение всеобщим методом (общим подходом) к решению задач данного класса, то есть разрешения сходных проблем.

Организация эффективной тренажерной подготовки эксплуатационного и ремонтного персонала на тренажерах АО «ТЭСТ» достигается за счет реализации в тренажере *вещми* основных моделируемых и моделирующих подсистем:

- модели рабочего места обучаемого — воспроизводящей полимодальную — зрительную, тактильную и акустическую обстановку, соответствующую рабочему месту оперативного персонала и адекватно связанную с алгоритмом его деятельности;
- модели рабочего места инструктора — оборудованной необходимыми средствами отображения информации, управления и связи для эффективного контроля и управления процессом тренировок;
- модели объекта управления — топологически полной математической модели физических процессов, происходящих в технологическом оборудовании, т. е. системы дифференциальных и конечных уравнений, с помощью которой рассчитываются в режиме on-line все параметры энергоблока в стационарных, переменных и аварийных режимах;
- модели системы управления — полномасштабно копирующей реальную систему управления;
- модели системы обучения — включающей в себя необходимое и до-

статочное количество опций учебно-методического обеспечения (УМО), позволяющих инструктору проводить полноценное обучение персонала, а именно: сохранение и инициация режимов, комплект автоматизированных сценариев тренировок с оценкой, комплект аварийных ситуаций, контролирующая программа, графопостроение, система поддержки оператора, протоколы действий оператора, ошибок, сигнализаций, защит, блокировок и т. д.;

– моделирующей программной оболочки — разработанной в АО «ТЭСТ» и зарегистрированной в Роспатенте программной тренажерно-моделирующей среды STE (simulative training environment), которая с помощью набора программных модулей и библиотек, образующих масштабируемую адаптивную платформу для моделирования теплотехнического, электротехнического и водоочистительного оборудования и процессов с успехом решает все поставленные выше задачи.

Об эффективности тренажерной подготовки персонала можно судить по официальной отчетности электростанций и энергосистем. Так, после внедрения тренажеров энергоблоков Т-250, станций с поперечными связями, водогрейных котлов и др., в учебно-тренировочных пунктах на ТЭЦ-21, 23, 25 Мосэнерго, тренажеров в электросетях в 80–90 годах относительное количество отказов по вине персонала на выработку 1 млрд. кВт. ч электро и теплоэнергии снизилось в 1999 году по сравнению с 1989 годом примерно в 22 раза (рисунок 20), а экономический ущерб от аварийности по вине персонала на Харанорской ГРЭС после внедрения в 2002 году тренажеров для персонала котлотурбинного, электрического и химического цехов в 2003 году снизился в 3,8 раза (рисунок 21).

3.5. Современная реализация технических средств обучения (ТСО) на объектах генерации РФ.

В соответствии с «Планом работ по основным направлениям и на перспективу» Экспертной группы Совета по энергетической безопасности и технологической надежности (ЭБТН) Некоммерческого партнерства «Совет производителей электроэнергии и стратегических инвесторов электроэнергетики» (НП «СПЭ»), утвержденного Председателем Совета Межевичем В. Е., было принято решение о разработке Государственного стандарта «ГОСТ Р. Информационные технологии. Информационно-вычислительные системы. Программное и аппаратное обеспечение инструментальных комплексов технических средств обучения (ТСО) персонала энергетических объектов».

С целью подготовки материалов нового стандарта ТСО для включе-

Рисунок 20. Изменение количества отказов по вине персонала в Мосэнерго за период 1984÷1999 гг. и первое полугодие 2000 г. (данные по отчетности Мосэнерго), где: **1** — **ОВП** — количество отказов по вине персонала, приходящееся на выработку одного млрд. кВт·ч тепловой и электрической энергии; **2** — **Эт + Ээ** — суммарная выработка тепловой и электрической энергии на электростанциях Мосэнерго, млрд. кВт·ч; **1984 ÷ 1989 гг.** — период внедрения системы тренажерной подготовки на электростанциях и в сетях Мосэнерго.

Рисунок 21. Показатели эффективности внедрения тренажерной подготовки персонала на Харанорской ГРЭС в 2002 году (Данные Департамента генеральной инспекции РАО «ЕЭС России» за 2000÷2003 гг.).

ния в Государственную программу стандартизации и анализа состояния ТСО было решено провести экспертное техническое обследование современного состояния ТСО на объектах генерации отрасли.

Для реализации указанного Экспертной группой Совета ЭБТН НП «СПЭ» был разработан опросный лист по тренажерной технике, который и был разослан по объектам генерации организаций, входящих в НП «СПЭ».

Опросный лист включал следующие показатели:

- наименование ТЭЦ / ГРЭС (установленная мощность, КИУМ);
- тип оборудования (котлы, турбины, генераторы, главная электрическая схема, химцех);
- наличие тренажера (по типу оборудования);
- год установки тренажера;
- фирма-изготовитель;
- функциональные свойства и характеристики тренажера (адекватность интерфейса, наличие физико-динамической модели, полнота моделирования, всережимность, точность модели, проведение верификации, соответствие АСУТП, наличие сети, передача через Интернет, наличие вводных, наличие УМО, автоматизированные сценарии, диспетчерский график, определение технико-экономических показателей (ТЭП), графопостроение, масштабирование времени, использование в учебном процессе и т. д., всего 60 показателей).

Некоторые количественные результаты опроса приведены на рисунках 22 – 23 и в таблице 2.

Обследовано 73 объекта генерации (ТЭЦ, ГРЭС), принадлежащих следующим организациям, входящим в НП «СПЭ»: Газпром-энергохолдинг, Интер РАО ЕЭС, Э.ОН Россия, Фортум, КЭС Холдинг, Квадра, Татэнерго, ДГК, Башки-

Рисунок 22. Количество внедренных тренажеров генерации по годам.

Рисунок 23. Количество внедренных тренажеров генерации нарастающим итогом по годам.

рэнерго, ОГК-1, ОГК-2, ОГК-3, Энел ОГК-5, ОГК-6 и др.

Из анализа рисунка 22 следует, что в предкризисное пятилетие в генерации РФ вводилось в среднем по 12 тренажеров в год, после кризиса 2008 года темп вводов тренажеров сократился в среднем до 5 тренажеров в год.

Охвачено тренажерной подготовкой 73 объекта генерации, что составляет менее 10% от общего числа электростанций (суммарное количество тренажеров — 123 шт., см. рисунок 23).

На российском рынке (см. таблицу 2) работают 17 фирм-производителей тренажеров для электрогенерации (отечественных и зарубежных). Из них:

- 6 фирм, профессионально занимающихся разработкой и поставкой тренажеров;
- 3 фирмы — разработчики и поставщики АСУТП;
- 3 фирмы — кафедральные лаборатории учебных институтов;
- 2 фирмы — лаборатории НИИ;
- 3 фирмы — монтажно-наладочные предприятия.

Из анализа таблицы 2 следует, что по количественным показателям лидирующее положение в области реализации тренажеров для генерации электроэнергетики РФ занимает фирма «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ»): так, например, тренажеры традиционных энергоблоков, разработанные и внедренные на объектах генерации указанной фирмой, составили 58% от общего числа тренажеров данного типа, тренажеры станций с поперечными связями — 63%, локальные тренажеры котлов, турбин — 50%, тренажеры для персонала электроцеха — 67%, тренажеры для ПГУ — 23%, и т. д. (см. рисунки 24÷27). При этом следует учесть, что фирма АО «ТЭСТ» первая в РФ с 1978 года начала

Таблица 2. Реализация тренажеров в генерации электроэнергетики РФ.

№ п/п	Фирма-производитель тренажеров	Тренажеры традиционных энергоблоков	Локальные тренажеры котлов, турбин, и т.д.	Тренажеры ПГУ	Тренажеры станций с поперечными связями	Тренажеры для персонала электроцехов	Тренажеры для персонала цехов ТАИ	Тренажеры для персонала химических цехов
1	АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ»)	58%	50%	23%	63%	67%		29%
2	ЗАО «Тренажеры для электростанций» (ЗАО «ТДЭ»)	18%	25%	22%	33%	4%		
3	ЗАО «Интеравтоматика»	3%		22%				
4	ЗАО «ПИК Прогресс»	6%		22%				
5	ЗАО «НПП ИТТС»	6%		11%	4%			
6	ООО «Монтажспецстрой»	3%						
7	ИГЭУ	6%				2%		
8	ООО «Сигма-Т»	3%						
9	ОРГРЭС		8%					
10	ЗАО «ЦНИИКА»		9%					
11	ООО «Эмерсон»		8%					
12	ООО «ЭНИМЦ»					7%		
13	ЗАО «Энергетические технологии»					9%		
14	ЗАО «Модус»					11%		
15	МЭИ, каф. АСУТП						90%	
16	НЦ «ЦОТ Электро»						10%	
17	ООО «Триеру»							71%

разработку и внедрение тренажеров для оперативного персонала и ее полномасштабный тренажер теплофикационного энергоблока мощностью 250 МВт, введенный в действие в 1984 году, успешно работает на ТЭЦ-25 Мосэнерго до настоящего времени.

Рисунок 24. Тренажеры традиционных энергоблоков.

Рисунок 25. Тренажеры станций с поперечными связями.

Рисунок 26. Локальные тренажеры котлов, турбин и т. д.

Рисунок 27. Тренажеры ПГУ.

4. Нормативно-правовое обеспечение средств тренажерной подготовки персонала предприятий электроэнергетики

4.1. Первые нормативные документы СССР, 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» [39] (далее — «Указания»), утвержденные заместителем министра Минэнерго СССР Дьяковым А. Ф. 17.06.1986 г.

Дьяков А. Ф. — заместитель министра Минэнерго СССР.

«Указания» были разработаны экспертной рабочей группой Минэнерго СССР во главе с Долгоносовым Н. С., в состав которой входили представители Главтехуправления, ПО «Союзтехэнерго», ПО «Атомэнергоналадка», ВТИ, ВНИИЭ, ЦКБ «Союзэнергоавтоматики», «Атомтеплоэнергопроекта», Энергосетьпроекта, ГИВЦ Минэнерго УССР, УТЦ Трипольской ГРЭС, Мосэнерго (ОЗАП, Мосэнергоналадка), в том числе и один из авторов настоящей книги.

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. [40–43].

Долгоносов Н. С. — бригадный инженер Южного отделения ОРГРЭС.

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» [44], 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 он должен соответствовать? Ответы на указанные вопросы можно получить из рассмотрения таблицы 3.

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 определяли на будущее *основные принципиальные положения нового в то время*

Таблица 3. 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»	<i>Техническое средство</i> подготовки персонала, реализующее <i>логико-динамическую</i> и (или) <i>функциональную модель</i> оборудования (блок, котел, турбина, генератор, участок и т. п.) и осуществляющее <i>контроль качества тренировки</i> . Предназначен для формирования <i>навыков и умений</i> 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.

Таблица 3. Обязательные минимальные требования и критерии к тренажерам эксплуатационного персонала энергопредприятий согласно нормативам (продолжение).

№ п/п	Подсистема	Требования и критерии
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 неисправностей удобным способом. 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 способным 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.

Таблица №3. Обязательные минимальные требования и критерии к тренажерам эксплуатационного персонала энергопредприятий согласно нормативам (продолжение).

№ п/п	Подсистема	Требования и критерии
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.
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	<p><i>Критерии приемки касаются только тех параметров, которые отображаются на БЩУ.</i></p> <p>В качестве критериев приемки должны применяться следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 $\pm 2\%$ в течение 60 мин. • Рассчитанные тренажером значения основных технологических параметров должны соответствовать параметрам энергоблока-прототипа с точностью $\pm 2\%$. • Основные параметры: мощность энергоблока, давление свежего пара, температура свежего и вторично перегретого пара, уровень в барабане (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 $\pm 10\%$. • Должны анализироваться <i>основные</i> 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 <i>остановы</i>, действия оператора, действия автоматики или достижение <i>основными</i> параметрами определенных значений.

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* (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 в 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».

4.2. Технические условия для сертификации прикладных программных средств тренажеров тепловых электростанций и сетей.

Качество продукции и услуг является одним из важнейших понятий на-

учно-технического прогресса и, как известно, понятие это — комплексное.

По В. Далю (1903 г.) качество определяется как «свойство или принадлежность, все что составляет сущность лица или вещи, поясняет доброту, цвет и другие свойства предмета».

Словарь Oxford Pocket Dictionary (1956 г.) определяет качество как «степень совершенства, сравнительную характеристику (низкого качества, торгового качества, деление товара на сорта) или абсолютную характеристику (качественный, хороший), признак, основные данные, параметры и т. д.».

В применении к управлению качеством термин «качество» в начале 70-х годов по определению ЕОК (Европейская организация по качеству) поясняется как «степень соответствия продукции требованиям потребителя».

Современная версия термина «качество» приводится в международном стандарте ИСО 8402 «Управление качеством и обеспечение качества»: «Качество — совокупность характеристик объекта, относящиеся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности».

Понимая под объектом энергетический тренажер, такими характеристиками можно признать:

- установленные потребности пользователя — нормативная адекватность воспроизводимых параметров прототипа объекта управления и штатного оперативного человеко-машинного интерфейса;
- предполагаемые потребности пользователя — наличие постоянно расширяющегося учебно-методического обеспечения процесса подготовки человека-оператора.

5 июня 2003 года Министерством Российской Федерации по связи и информатизации были введены Технические условия для сертификации прикладных программных средств тренажеров для тепловых электростанций и сетей СТУ 115.015-2003 [45]. Этот документ, разработанный Всероссийским научно-исследовательским институтом проблем вычислительной техники и информатизации (ВНИИПВТИ) совместно с ЗАО «Тренажеры электрических станций и сетей (ТЭСТ)» и согласованный с РАО «ЕЭС России», устанавливает состав и допустимые границы значений характеристик прикладных программных средств тренажеров с динамическими компьютерными моделями в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК.

Основными разделами документа являются список терминов и определений, требования к характеристикам идентификации (документация, регистрация программного продукта, сведения о фирме-разработчике и о версии продукта и т. п.), требования к характеристикам функционального назначения, требования к функциям обработки данных, требования к характеристикам информационной совместимости, требования к характеристикам целостности и сохранности программ и данных (информационной

безопасности), требования к характеристикам интерфейса пользователя, требования к системным характеристикам, требования к методам оценки характеристик. Приложения содержат требования к эксплуатационной документации, разработанной на основе ГОСТ Р ИСО 9127-94, и образцы оформления этих документов.

Требования к характеристикам идентификации программных средств.

Согласно СТУ, к характеристикам идентификации относятся эксплуатационные документы, реквизиты фирмы-разработчика, сведения о версии продукта, сведения о регистрации продукта, описание контрольных вариантов для проверки корректности функционирования программных средств тренажера, состав нормативно-правовых документов для представленной конфигурации программного продукта.

В комплект эксплуатационной документации должны *обязательно* входить формуляр прикладного программного средства, руководство пользователя и руководство оператора (администратора или/и программиста, в зависимости от особенностей программного средства). Все документы должны быть оформлены на русском языке в соответствии с требованиями новых СТУ. Все документы должны иметь учетный номер фирмы разработчика с указанием даты постановки на учет.

В соответствии с ГОСТ 9127-94, наименование и обозначение программного продукта должны быть указаны на упаковке и носителях. Они должны соответствовать наименованию и обозначению, указанным в эксплуатационных документах.

Обязательным требованием является указание сведений о версии программного продукта, даты приема данной версии в эксплуатацию и перечня файлов, входящих в состав программных средств тренажера. Продукт *должен* иметь государственную регистрацию, причем копия свидетельства о регистрации должна поставляться в комплекте эксплуатационной документации.

Также обязательным является требование наличия контрольных вариантов работы тренажера, содержащих перечень входных параметров и соответствующих им результатов для основных режимов функционирования тренажера. По этим данным пользователь может судить о корректности функционирования программного обеспечения.

В целом, требования к характеристикам идентификации обеспечивают защиту конечного пользователя программного продукта от подделок и недобросовестных разработчиков.

Требования к функциональным характеристикам.

Требования этой категории определяют состав тренажера, средства его

разработки и состав моделируемого оборудования, параметров, защит, блокировок, технологической сигнализации, внутренних и внешних возмущений. Кроме того, определяются задачи, выполняемые тренажером.

Согласно Техническим условиям, в состав тренажера должны входить модель энергообъекта, рабочие места операторов, рабочее место инструктора, системы поддержки оператора и инструктора, наборы сценариев тренировки и аварийных ситуаций. В соответствии с принятой терминологией, модель должна быть всережимной, а рабочие места операторов должны точно соответствовать реальным рабочим местам на предприятии.

Состав моделируемых объектов приводится в виде перечней по приведенным в СТУ формам. Эти формы позволяют сопоставить модель энергообъекта его прототипу и определить качество математической модели тренажера.

Модель тренажера должна обеспечивать имитацию внутренних и внешних возмущений, а именно нарушений геометрии, отказов технологического оборудования, арматуры, систем автоматики, изменений характеристик топлива, окружающего воздуха и охлаждающей воды.

Обязательным требованием является обеспечение тренажером выполнения подготовительных и пусковых операций из различных тепловых состояний, работы в регулировочном режиме энергообъекта, плановых и аварийных остановов, работы в аварийных режимах.

СТУ требуют от программной оболочки тренажера с динамическими мнемосхемами обеспечения многооконного режима работы с выводом оперативных схем основного и вспомогательного оборудования, возможность вывода графиков изменения параметров и состояния оборудования в зависимости от времени и возможность просмотра аварийных и предупредительных сообщений на специальном информационном табло.

Ведение протоколов аварийных сообщений, действий оператора и его ошибок, а также наличие контролирующей программы, фиксирующей ошибки оператора, является обязательным.

Обобщая, можно сказать, что требования к функциональным характеристикам обеспечивают качество выполнения модели и программной оболочки тренажера.

Требования к функциям обработки данных.

Корректность обработки данных — важнейшее условие работы любого программного обеспечения. Для таких сложных комплексов, какими являются энергетические тренажеры, это требование еще более актуально, поскольку при работе математической модели ошибки имеют тенденцию

накапливаться, приводя через некоторое время к нестабильности работы как самого программного продукта, так и компьютера, на котором установлена модель тренажера.

Технические условия определяют для тренажерного комплекса пять требований, обеспечивающих корректность обработки данных: корректное манипулирование данными, правильное формирование выходных форм (протоколов и т. п.), корректная обработка текста, корректная обработка календарной даты и времени (особенно актуально ввиду требования работы тренажера в разных временных масштабах) и безошибочный экспорт и импорт данных.

При манипулировании данными особо оговаривается требование наличия контроля правильности ввода и изменения данных, поскольку неправильный формат данных (например, использование запятой вместо десятичной точки или неправильного разделителя в записи даты и времени) может привести к ошибкам. Разработчик обязан предусмотреть проверку правильности вводимых данных и при их несоответствии сообщить об ошибке пользователю, предоставив ему возможность исправить эту ошибку или отказаться от ввода данных. При этом должны быть доступны стандартные механизмы ввода и редактирования данных, предусмотренные операционной системой (например, использование буфера обмена Windows).

Повышенного внимания требует формирование протоколов и сохранение их формата при сохранении на накопителе или при распечатке. Все данные должны занимать отведенные им поля на форме протокола, обеспечивать наглядность и безошибочность выводимой информации.

Информационная совместимость и безопасность.

Очень важным требованием к любому программному продукту является его устойчивость, совместимость (внутренняя и внешняя), безопасность для другого программного обеспечения и для компьютерного оборудования. Устойчивость программного обеспечения тренажера обеспечивается прежде всего внутренней совместимостью его компонентов между собой, а также внешней совместимостью с операционной системой и другим программным и аппаратным обеспечением. Технические условия обязывают разработчика обеспечить однотипность вычислительных средств, операционной среды и форматов данных для всего тренажерного комплекса.

Для обеспечения целостности данных и их сохранности программные средства тренажера должны обладать методами контроля доступа к данным. В противном случае (например, при одновременном редактировании одного и того же набора данных двумя пользователями или программны-

ми процессами) может возникнуть ошибка, последствиями которой может стать выход из строя всего комплекса.

Учитывая сказанное выше, СТУ требуют обязательной уникальной регистрации каждого пользователя в системе, наличия, по крайней мере, трех категорий пользователей (администратор, инструктор и оператор) с разными степенями доступа к данным и обеспечение надежного контроля запросов данных.

Кроме того, разработчик должен предусмотреть механизмы контроля сбоев и восстановления данных при их обнаружении посредством использования резервных копий данных.

При выполнении этих требований со стороны разработчика пользователь может быть спокоен за сохранность своей информации и электронного оборудования, с которым взаимодействует тренажер.

Требования к пользовательскому интерфейсу.

Даже при наличии качественной математической модели и корректной программной оболочки отсутствие грамотно организованного пользовательского интерфейса может сделать тренажер не только непригодным к использованию, но и вредным, поскольку любое несоответствие интерфейса реальному рабочему месту оператора влечет неадекватность реакции оператора при возникновении нештатных и аварийных ситуаций на реальном объекте.

Менее серьезными, но тоже печальными последствиями могут стать необходимость предварительного обучения оператора энергообъекта сложным навыкам работы с компьютером или переутомление пользователя из-за неправильной организации взаимодействия с программным комплексом тренажера.

Эти причины приводят к предъявлению определенных требований к организации интерфейса тренажера. Во-первых, язык интерфейса должен быть русским. Во-вторых, интерфейс должен быть интуитивно понятным и привычным (элементы мнемосхем, в частности, должны иметь стандартные обозначения). Наконец, в-третьих, программное обеспечение тренажера должно иметь контекстно-зависимую справочную систему с информацией обо всех элементах интерфейса и методах их использования.

Выполнение этих требований является обязательным и гарантирует удобство и пользу обучения специалистов.

Системные характеристики.

К системным характеристикам относятся максимально возможное количество одновременно работающих пользователей, максимальное количество рабочих мест и максимальное количество моделируемых объектов.

Технические условия требуют, чтобы на тренажере могли работать одновременно хотя бы два пользователя: обучаемый оператор и инструктор. Это, в свою очередь, влечет необходимость организации стабильной работы в сети по крайней мере двух компьютеров, на одном из которых устанавливается программа пульта оператора, а на другом — программа пульта инструктора. Взаимодействие этих двух программ должно удовлетворять требованиям безопасности данных, рассмотренным выше.

Количество рабочих мест и моделируемых объектов не должно быть ограниченным. Таким образом, на программном уровне тренажер должен иметь возможность практически неограниченно расширяться. При этом следует учесть, что не все сервера баз данных способны обеспечить выполнение этих условий, а использование файлового обмена данными оказывается вообще недопустимым.

Методы оценки характеристик тренажера.

СТУ предлагают три метода оценки характеристик программного обеспечения тренажера: визуальный, экспертный и тестовый.

Визуальный метод предполагает оценку исследуемой характеристики путем визуальной фиксации ее наличия в установленной СТУ форме.

Экспертный метод позволяет оценить функционирование программного обеспечения в процессе его эксплуатации, опираясь на эксплуатационные документы и контрольные варианты работы программ.

Тестовый метод основан на использовании аттестованных в установленном порядке тестов, позволяющих в автоматическом режиме оценить значения характеристик программных средств тренажера.

Полученные оценки характеристик программ фиксируются в протоколе испытаний с указанием метода получения этой оценки.

При оценке функций обработки данных и формирования протоколов каждая функция проверяется многократно, причем число повторений должно обеспечить достоверность оценки. Функции администрирования и обмена данными проверяются во всем объеме.

Использование каждого из методов оценки строго регламентируется Техническими условиями. Таким образом, выполнение СТУ при проведении испытаний программного обеспечения тренажера обеспечивает объективность оценок его характеристик, а значит — гарантию его качества при соответствии Техническим условиям.

Характеристики идентификации оцениваются **визуальным** методом — путем проверки наличия и содержания по каждому пункту требований.

Характеристики функционального назначения оцениваются **экс-**

пертным методом по каждому набору программных данных задаются определенные наборы входных данных, а результаты оцениваются по содержанию экрана и выходных форм на бумажном носителе.

Оценка **функции обработки данных** так же проводится **экспертным** методом — по каждому пункту требований задается несколько различных наборов данных, а результаты оцениваются по содержанию экрана.

Адекватность модели энергоустановки. Для ее оценки используется программа автоматического тестирования модели тренажера. Входными данными этой программы являются эталонные значения характеристик энергоустановки-прототипа, пределы допустимых отклонений и значения этих характеристик, рассчитанные моделью. На выходе программы создается протокол тестирования, в котором фиксируется факт выхода рассчитанных значений за допустимые пределы и рассчитывается комплексный показатель адекватности модели. В программе проводится анализ для статических и динамических значений.

Характеристики информационной совместимости оцениваются **экспертным** методом как путем проверки наличия в эксплуатационной документации описания форматов файлов обмена, описание допустимых характеристик вычислительных средств, так и путем проверки наличия словарей при вводе данных.

Характеристики целостности и сохранности программ и данных оцениваются также экспертным методом, путем непосредственной проверки возможности архивирования данных по команде администратора и/или автоматически через заданные промежутки времени.

Оценка **характеристик интерфейса пользователя** проводится **экспертным** методом. Проверяется наличие всех перечисленных в настоящем документе возможностей интерфейса.

Последняя оцениваемая характеристика — это **системные характеристики**. Их оценка также проводится экспертным методом путем проверки возможности одновременной работы не менее чем на 5 рабочих местах и путем определения времени реакции по приложению «Дата и время», работающему одновременно с компонентами ПО тренажера.

Требования современных информационных технологий.

Применение современных информационных технологий направлено на усовершенствование и модернизацию программного обеспечения, то есть на решение следующих вопросов:

- отсутствие специальной компьютерной подготовки обучаемого оператора для работы на тренажере;
- отсутствие использования специального дополнительного оборудо-

вания или программного обеспечения, кроме обычного используемого на предприятии-заказчике, за исключением самого тренажерного комплекса;

- реализация требований к обучающим системам: адекватность используемой модели реальному объекту-прототипу; адекватность рабочего места оператора реальному рабочему месту; высокая функциональность пульта инструктора, автоматизированных и контролирующих программ; применения новейших методов обучения и тренировки и др.

- реализация требований к программному обеспечению: правильная организация работы с ресурсами компьютера и сети; гибкость и доступность настроек для обеспечения эффективного восприятия информации обучаемым оператором; простота в установке и эксплуатации; обеспечение безопасности данных; обеспечение совместимости с различными платформами и аппаратными средствами и т. п.

- правильная организация интерфейса и разумное использование современных технологий и средств отображения информации;

- уменьшение требований тренажерных комплексов к аппаратным средствам при одновременном расширении функциональности;

- снижение себестоимости разработок и тренажерных комплексов при росте качества и функциональности;

Решение перечисленных вопросов проводится с помощью внедрения в процесс разработки и сопровождения тренажерных комплексов новейших достижений информационных технологий. В частности, применяются технологии визуального компонентноориентированного проектирования модели и программной оболочки тренажера, используется принцип модульности и динамически подключаемые программные модули и библиотеки (plug-in), динамическое создание и уничтожение объектов, многопоточная организация приложений, использование WEB-технологий и технологий SQL-серверов для передачи и хранения информации и т. п.

Требования к сертификации, аккредитации и патентной чистоте.

В соответствии с Законами РФ «О техническом регулировании», «О сертификации продукции и услуг», «О науке и государственной научно-технической политике» и «Патентным Законом», определяющими в РФ порядок взаимоотношений между производителем и потребителем научнотехнической продукции, а также регламентами ПАО «ЕЭС России»:

- **программные средства** разрабатываемого тренажера должны быть **сертифицированы** на соответствие требованиям «Норм годности программных средств подготовки персонала энергетики» (ПАО «ЕЭС России», СО 153-34.0-12.305-99) и Технических условий «Прикладные программные средства полномасштабных тренажеров» (СТУ 115.015-2003);

- **технические средства** разрабатываемого тренажера должны быть **сертифицированы** на соответствие требованиям стандартов ГОСТ МЭК 60950-2002, ГОСТ Р 51317.4.3-99 для гарантии безопасности продукта для оперативного персонала;
- **процессы разработки и сопровождения** тренажера должны быть **сертифицированы** на соответствие стандарту «Система менеджмента качества. Требования» (ГОСТ Р ИСО/МЭК 9001-2002);
- **предприятие-изготовитель** научно-технической продукции в тренажеростроении должно быть **аккредитовано** в официальной государственной организации, которая признала бы его компетентность выполнять работы в указанной области;
- **все программные средства**, разрабатываемого тренажера должны иметь свидетельства Роспатента;
- **предприятие-изготовитель** тренажеров и программных средств, не являющееся **патентообладателем**, вправе использовать программные средства, патентообладателя, защищенные свидетельствами Роспатента, на основе лицензионного договора, зарегистрированного в Патентном ведомстве.

4.3. Цели и задачи разработки новой нормативной базы. Назначение и область применения.

Для обеспечения производственной безопасности предприятий электроэнергетики необходимо решить задачи по разработке подзаконных актов — отраслевых стандартов, сводов правил, в том числе и по методическому и правовому обеспечению системы подготовки и аттестации персонала, внедрению современных информационных технологий.

Необходимо разработать методологию и методические требования к системе подготовки персонала, внедрить в производство современные все-режимные полномасштабные тренажеры и обучающие программы.

Внедрение конкурентных отношений в электроэнергетике обуславливает необходимость принятия альтернативных решений при использовании технических средств обучения, для чего разрабатываются методические указания по проведению конкурсной экспертизы проектов отечественных и зарубежных фирм-изготовителей.

С целью повышения научного и технического уровня современной тренажерной техники необходимо разработать типовые технические задания на тренажеры и обучающие программы, требования к организациям-разработчикам в соответствии с международным стандартом менеджмента качества ISO 9001-2008, а также организационно-методические документы по аккредитации и функционированию испы-

Таблица 4. Свод необходимых документов по тренажерной подготовке персонала предприятий электроэнергетики.

№	Название документа
1	Общие методологические и методические требования к системе подготовки персонала предприятий электроэнергетики с учетом современных требований информационных технологий.
2	Методические указания по разработке физико-технологического и математического обеспечения технических средств обучения (ТСО): всережимных полномасштабных тренажеров (ВПТ) и автоматизированных учебных курсов (АУК).
3	Методические указания по разработке программного обеспечения всережимных полномасштабных тренажеров (ВПТ) и автоматизированных учебных курсов (АУК).
4	Технические требования к программному обеспечению (ПО) всережимных полномасштабных тренажеров (ВПТ) и автоматизированных учебных курсов (АУК).
5	Технические требования к программно-инструментальным комплексам для проектирования и создания тренажеров и АУК.
6	Типовое техническое задание на разработку и внедрение всережимного полномасштабного тренажера (ВПТ).
7	Типовое техническое задание на разработку автоматизированного учебного курса (АУК).
8	Дидактические требования к программам подготовки персонала с использованием тренажеров и АУК.
9	Требования к порядку приемки, внедрения, сопровождения, модернизации и инспекционного контроля тренажеров и автоматизированных учебных курсов (АУК).
10	Методические указания по проведению экспертизы при конкурсном рассмотрении заявок на разработку и внедрение тренажерных комплексов (ТК) отечественных и зарубежных фирм-изготовителей.
11	Разработка требований к организациям-разработчикам тренажерной техники в соответствии с международным стандартом менеджмента качества ISO 9001-2008.
12	Организационно-методические документы для функционирования испытательного центра (ИЦ) разработанных тренажеров и АУК.
13	Методические указания по подготовке к аккредитации испытательного центра тренажеров и АУК.
14	Методические указания по расчету экономической эффективности тренажерной подготовки персонала энергетических предприятий.
15	Требования к составлению тезауруса (свода терминов и определений) в области тренажерной подготовки персонала.
16	Термины и определения в области тренажерной подготовки персонала.

тательного центра разработанных тренажеров и обучающих программ.

Назначение разрабатываемых документов (таблица 4) — методическое и правовое обеспечение системы подготовки и аттестации персонала энергетических предприятий, совершенствование и внедрение программных средств обучения и тестирования знаний. Область применения — подготовка персонала объектов электроэнергетики с помощью технических средств обучения (ТСО) в учебных центрах и непосредственно на энергопредприятиях.

4.4. О необходимости нормативной оценки эффективности и качества тренажерной техники.

Постановка и решение задач адекватного описания исследуемых систем в любой области знания, как известно, имеют шансы на успех лишь в той мере, в какой удастся найти подходящие средства, то есть математический аппарат для описания задач, достаточно полно учитывающий их специфику и обладающий вместе с тем необходимым уровнем абстракции, обеспечивающей приемлемую общность подхода.

Применительно к разработкам математического и программного описания эргатических (человеко-машинных) систем тренажерной подготовки оперативного персонала энергообъектов проблема поиска подходящего количественного аппарата, способного к адекватному отображению наиболее существенных сторон взаимосвязанного функционирования оператора и машинной части тренажерного комплекса, определяющих его качество, то есть и надежность оперативного персонала электроэнергетики в постреформенный период и износа основных фондов, становится особенно острой.

С целью повышения надежности оперативного персонала в настоящее время, как сказано выше, принято решение о разработке Национального стандарта по техническим средствам обучения (ТСО), призванного упорядочить в электроэнергетике тренажерную подготовку персонала и сформулировать основные требования к техническим и программным средствам обучения.

Правомерность и целесообразность тех или иных подходов к разработке и аппаратной реализации математической модели энергообъекта для тренажера определяется теми возможностями *единой количественной меры*, которые позволили бы оценить разницу в результатах внедрения и использования тренажеров.

Приемлемая достоверность при этом может быть достигнута лишь в тех случаях, когда эта мера настолько абстрактна и универсальна, что не за-

висит от физической сущности характеризующих ее процессов и инвариантна по отношению к конкретным реализациям моделей энергообъектов.

Очевидно, что такой мерой *является эффективность*.

В современной науке (теории операций) *под эффективностью системы* понимается степень ее приспособленности к выполнению соответствующих функций в процессе определенной операции и при определенных условиях.

Эффективность — одна из возможных (важнейшая, но не единственная) характеристик *качества* некоторой *системы* (например, тренажера) с точки зрения соотношения *затрат* на ее разработку и внедрение и *результатов* функционирования этой системы. В зависимости от того, какие затраты и особенно какие результаты принимаются во внимание, можно говорить о *экономической, технической и/или дидактической эффективности системы*.

Каждую систему можно характеризовать с помощью различных показателей, число которых для сложной системы весьма велико. Вместе с тем желательно иметь более общую, и причем единую, интегральную оценку. Именно такой комплексной оценкой и является, по нашему мнению, *техническая* или *дидактическая* эффективность. Она должна быть компактной, то есть емкой, но в то же время охватывать не один, а ряд аспектов применения и функционирования системы.

Если представить цель операций как конечный эффект (для тренажера — это получение оператором навыков и умений), то эффективность должна выражать *меру достижения этого эффекта*.

Такая мера должна измерять степень приспособленности системы к выполнению своих функций и позволять сравнивать одни системы с другими. Оценка типа «хорошо — плохо», «эффективно — неэффективно», соответствующая лишь двум уровням, недостаточна. Оценка «лучше — хуже», «больше — меньше», как показывает практика, обладает значительной степенью субъективности, оставляет большую свободу толкованиям и дискуссиям и не может быть признана достаточной. Очевидно, что мы должны располагать характеристиками *базовой (эталонной) системы*, с которой производится сравнение.

Кроме того, желательно ввести некоторую шкалу с градуировкой (в качестве инструмента для измерения), не требующую сравнения с базовой системой. При этом тот, кто собирается оценивать эффективность, получает и метод и возможность ее измерения.

Трехуровневая оценка «эффективно – малоэффективно – неэффективно» лучше двухбалльной, но также недостаточна. Продолжать дробление шкалы, очевидно, необходимо до достижения необходимого и достаточного уровня. Важно только, чтобы был определен метод формирования таких

оценок. Причем, в большинстве случаев, для современных сложных объектов, очевидно, необходима количественная мера эффективности. При этом понятие «мера эффективности» может включать множество критериев, то есть представлять собой многокомпонентный вектор.

Под термином «критерий» мы понимаем наиболее характерные признаки, на основе которых производится окончательная оценка объекта, и принимаются те или иные решения. Помимо критериев, обычно используется множество различных показателей, представляющих собой частные характеристики как самого объекта, так и его элементов. Каждый критерий или показатель изменяется в определенном интервале, исходя из этого, для него должна быть указана область существования, т. е. максимальные и минимальные значения.

Для объектов новой техники, к каким, несомненно, следует отнести и тренажеры, оценка эффективности, причем количественная, по нашему мнению, является обязательной. Очевидно, что недостаточно эффективные объекты, также как объекты, требующие чрезмерно больших затрат, могут быть признаны неперспективными, а создание их прекращено. Во избежание излишних расходов средств, времени и труда необходимо, чтобы контроль за эффективностью (качеством) осуществлялся на всех стадиях создания новой техники, включая разработку, испытания, наладку и эксплуатацию, то есть в отличие от приведенных выше общепринятых примеров определения эффективности внедрения тренажеров, указанный контроль эффективности, очевидно, должен носить характер промежуточности, т. е. «априорности».

Характеристика «эффективный» (или «высокоэффективный») может относиться к совершенно различным объектам, не имеющим между собой ничего общего. Известно, что прогресс не стоит на месте, и то, что было эффективным вчера, может быть малоэффективно сегодня и совершенно неэффективно завтра. Наши оппоненты справедливо усматривают наличие противоречия между требованиями измеримости эффективности, то есть строгой оценки, и тем, что границы ее четко не очерчены, размыты и изменяются с течением времени.

Для устранения этого противоречия есть только один путь — корректная постановка задачи по всем правилам, принятым в прикладной математике. Этот путь включает также строгую (но обязательно обсуждаемую и согласованную) формулировку используемых критериев и показателей.

Иными словами, должна быть сформирована *модель операции оценки качества объекта (тренажера)* с внешними и внутренними факторами, подлежащими учету, указан объект исследования, сформулированы требования к нему, определено понятие эффективности,

подлежащее оценке, и выбраны критерии и показатели эффективности.

В настоящее время сложилась ситуация, когда руководитель, принимающий решение, не может получить объективную, пусть даже и комиссионную оценку при выборе варианта новой техники: отсутствие необходимых данных, нечетко сформулированные понятия критериев и показателей эффективности приводят к волюнтаристским решениям (в лучшем случае) и как следствие, к большим просчетам и материальным потерям.

4.5. Характеристики качества технических средств обучения.

Существенной частью технического обследования современного состояния ТСО на объектах генерации отрасли является проведение экспертизы с целью выявления *качественных характеристик* тренажерной техники, определяющих ее эффективность при подготовке оперативного и обслуживающего персонала.

В общем случае, потребителям необходима продукция, характеристики которой удовлетворяют их потребности и ожидания. Эти потребности и ожидания отражаются в технических условиях на продукцию и в совокупности считаются требованиями потребителей. Требования могут быть установлены потребителем в контракте или определены самой организацией. В обоих случаях приемлемость продукции, в конечном счете, устанавливает потребитель. Поскольку потребности и ожидания потребителей постоянно меняются, и организации испытывают давление, обусловленное конкуренцией и техническим прогрессом, они должны постоянно совершенствовать свою продукцию и свои процессы.

Современное определение термина «качество» приводится в международном стандарте ИСО 8402 «Управление качеством и обеспечение качества»: «*Качество* — это совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности».

Понимая под объектом энергетический тренажер, такими характеристиками можно признать:

- *установленные потребности пользователя* — нормативная адекватность воспроизводимых параметров прототипа объекта управления и штатного оперативного человеко-машинного интерфейса;
- *предполагаемые потребности пользователя* — наличие необходимого и постоянно расширяющегося учебно-методического обеспечения процесса подготовки человека-оператора.

Оценка качества продукции в соответствии с международным стандартом ISO 9000:2005(R) [11] производится путем *градации* (категория или класс), присвоенной различным *требованиям* к качеству продукции, про-

цессов или систем, имеющим одинаковое функциональное применение.

Причем *требование*, согласно тому же стандарту, это «потребность или ожидание, которое *установлено*, обычно предполагается или *является обязательным*».

Здесь же необходимо отметить, что в области энергетики в соответствии с Директивой Международной электротехнической комиссии (IEC), применяется другое определение: «*требование* — это выражение в содержании документа, передающее *критерии*, которые необходимо выполнить в случае заявления о соответствии данному документу и отклонение от которых недопустимо» (Директива ISO/IEC Часть 2:2004 п.3.12.1).

Для выражения превосходной степени в сравнительном или в количественном смысле при проведении технических оценок термин «качество» не используется изолированно. Чтобы выразить эти значения, необходимо применять качественное прилагательное или уточняющее дополнение. Например, могут использоваться следующие термины:

- а) «относительное качество», когда объекты классифицируются в зависимости от степени их превосходства или в сравнительном смысле;
- б) «уровень качества» в количественном смысле (применяется при статистическом приемочном контроле) и «мера качества», когда проводятся точные технические оценки.

Таким образом, в нашем случае, оценка качества тренажера в соответствии с международным стандартом ISO 9000:2005 (R) может быть определена по «индексу уровня качества» — P_k :

$$P_k = \sum_{1}^n (P_n^a)^{1/(1-a)} \quad (4.1)$$

где P_n — единичные показатели (критерии) индекса уровня качества тренажера, измеряемые в баллах (от 0 до 10) по требованиям к составляющим его структуре; a — параметр распределения веса единичных показателей (критериев) индекса уровня качества тренажера.

Требования к модели энергообъекта.

– *всережимность*:

P_1 — адекватность целей;

P_2 — адекватность состояний;

P_3 — адекватность условий;

– *полномасштабность*:

P_4 — топологическая полнота;

P_5 — реальный масштаб времени;

P_6 — ускоренный масштаб времени;

P₇ — замедленный масштаб времени;

– сопряженность:

P₈ — сопряжение входов и выходов;

– *параметрическая точность*:

P₉ — верификация модели;

P₁₀ — валидация модели.

P₁₁ — статическая адекватность;

P₁₂ — динамическая адекватность;

Требования к рабочему месту оператора:

P₁₃ — адекватность интерфейса;

P₁₄ — информационная полнота;

P₁₅ — адекватность АСУТП;

P₁₆ — внутренняя и внешняя память;

P₁₇ — графопостроение;

P₁₈ — объем дисплейной информации;

P₁₉ — сохранение и загрузка режимов;

P₂₀ — диспетчерский график;

P₂₁ — определение ТЭП;

P₂₂ — автоматизированные сценарии тренировок (АСТ);

P₂₃ — система поддержки оператора (СПО).

Требования к рабочему месту инструктора:

P₂₄ — формирование рабочих заданий;

P₂₅ — задание внутренних возмущений;

P₂₆ — задание внешних возмущений;

P₂₇ — задание возмущений с потерей геометрии;

P₂₈ — останов процесса;

P₂₉ — возврат к исходному состоянию;

P₃₀ — система поддержки инструктора;

P₃₁ — статистика по обучаемым.

Автоматическая контролирующая программа:

P₃₂ — контроль и протоколирование действий оператора;

P₃₃ — контроль и протоколирование количества и типа ошибок;

P₃₄ — контроль и протоколирование аварийной и предупредительной сигнализации;

P₃₅ — контроль и протоколирование действия защит и блокировок;

P₃₆ — фиксация отклонений и графиков основных параметров.

Требования к программному обеспечению:

– *идентификация программного обеспечения*:

P₃₇ — комплект эксплуатационной документации;

P₃₈ — наименование и обозначение программного продукта;

- P_{39} — версия программного продукта;
- P_{40} — свидетельство о государственной регистрации;
- P_{41} — лицензионная чистота;
- P_{42} — контрольные формуляры.
- *информационная совместимость и безопасность:*
- P_{43} — устойчивость к некорректным входным данным;
- P_{44} — устойчивость к некорректным управляющим воздействиям пользователя;
- P_{45} — поддержка открытых форматов для импорта и экспорта данных и создания отчетов;
- P_{46} — корректная обработка календарной даты и времени;
- P_{47} — совместимость внешняя;
- P_{48} — безопасность для компьютерного оборудования.
- *общие требования к программному обеспечению:*
- P_{49} — обновляемость программного обеспечения;
- P_{50} — наладка и коррекция программного обеспечения через интернет;
- P_{51} — оптимизация программного обеспечения.
- Общие требования к тренажеру:**
- P_{52} — комплексность;
- P_{53} — работа в сети;
- P_{54} — конфигурация тренажера;
- P_{55} — условия пуска-останов и ввода-вывода информации.
- Разрешительная документация:**
- P_{56} — сертификация соответствия;
- P_{57} — сертификация безопасности;
- P_{58} — сертификация качества;
- P_{59} — аккредитация;
- P_{60} — лицензирование.

4.6. Краткое описание критериев индекса уровня качества тренажера.

Требования к модели энергообъекта.

Адекватность математической модели современного тренажера определяется четырьмя ее необходимыми свойствами, а именно: *всережимностью, полномасштабностью, сопряженностью и параметрической точностью.*

Всережимность математической модели означает *адекватность целей P_1 , адекватность состояний P_2 и адекватность условий P_3 .* Первая из них предполагает возможность постановки одинаковых целей эксплуатации как на энергообъекте, так и на тренажере. При этом должна обеспечи-

ваться одинаковая возможность достижения целей, то есть, прежде всего, возможность работы тренажера в соответствии с требованиями эксплуатационных инструкций, предназначенных для организации экономической и безаварийной работы энергообъекта.

Адекватность состояний P_2 требует воспроизведения как нормальных (штатных) режимов работы — пусковых (из всех тепловых состояний), регулировочных и остановочных, так и других (например, аварийных) состояний энергообъекта. При этом должна обеспечиваться не только имитация в тренажере тех же конфигураций отказов, что и на реальном энергообъекте, но и адекватное изменение характеристик оборудования и процессов (расходных, механических, термодинамических, электрических и др.), происходящих при аварии на энергообъекте.

Аналогично этому *адекватность условий P_3* требует воспроизведения не только тех же внутренних, но и внешних возмущений со стороны среды по отношению к энергообъекту (например, температуры окружающего воздуха, количественных и качественных характеристик топлива, температуры охлаждающей воды и т. д.) и адекватной реакции на них оборудования и процессов.

Полномасштабность модели определяет необходимость учета практически всех взаимосвязей между всеми моделируемыми подсистемами и элементами энергообъекта (*топологическая полнота P_4*).

К *полномасштабности модели* относится также требование работы модели в ускоренном P_5 , реальном P_6 и замедленном P_7 масштабах времени.

Сопряженность модели P_8 касается ее связей со щитом управления или интерфейсом многопроцессорной АСУ ТП. Каждому органу управления сопоставляется отдельный вход модели, каждой точке контроля, сигнализации и защиты — ее выход.

Параметрическая точность требует соответствия показаний приборов энергообъекта и тренажера (расходов, температур, давлений, силы тока, напряжения, мощности и т. д.) в режимах статики (*статическая адекватность — P_{11}*) и динамических режимах (*динамическая адекватность — P_{12}*), производимых во время верификации модели — P_9 , т. е. структурной корректировки и *валидации модели — P_{10}* , т. е. параметрической корректировки.

Требования к рабочему месту оператора:

Адекватность интерфейса P_{13} . Адекватность интерфейса тренажера требует, чтобы параметры рабочего места оператора (размеры, цвет, освещенность, наличие мнемосхем, приборов, ключей, индивидуального управления, их взаимное расположение, наличие сигнализации, защит, блокировок, систем автоматики с задатчиками, шаговых программ, систем

дистанционного управления и т. п.) были строго одинаковы на тренажере и на энергообъекте.

Информационная полнота P_{14} . Информационная полнота оценивает соответствие имитируемых информационных потоков, воспроизводимых в тренажере, их прототипу. Информационная полнота предполагает не только достаточно точную имитацию каждой отдельной составляющей, но и определенное высокое качество воспроизведения, точный учет динамики ее изменения, а также синхронизацию информации, поступающей из разных источников, друг с другом, и с динамическими компонентами работы энергообъекта.

Адекватность систем управления, защит, блокировок, сигнализации P_{15} . Предусматривается или полномасштабное моделирование АСУТП энергообъекта-прототипа (модель автоматических регуляторов, защит, блокировок, сигнализации, пошаговых программ, АВР) или/и эмуляция на выделенном сервере распределенной контроллерной системы управления.

Внутренняя и внешняя память P_{16} . Производится сохранение всех действий оператора, режимов энергообъекта, регулирующей и запорной арматуры, механизмов и параметров, возврат ситуаций.

Графопостроение P_{17} . Предусматривается графическое отображение всех параметров энергообъекта, положения запорной и регулирующей арматуры, механизмов.

Объем дисплейной информации P_{18} . На один монитор должно выводиться до 150 мнемосхем, расположенных в виде «окон» с увеличением и уменьшением масштаба.

Сохранение и загрузка режимов P_{19} — функция, позволяющая сохранить режимы работы тренажера, обращаться к ним в любое удобное время, перезаписывать их.

Диспетчерский график P_{20} — предусматривается возможность проведения тренировок при работе оператора по диспетчерскому графику: например — разгрузить или нагрузить энергоблок до заданного значения за определенный промежуток времени с фиксацией отклонений от графика с начислением штрафных баллов и оценкой. Предусматривается возможность самостоятельного построения и редактирования указанного графика инструктором по обучению.

Определение технико-экономических показателей (ТЭП) P_{21} — предусматривается определение и отображение на дисплее основных ТЭП энергообъекта.

Автоматизированные сценарии тренировок (АСТ) P_{22} — тренажер должен быть снабжен стандартным набором заданий на тренировку. Это позволит проводить обучение управлению энергообъектом в штатных ре-

жимах. Задания должны быть составлены на основе эксплуатационных инструкций, действующих на электростанции и представлять собой, как правило, одну из стандартных технологических операций. В тренажере необходимо иметь возможность выводить на экран текст описания задания и условия его выполнения. Так же необходимо предусмотреть возможность редактирования указанных заданий инструктором.

Система поддержки оператора (СПО) P_{23} — предусматривается интерактивная справочная система, система подсказок, система диагностических сообщений, специальные справочники и эксплуатационная документация.

Требования к рабочему месту инструктора.

Пульт инструктора должен обладать возможностями *формирования рабочих заданий на тренировку P_{24} , формирования внутренних возмущений P_{25} — аварий и отказов в работе технологического оборудования, арматуры, систем автоматики и др., формирования внешних возмущений P_{26} — изменение качественных и количественных характеристик топлива, температуры окружающего воздуха, охлаждающей воды и т. д., задание возмущений с потерей геометрии P_{27} — аварийных ситуаций с разрывами труб, взрывами, пожарами и др., останова процесса P_{28} , возврата к исходному состоянию P_{29} , наличие системы поддержки инструктора P_{30} — справочная и инструктивная документация, ведение статистики по обучаемым P_{31} .*

Автоматическая контролирующая программа.

Должна работать в течение всего процесса тренировки и производить: *контроль и протоколирование действий оператора P_{32} , контроль и протоколирование количества и типа ошибок P_{33} , контроль и протоколирование аварийной и предупредительной сигнализации P_{34} , контроль и протоколирование действий защит и блокировок P_{35} , фиксация отклонений и графиков основных параметров P_{36} , в том числе начисление штрафных баллов при отклонении текущих параметров от допустимых и отклонений от диспетчерского графика.*

Требования к программному обеспечению.

Идентификация программного обеспечения.

Согласно СТУ 115.015-2003 к характеристикам идентификации программного обеспечения относится *комплект эксплуатационной документации — P_{37} , куда должны обязательно входить: формуляр прикладного программного средства, руководство пользователя и руководство оператора (администратора или/и программиста, в зависимости от особенностей программного средства).* Все документы должны быть оформлены на русском языке в соответствии с требованиями СТУ 115.015-2003. Все документы должны иметь учет-

ный номер фирмы разработчика с указанием даты постановки на учет.

В соответствии с ГОСТ 9127-94 *наименование и обозначение программного продукта* — P_{38} — должны быть указаны на упаковке и носителях. Они должны соответствовать наименованию и обозначению, указанным в эксплуатационных документах.

Обязательным требованием является указание сведений о *версии программного продукта* — P_{39} , даты приема данной версии в эксплуатацию и перечня файлов, входящих в состав программных средств тренажера. Продукт должен иметь *свидетельство о государственной регистрации* — P_{40} , причем копия свидетельства о регистрации должна поставляться в комплекте эксплуатационной документации.

Лицензионная чистота — P_{41} программного продукта обеспечивается наличием лицензионных соглашений на покупное прикладное ПО.

Также обязательным является наличие контрольных формуляров — P_{42} , содержащих перечень входных параметров и соответствующих им результатов для основных режимов функционирования как для тренажера, так и для объекта-прототипа. По этим данным пользователь может судить о корректности функционирования программного обеспечения.

В целом требования к характеристикам идентификации обеспечивают защиту конечного пользователя программного продукта от подделок и недобросовестных разработчиков.

Информационная совместимость и безопасность.

Очень важными требованиями к любому программному продукту являются его устойчивость, совместимость, безопасность для другого программного продукта и для компьютерного оборудования.

Общая устойчивость программного продукта тренажера обеспечивается, прежде всего, *устойчивостью к некорректным входным данным* — P_{43} , а также *устойчивостью к некорректным управляющим воздействиям пользователя* — P_{44} .

Технические условия СТУ 115.015-2003 определяют для тренажерных комплексов обязательную *поддержку открытых форматов для импорта и экспорта данных и создания отчетов* P_{45} , а также *корректную обработку календарной даты и времени* — P_{46} , что особенно актуально ввиду требования работы тренажера в разных временных масштабах.

Технические условия предусматривают обеспечение устойчивости программного продукта тренажера *внешней совместимостью* — P_{47} с операционной средой и другим программным и аппаратным обеспечением (*безопасность для компьютерного оборудования* — P_{48}).

Общие требования к программному обеспечению.

Обновляемость программного обеспечения P_{49} — в связи с постоянной

международной ротацией программно-технических средств должна происходить периодическая замена программно-аппаратной платформы разрабатываемых тренажерных устройств.

Наладка и коррекция ПО через Интернет P_{50} — предусматривается возможность проведения наладочных работ и гарантийного обслуживания ПО тренажера фирмой-исполнителем через Интернет.

Оптимизация программного обеспечения — P_{51} — применение современных информационных технологий направлено на усовершенствование и модернизацию программного обеспечения, то есть на решение следующих вопросов:

- отсутствие специальной компьютерной подготовки обучаемого оператора для работы на тренажере;
- отсутствие использования специального дополнительного оборудования или программного обеспечения, кроме обычного используемого на предприятии-заказчике, за исключением самого тренажерного комплекса;
- реализация требований к обучающим системам: адекватность используемой модели реальному объекту-прототипу; адекватность рабочего места оператора реальному рабочему месту; высокая функциональность пульта инструктора, автоматизированных и контролирующих программ; применения новейших методов обучения и тренировки и др.
- реализация требований к программному обеспечению: правильная организация работы с ресурсами компьютера и сети; гибкость и доступность настроек для обеспечения эффективного восприятия информации обучаемым оператором; простота в установке и эксплуатации; обеспечение безопасности данных; обеспечение совместимости с различными платформами и аппаратными средствами и т. п.
- правильная организация интерфейса и разумное использование современных технологий и средств отображения информации;
- уменьшение требований тренажерных комплексов к аппаратным средствам при одновременном расширении функциональности;
- снижение себестоимости разработок и тренажерных комплексов при росте качества и функциональности.

Общие требования к тренажеру.

Комплексность P_{52} — предусматривается возможность подготовки группы специалистов (вахты) в полном объеме их профессиональной деятельности, или одного специалиста, деятельность которого осуществляется по нескольким специальностям.

Работа в сети P_{53} — должна иметься возможность проводить обучение на тренажере, как индивидуально для каждого обучаемого (локальный ре-

жим работы тренажера), так и коллективно (работа тренажера в сетевом режиме). Сетевой режим работы на тренажере позволяет формировать обучение в компьютерном классе полностью со всеми рабочими местами реального энергообъекта, что позволяет, в свою очередь, проводить противоаварийные тренировки или учения по предотвращению аварий, или инцидентов, имеющих (или имевших) место на электростанции, или на электростанциях других энергосистем. В случае сетевого варианта работы на тренажере должна иметься возможность подключения к серверу (компьютер инструктора) не менее 10 клиентов (рабочие станции обучаемых).

Конфигурация тренажера P_{54} — для обеспечения современной вертикально-интегрированной системы обучения, охватывающей на энергопредприятии все штатные единицы персонала (от обходчика до главного инженера) конфигурация тренажера играет существенную роль.

Практика современного тренажеростроения показывает, что требования к конфигурации тренажеров в значительной степени зависят от места их установки:

- в центрах подготовки кадров;
- непосредственно на энергообъектах.

Так, если в центрах (пунктах) подготовки кадров, как правило, для тренажерных комплексов и компьютерных классов предусматриваются отдельные помещения со специальным обслуживающим и инструктивным персоналом, то установка тренажеров непосредственно на энергообъектах встречает определенные затруднения в части реализации требований к помещению для тренажеров и их обслуживанию.

На подавляющем большинстве энергообъектов работа с персоналом сосредоточена непосредственно в цехах и носит индивидуальный характер, в связи, с чем требования к конфигурации тренажерного комплекса носят характер минимизации.

Кроме того, практически все административные и технические руководители верхнего и среднего звена энергообъектов, как правило, выражают желание иметь на своих персональных компьютерах тренажер указанного энергообъекта для самостоятельной работы на нем с целью сохранения и повышения собственной квалификации, а также контроля и разбора с подчиненным персоналом аварийных ситуаций, произошедших на объекте.

Таким образом, возникает объективная потребность в определенном виде тренажерах, предназначенных для индивидуальных (персональных) пользователей.

Большинство тренажерных комплексов, внедренных в настоящее время в электроэнергетике, имеют конфигурацию, состоящую из 5÷10 компьюте-

ров при моделировании электростанций с поперечными связями и энергоблоков 150÷800 МВт.

Естественно, что такой тренажерный комплекс не может удовлетворить указанным требованиям при индивидуализации обучения и контроля за работой оборудования.

Вынужденность громоздкой конфигурации тренажерных комплексов определяется большой размерностью моделируемой системы объекта-прототипа и необходимостью обеспечения всережимности и полномасштабности модели и приложений.

Однако внедрение в процесс разработки и сопровождения тренажерных комплексов эксклюзивных авторских программ, а также новейших достижений информационных технологий, таких как технологии визуального компонент-ориентированного проектирования модели и программной оболочки тренажера, использование принципа модульности и динамически подключаемых программных модулей и библиотек (plug-in), динамического создания и уничтожения объектов, многопоточной организации приложений и т. п. позволяет значительно усовершенствовать и минимизировать модель объекта-прототипа, и тем самым, уменьшить ресурсоемкость конечного продукта.

Причем расширение функций обучения с привлечением инструктора и других специальностей и их рабочих мест успешно реализуется при помощи сетевого варианта.

Таким образом, появляется возможность реализовать *персональный компьютерный тренажер* с установкой на одном компьютере, удовлетворяющий требованиям минимизации интерфейса при организации индивидуального обучения персонала с обеспечением всережимности и полномасштабности модели объекта-прототипа и ее приложений.

Условия пуска-останова и ввода-вывода информации P_{55} — многие тренажерные комплексы, поставляемые отечественными и зарубежными фирмами, имеют существенные программно-технологические трудности, связанные с условиями пуска-останова тренажера и с условиями ввода-вывода технологической информации (пуск — 17 операций, останов — 15 операций, ввод информации — 12 операций и т. д.), что зачастую приводит к фактическому отказу от использования тренажера в учебном процессе.

Современные возможности программирования в части режимов пуска-останова и ввода-вывода информации позволяют применять технические решения, минимизирующие указанные условия до размера одной команды.

Разрешительная документация.

В соответствии с Законами РФ «О техническом регулировании», «О серти-

фикации продукции и услуг», «О науке и государственно-технической политике», «О лицензировании отдельных видов деятельности» и «Патентным Законом», определяющими в РФ порядок взаимоотношений между производителем и потребителем научно-технической продукции тренажер должен иметь следующую разрешительную документацию:

- *сертификация соответствия* P_{56} — программные средства разрабатываемого тренажера должны быть сертифицированы на соответствие требованиям «Норм годности программных средств подготовки персонала энергетики» (СО 153-34.0-12.305-99) и Технических условий «Прикладные программные средства полномасштабных тренажеров» (СТУ 115.015-2003).

- *сертификация безопасности* P_{57} — технические средства разрабатываемого тренажера должны быть сертифицированы на соответствие требованиям стандартов ГОСТ МЭК 60950-2002, ГОСТ Р 51317.4.3-99 для гарантии безопасности продукта для оперативного персонала.

- *сертификация качества* P_{58} — процессы разработки и сопровождения тренажера должны быть сертифицированы на соответствие стандарту «Система менеджмента качества. Требования» (ГОСТ Р ИСО/МЭК 9001-2002).

- *аккредитация* P_{59} — предприятие-изготовитель научно-технической продукции в тренажеростроении должно иметь Свидетельство о государственной аккредитации при Министерстве связи и массовых коммуникаций для подтверждения права деятельности в области информационных технологий (Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 №1152).

- *лицензирование* P_{60} — предприятие-изготовитель тренажеров и программных средств для подготовки инструкторского и оперативного персонала должно иметь лицензию на право образовательной деятельности (Федеральный Закон РФ от 4 мая 2011 г. №99 ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности»).

Таким образом, разработанная система единичных показателей (критериев) качества тренажерной техники позволяет определить интегральный показатель — *индекс уровня качества тренажера*, то есть определить способность тренажера удовлетворять установленные и предполагаемые потребности потребителя.

4.7. Вероятностно-статистический подход к оценке качества и эффективности динамических моделей энергообъектов для тренажеров оперативного персонала

Существуют различные методы оценки точности динамических моделей для тренажеров [46, 47].

Так, в работе [46] адекватность модели объекту оценивается, исходя из

эффективности обучения. Полученные зависимости позволяют рассчитать допустимые погрешности в процессе проектирования тренажера при допустимом снижении эффективности обучения.

Достоинство такого метода состоит в обобщенном вероятностно-статистическом подходе к связи погрешности модели с эффективностью обучения. Однако необходимость априорного определения уровня эффективности обучения значительно снижает возможность применения предлагаемого метода в процессе проектирования, особенно при отсутствии опыта обучения на подобных тренажерах.

В работе [47] точность динамических моделей для тренажеров оценивается экспертным методом по вероятности установления человеком-оператором отклонения приближенной модели от эталона.

Достоинство рассмотренного метода в возможности априорной оценки статической и динамической точности модели тренажера в процессе его проектирования. Однако некоторая условность экспертного подхода (в качестве экспертов привлекались студенты и аспиранты), полное несоответствие операторского интерфейса тренажера и объекта при рассмотрении только цифрового способа предоставления информации вызывают сомнения в достаточной обоснованности применения данного метода для проверки адекватности моделей промышленных тренажеров, предназначенных к тому же для повышения квалификации опытного оперативного персонала.

Общий недостаток рассмотренных методов — с их помощью невозможно осуществить интегральную оценку адекватности такой сложной многомерной системы, логико-динамическая модель тренажера энергоблока с учетом стохастической природы объекта-прототипа и самой модели.

В зарубежной практике тренажеростроения [12] контролю качества моделей оборудования и процессов уделяется большое внимание. Основная концепция требований к обеспечению качества тренажера формулируется следующим образом: «Тренажер для электростанции на органическом топливе должен вести себя во всех мыслимых нормальных и аварийных производственных ситуациях так, чтобы опытный оператор не смог констатировать существенных отличий от реального оборудования. Такого качества тренажера можно достичь только при соответствующем контроле проектирования и точности изготовления со стороны заказчика».

Таким образом, на основании имеющихся отечественных и зарубежных методов и требований к оценке точности динамических моделей для тренажеров необходимо выработать подход, обеспечивающий условия подобия (адекватности) модели энергообъекта тренажера информацион-

ной модели в системе «человек – машина». В итоге он должен гарантировать максимальный перенос навыков с тренажера на объект и обеспечить оператору возможность эффективно управлять реальным процессом.

При разработке подхода к оценке точности динамических моделей для тренажера выдвигались следующие требования:

- учет стохастической природы переменных объекта моделирования и модели;
- контроль качества модели на всех этапах проектирования, разработки, изготовления и внедрения;
- инвариантность относительно физической сущности рассматриваемых процессов;
- возможность описания любых (статических и динамических) различий процессов объекта и модели.

При общности указанных признаков рабочие критерии адекватности на различных этапах разработки и создания модели могут быть различными и отвечать конкретной сущности и целям данного этапа.

С точки зрения оценки качества процесс создания модели можно условно разделить на три этапа (рисунок 28). Каждому этапу соответствует специальный (индивидуальный) критерий оценки качества.

Рисунок 28. Система управления качеством в процессе создания модели для тренажеров.

Этап	Задача	Критерий
Идентификация	Разработка математических моделей функциональных связей	Максимального правдоподобия
Имитация	Разработка и регрессионный анализ отдельных имитаторов	Регрессионного анализа (критерий Стьюдента и F-критерий Фишера)
Реализация	Реализация отдельных подсистем и модели в целом	Информационно-экспертный

Рассмотрим количественные отношения, следующие из теории информации и применимые к вероятностно-статистическому подходу при комплексной оценке качества такой сложной системы, как модель энергообъекта для тренажера.

В теории информации [48] приводится интегральная характеристика неопределенности — энтропия, т. е. непрерывное распределение вероятностных переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$:

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \dots, x_n) \times \ln p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (4.2)$$

— функционал закона распределения вероятностей, учитывающий особенности этого закона.

Такую энтропию, как правило, называют *информационной*. Приращение энтропии состояния процесса обусловлено разбросом переменных этого процесса ($\pm \Delta$), т. е. вариацией переменных.

Количество информации, получаемое в результате измерения переменных процесса, равно убыли неопределенности:

$$I = H(x) - H(x/x_n), \quad (4.3)$$

где $H(x)$ — первоначальная энтропия; $H(x/x_n)$ — условная энтропия, оставшаяся после получения информации. Условная энтропия равна энтропии распределения плотности вероятностей переменных процесса, обусловленного вариацией переменных и погрешностью их измерения. Она может быть найдена на основании статистики распределения вариации переменных, безотносительно к закону распределения вероятностей самих переменных.

Однозначного соответствия между мощностью помехи (ее дисперсией) и вносимой ею дезинформацией не существует, так как при одной и той же мощности помехи вносимая ею дезинформация различна и зависит от вида закона распределения вероятностей этой помехи. В связи с этим

вариацию переменных процесса необходимо характеризовать не их действительной мощностью, определяемой среднеквадратическим значением, а энтропийной мощностью, т. е. той частью мощности, которая вызывает потерю информации.

Энтропия (дезинформационное действие) разброса переменных при заданном среднеквадратическом значении (заданной мощности вариации переменных) и при нормальном законе распределения вероятности вариации параметров:

$$H(x/x_n) = \ln \sigma \sqrt{2\pi e} \quad (4.4)$$

В случае распределения вероятностей разброса переменных, близкого к равномерному, значение интервала неопределенности определяется выражением:

$$H(x/x_n) = \int_{-\Delta}^{+\Delta} \frac{1}{2\Delta} \ln \frac{1}{2\Delta} dx = \ln 2\Delta, \quad (4.5)$$

где Δ — половина ширины интервала неопределенности. Таким образом, распределение вероятностей разброса переменных с нормальным законом распределения имеет точно такое же дезинформационное действие, как и резко ограниченное равномерное распределение, если ширина интервала неопределенности:

$$2\Delta = \sigma \sqrt{2\pi e} \quad (4.6)$$

Из анализа выражений (12) – (14) следует, что если разброс переменных с произвольным законом распределения вероятностей имеет условную энтропию $H(x/x_n)$, то энтропийный интервал вариации переменных независимо от вида закона распределения будет определяться выражением $2\Delta = \exp[H(x/x_n)]$. Отсюда следует, что энтропийное значение разброса (вариации) переменных вычисляется как половина ширины эквивалентного по энтропии интервала вариации переменных с равномерным законом распределения вероятностей:

$$\Delta = \pm (1/2) \exp [H(x/x_n)]. \quad (4.7)$$

Таким образом, энтропийное значение вариации переменных дает возможность вариацию переменных с любым законом распределения вероятностей заменить вариацией переменных с резко ограниченным равномерным законом распределения вероятностей, но с тем же значением энтропии.

Это позволяет заменить реальную полосу разброса переменных резко ограниченной полосой с равномерным законом распределения вероятностей, полностью эквивалентной реальной в информационном смысле. На основании этого могут быть получены объективные оценки вариации переменных объекта моделирования и объективно установлены погрешности модели по всем переменным. Из сказанного можно сделать вывод, что энтропийные оценки разброса переменных процесса, т. е. применение методов информационной теории, позволяет выявить более полноценные и устойчивые критерии оценки качества модели, чем упоминавшиеся, поскольку они отражают более глубокие свойства вариации переменных как случайных величин.

Процесс и модель эквиваленты по количеству передаваемой информации в случае, если фазовая координата процесса ξ_n и модели ξ_m отличаются на 2Δ , и:

$$\begin{aligned} \max n_k - m_k &\leq 2\Delta; \\ m_k - \min n_k &\leq 2\Delta \quad (k = 1, 2, \dots, l), \end{aligned} \quad (4.8)$$

а также выполняется условие:

$$H_n(n/n_i) = H_m(m/m_i),$$

где n_k и m_k — подмножество переменных процесса и модели.

Сводя неравенства (4.8) к одному, можно получить необходимое и достаточное условие эквивалентности процесса и модели по переменной k для тренажера:

$$\left. \begin{aligned} |n_k - m_k| &< 2\Delta k \quad (k = 1, 2, \dots, L_i); \\ H_n(n/n_i) &= H_m(m/m_i) \end{aligned} \right\}. \quad (4.9)$$

Энтропийный критерий эквивалентности процесса и модели позволяет решить ряд важных вопросов моделирования, а именно, определение допустимой глубины упрощения модели; ширины допустимых значений переменной для построения статистической или квазистатистической модели; окончания переходов.

Обобщенный показатель качества модели складывается из единичных информационных показателей качества по каждой переменной, значимость которой в моделируемой системе определяется методом ранговой корреляции. Значимость переменных модели оценивалась экспертами: опытными операторами энергоблоков, а также инструкторами учебно-тренировочного центра Мосэнерго с помощью специально разработан-

ных анкет (таблица 5). Данные экспериментально-наладочных работ обрабатывались методом ранговой корреляции (таблица 6).

Таблица 5. Параметры (факторы) котла.

Фактор	Переменная	Обозначение	Размерность	Ранг
x1	Расход питательной воды по ниткам А и Б	$D_{ПВ}^{А(Б)}$	т/ч	
x2	Расход природного газа	Q_2	нм ³ /ч	
x3	Температура перегретого пара	$t_{не}$	°С	
x4	Давление острого пара	P_o	кгс/см ²	
x5	Температура пара за промперегревателем	t''_{nn}	°С	
x6	Температура газа в поворотной камере	$T_{нк}$	°С	
x7	Давление перед ВЗ	$p'_{вз}$	кгс/см ²	
x8	Температура среды перед ВЗ	$t'_{вз}$	°С	
x9	Давление горячего промперегрева	$p''_{кпп} II$	кгс/см ²	
x10	Температура среды перед вторым впрыском	$t'_{впр} II$	°С	
x11	То же перед аварийным впрыском	$t'_{ав впр}$	°С	
x12	Расход перегретого пар	$D_{пп}$	т/ч	
x13	Давление за ПЭНом	$p''_{ПЭН}$	кгс/см ²	
x14	То же ПТНом	$p''_{ПТН}$	кгс/см ²	
x15	Давление воздуха в перемычке	$p_{в пр}$	кгс/см ²	
x16	Разрежение вверху топки	s''_T	кгс/см ²	
x17	Содержание кислорода в дымовых газах	O_2	%	
x18	Температура уходящих газов	T_{yx}	°С	
x19	Давление природного газа за клапаном	$p''_{кл}$	кгс/см ²	
x20	То же питательной воды	$p_{пв}$	кгс/см ²	
x21	Температура среды перед первым впрыском	$t'_{впр1}$	°С	
x22	Давление холодного промперегрева	$P_{х nn}$	кгс/см ²	
x23	Температура среды за первым впрыском	$t''_{впр} I$	°С	
x24	То же за вторым впрыском	$t''_{впр} II$	°С	
x25	Температура холодного промперегрева	$t_{х nn}$	°С	
x26	Температура пара за аварийным впрыском	$t''_{ав впр}$	°С	
x27	Расход воды на аварийный впрыск	$D_{ав впр}$	т/ч	
x28	То же на первый впрыск	$D_{впр} I$	т/ч	
x29	То же на второй впрыск	$D_{впр} II$	т/ч	

Оценка согласованности мнений экспертов, определяемая коэффициентом конкордации, вычисляется по формуле:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{\left[\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - \frac{m}{12} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (f_j^3 - f_j) \right]} \quad (4.10)$$

где δ — отклонение от средней суммы рангов; n, m — число переменных и экспертов; f_j — j -е число одинаковых рангов в i -м ранжировании.

Значимость коэффициентов конкордации оценивалась по критерию:

$$\chi_{расч}^2 = m(n - 1)W, \quad (4.11)$$

Если $\chi_{расч}^2 \gg \chi_{табл}$, то можно утверждать, что имеется некоторая согласованность мнений экспертов относительно степени важности моделируемых переменных. Далее была построена диаграмма рангов и определены коэффициенты весомости каждой переменной g_i .

Оценка информационного качества модели по энтропийному значению вариации переменных проводилась по показателю качества:

$$\gamma_i = 1 - \left| \frac{\Delta_{in} - \Delta_{im}}{\Delta_{in}} \right|, \quad (4.12)$$

где Δ_{in} — ширина энтропийного интервала вариации i -й переменной реального процесса, вычисленная с учетом допустимых отклонений этой переменной от номинального значения; Δ_{im} — ширина энтропийного интервала вариации i -й переменной модели.

Допустимые отклонения для переменных, входящих в систему защит, принимались равными $\pm 2\%$, для всех остальных переменных $\pm 10\%$.

Обобщенный показатель качества модели энергообъекта находился из выражения:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(g_i \gamma_i + 1)}{0,7} \quad (4.13)$$

При $\sum_{i=1}^n g_i = 1$ обобщенный показатель качества модели находится в пределах $0 \leq K \leq 1$.

$$k' = \sum_{i=1}^n k'_i = 0,70; \quad k'' = \sum_{i=1}^n k''_i = 0,96$$

Таблица 6. Обработка экспериментальных данных методом ранговой корреляции.

Пара- метр	$D_{ПВ}$	Q_2	$t_{не}$	P_0	t''_{nn}	$T_{нк}$	p'_{63}	t'_{63}	$p''_{кнн}$	$t'_{впр}$	$t'_{ав впр}$	D_{nn}	$p''_{пэн}$	$p''_{пгн}$	$p_{в пр}$
Экс- перт	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	2	1	8	7	9	21	10	3	22	20	23	24	5	4	11
3	1	2	16	8	9	7	4	5	17	18	23	6	10	и	13
4	1	2	6	4	16	22	5	10	18	19	17	7	8	9	11
5	1	3	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	1	3	2	4	5	14,5	16	6	7	17	8	9	19,5	10,5	10,5
7	4	3	1	2	5	9	6	8	7	14	16	10	17	24	15
8	1,5	1,5	4	3	6	7	9	8	5	10	11	13	14,5	14,5	18
9	3	2	1	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	13	15
$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	15,5	19,5	43	40	65	96,5	71	65	102	128	131	105	114	114	123,5
δi	-119,5	-125,5	-92	-95	-70	-38,5	-64	-70	-33	-7	-4	-30	-21	-21	-11,5
δi^2	14280,25	13340,25	8464	3025	4900	1482,25	4096	4900	1089	49	16	900	441	441	132,25
$a_{i cp}$	1,7	2,2	4,8	4,4	7,2	10,7	8	7,2	11,3	14,2	14,6	11,7	12,7	12,7	13,7
a_i	1	2	4	3	5,5	8	7	5,5	9	15	17	10	11,5	11,5	13
G_i	1	0,97	0,91	0,94	0,86	0,8	0,83	0,86	0,77	0,61	0,55	0,74	0,7	0,7	0,67
$g_i \times 10^{-2}$	5,74	5,57	5,23	5,4	4,94	4,6	4,77	4,94	4,42	3,5	3,16	4,25	4,02	4,02	3,85
γ_i'	0,63	0,98	0,97	1	0,99	0,9	0,37	0,9	0,41	0,13	0,6	0,5	1	1	0,5
$k_i' \times 10^{-2}$	3,62	5,46	5,07	5,40	4,89	4,14	1,76	4,46	1,81	0,46	1,90	2,13	4,02	4,02	1,98
γ_i''	1	1	1	1	1	1	0,94	1	0,86	1	1	1	1	0,83	0,86
$k_i'' \times 10^{-2}$	5,74	5,57	5,23	5,40	4,94	4,6	4,48	4,94	3,80	3,5	3,16	4,25	4,02	3,34	3,31

	s''_T	O_2	T_{yx}	$p''_{кл}$	$p_{нб}$	$t'_{впр I}$	P_{xnn}	$t''_{впр I}$	$t''_{впр II}$	t_{xnn}	$t''_{ав впр}$	$\mathcal{D}_{ав впр}$	$\mathcal{D}_{впр I}$	$\mathcal{D}_{впр II}$	Число одина- ковых рангов
	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	Σf
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	—
	12	13	14	6	19	15	25	16	26	27	28	29	17	18	—
	12	14	15	3	22	20	21	19	24	25	26	27	28	29	—
	12	13	15	3	14	20	24	23	21	27	28	29	26	25	—
	16	17	26	18	19	20	21	22	23	24	25	28	27	29	—
	12	13	14,5	18	19,5	21	22	23	24	25	26	27	28	29	—
	11	18	12	21	13	20	26	25	23	22	19	29	28	27	2+2+2
	16	12	17	21	20	19	23	22	24	25	26	27	28	29	—
	18	17	16	21	20	19	24	23	22	25	26	29	28	27	2
	125	134	147,5	130	166,5	175	208	196	211	225	230	251	239	242	—
	-10	-1	12,5	5	31,5	40	73	61	76	90	95	116	104	107	—
	100	1	156,25	25	992,25	1600	5329	3721	5776	8100	9025	13456	10816	11449	—
	13,9	14,9	16,4	14,4	18,5	19,4	23,1	21,8	23,4	25	25,6	27,9	26,5	26,9	—
	14	18	19	16	20	21	23	22	24	25	26	29	27	28	—
	0,64	0,52	0,49	0,58	0,46	0,43	0,37	0,4	0,34	0,31	0,28	0,2	0,25	0,23	—
	3,68	2,99	2,81	3,33	2,64	2,47	2,13	2,3	1,95	1,78	1,61	1,15	1,44	1,32	—
	1	0,5	0,95	0,5	1	0,5	0,57	0,34	0,25	0,27	0,37	0,5	0,5	0,5	—
	3,68	1,50	2,67	1,67	2,64	1,23	1,21	0,58	0,66	0,48	0,60	0,58	0,72	0,66	—
	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,75	1	1	1	1	1	—
	3,68	2,99	2,81	3,33	2,64	2,47	2,13	1,15	1,46	1,78	1,61	1,15	1,44	1,32	—

Этап проверки адекватности и комплексной наладки модели состоял из следующих частей:

- предварительная проверка логической, статической и динамической составляющих цифровой модели с определением отклонений от проектной документации;
- отладка отдельных имитаторов (частей программы) с устранением различного рода ошибок (логических, методических, технических и т. п.);
- комплексная наладка подсистем цифровой модели с проверкой правильности взаимодействия их между собой, а также показателями интерфейса АСУТП, системами автоматики, сигнализации, защит и блокировок;
- приемочные испытания модели энергообъекта по специальной программе.

Смонтированные подсистемы прошли предварительную проверку, в результате которой выявилась необходимость в корректировке параметров отдельных имитаторов модели. Обобщенный показатель качества после монтажа тренажера составил 0,7. Была проведена отладка имитаторов модели и комплексная отладка подсистем. Обобщенный показатель качества после проведения наладочных работ составил 0,96 (таблица 6).

Нижняя допустимая граница обобщенного показателя качества модели, вычисленная на основании метрологического критерия ничтожных погрешностей [48], равна 0,95. В нашем случае ($K''=0,96$) информационная энтропия модели ничтожно мало отличается от информационной энтропии установки. Этим отличием и его дезинформирующим и упрощающим действием можно пренебречь.

Приемочные испытания модели энергообъекта и опыт обучения персонала на тренажере свидетельствуют об эффективности примененного подхода и допустимости сделанных упрощений.

Заключение

Таким образом, научное предприятие «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ») является крупным поставщиком тренажеров и обучающих программ для подготовки персонала тепловых электрических станций и сетевых предприятий энергетической отрасли РФ и стран СНГ. Работает в области тренажеростроения для энергетики около 40 лет.

В объем разработок и поставок тренажеров и автоматизированных учебных курсов (АУК) АО «ТЭСТ» входит практически вся номенклатура энергомашиностроительных заводов и заводов электротехнического оборудования РФ и стран СНГ.

Так, тренажеры и АУКи фирмы «ТЭСТ» энергоблоков 200 МВт внедрены на Харанорской ГРЭС, Гусиноозерской ГРЭС, Южноуральской ГРЭС, Приморской ГРЭС, Печорской ГРЭС, Смоленской ГРЭС, тренажеры дубль-блока 150 МВт на Красноярской ГРЭС-2, Невинномысской ГРЭС, Яйвинской ГРЭС, ПГУ-450 МВт на Южной ТЭЦ филиала Невский ТГК-1, ПГУ-410 на Няганской ГРЭС, тренажеры ПГУ-39 МВт и ПГУ-80 МВт на Сочинской ТЭС (см. рисунки 29, 30, 31, 32, 35 и 36).

Внедрены и успешно эксплуатируются тренажеры и АУКи теплофикационных энергоблоков 80, 100, 175, 250 МВт, парогазовых установок на блочных и электростанциях с поперечными связями в энергосистемах городов: Москвы, Санкт-Петербурга, Вологды, Ижевска, Омска, Красноярска, Владивостока, Иркутска и в ряде энергосистем стран СНГ (Евро-азиатская энергетическая корпорация, Экибастузская ГРЭС-1, Алматинские электрические станции, Алматинские электрические сети и др.).

Внедрены и успешно эксплуатируются тренажеры АО «ТЭСТ» на энергетических предприятиях и в учебных центрах нефтегазового комплекса, водоканала и др.

Широко используются тренажеры и обучающие программы АО «ТЭСТ» для подготовки специалистов в энергетических и политехнических университетах РФ — Корпоративный энергетический университет (КЭУ), МЭИ, Казанский энергетический университет, Уральский, Омский, Томский, Иркутский, Дальневосточный политехнические университеты, а также в энергетических колледжах и техникумах городов Москва, Иваново, Иркутска, Уфы, Владивостока, Благовещенска, Невинномысска и др.

В 2012 году АО «ТЭСТ» на Экибастузской ГРЭС-1 Республики Казахстан

Рисунок 29. Сочинская ТЭС.

Рисунок 30. Тренажеры ПГУ-39 МВт, ПГУ-80 МВт в учебном классе с видеостеной Сочинской ТЭС.

Рисунок 31. Учебный класс Заинской ГРЭС Тренажер блока 200 МВт.

Рисунок 32. Учебный класс Смоленской ГРЭС Тренажер блока 210 МВт.

Рисунок 33. Нововоронежская АЭС-2.

Рисунок 34. Тренажер главной электрической схемы станции в УТЦ Нововоронежской АЭС-2.

Рисунок 35. Учебный класс на Томской ТЭЦ-1, Тренажер ГТУ 16 МВт.

Рисунок 36. Учебный класс Яйвинской ГРЭС, Тренажер блока 160 МВт.

совместно с фирмой «Эмерсон» разработан и введен в эксплуатацию полномасштабный тренажерный комплекс с эмуляцией верхнего уровня АСУТП на базе ПТК «Овация» Эмерсон, включающий эксклюзивное учебно-методическое обеспечение АО «ТЭСТ», с интеграцией базы данных модели энергообъекта АО «ТЭСТ» с реальным программным обеспечением ПТК «Овация». Тренажерный комплекс позволяет не только обучать оперативный персонал КТЦ и электроцеха, но и производить силами цеха ТАИ настройку алгоритмов реальных контроллеров АСУТП.

На тренажерах и АУК, разработанных АО «ТЭСТ», были проведены Всероссийские соревнования операторов станций с поперечными связями, операторов энергоблоков 250–300 МВт, соревнования операторов энергоблоков 200÷300 МВт ОГК-3 в 2006 году, региональные соревнования энергосистем Приморья, Хабаровска, Якутии, Магадана, Камчатки, Сахалина в 2007 и 2010 годах.

В июне 2017 года на тренажере АО «ТЭСТ» — «Электростанция с поперечными связями» были проведены региональные соревнования энергетических организаций Юга России. В IX Конкурсе профессионального мастерства приняли участие следующие организации: ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго», ООО «Тепловая генерация г. Волжского», Волжская ТЭЦ, Волжская ТЭЦ-2, Камышинская ТЭЦ, ООО «Лукойл-Ростовэнерго», ПАО «Кубаньэнерго», филиалы ПАО «МРСК Юга», Волгоградэнерго, Астраханьэнерго, Ростовэнерго, ПАО «МРСК Северного Кавказа» «Ставропольэнерго».

С 2008 года АО «ТЭСТ» проводит ряд работ, связанных с подготовкой персонала, для вновь вводимых атомных энергоблоков строящихся электростанций концерна «Росэнергоатом». Так, в 2014 году на Нововоронежской АЭС-2 введен в эксплуатацию тренажер «Главной электрической схемы» (рисунки 33–34).

Проект учебно-тренировочного центра Нововоронежской АЭС-2 с тренажером АО «ТЭСТ» «Главная электрическая схема» признан референтным (эталонным) для сооружаемых АЭС за рубежом. Среди потенциальных заказчиков — Республика Беларусь, Турция, Чехия, Финляндия, Вьетнам, Бангладеш.

АО «ТЭСТ» разработана и запатентована эксклюзивная методология создания математических моделей энергетического оборудования и процессов, на базе чего совместно с отраслевыми научно-исследовательскими институтами разработан и утвержден в соответствующих ведомствах ряд нормативных документов по тренажеростроению, в том числе СТУ 115.015.2003.

Продукция АО «ТЭСТ» разработана на основе собственных патентов, авторских и регистрационных свидетельств программного обеспечения Ро-

спатента РФ, имеет российскую нормативную сертификацию (сертификаты на соответствие стандартам, нормам и СТУ — СО153-34.0-12.305-99, СТУ 115.015.2003, ГОСТ Р МЭК 60950-2002, ГОСТ Р 51318.22.99, ГОСТ Р 51317.4.3-99), а фирма «ТЭСТ» международную сертификацию менеджмента качества ISO 9001:2000.

АО «ТЭСТ» является научным предприятием (сертификат Минпромнауки).

На базе АО «ТЭСТ» в 1999 году создан Департамент ЮНЕСКО «Технические обучающие системы в энергетических технологиях» («Technical educational systems in energy technologies» TEST UNESCO).

АО «ТЭСТ» является учредителем и издателем научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики» (ISSN 1999-5555, www.sigma08.ru).

АО «ТЭСТ» имеет аккредитацию при ЮНЕСКО, Правительстве РФ, а также является членом Ассоциации образовательных учреждений электроэнергетики РФ и коллективным членом Академии Промышленной Экологии России.

Продукция АО «ТЭСТ» прошла апробацию на многих российских и международных выставках и форумах, где получила золотые и серебряные медали и дипломы.

Тренажеры АО «ТЭСТ» включают в себя: всережимные адекватные математические и программные модели энергообъектов, проектную схему дистанционного и автоматического управления, защит, сигнализаций и блокировок, в том числе современные распределенные микропроцессорные АСУ ТП (Siemens, ABB, Эмерсон, Квинт и др.), а также развитую эксклюзивную систему учебно-методического обеспечения (контролирующие программы штатных и аварийных ситуаций, сценарии тренировок, систему поддержки оператора, пульт инструктора, сетевой вариант и т. д.).

АО «ТЭСТ» поставляет также компьютерные автоматизированные учебные курсы (АУК). Учебные курсы предназначены для обучения персонала энергопредприятий правильной эксплуатации технологического оборудования. За основу курса берется инструкция по эксплуатации заданного объекта, принятая на предприятии заказчика. Текст инструкции снабжается иллюстрациями и схемами, способствующими более полному усвоению учебного материала. Все курсы имеют оболочки, включающие программу самостоятельной проверки знаний и программу экзаменационного тестирования.

Таким образом, АО «ТЭСТ» поставляет энергопредприятиям не просто отдельные тренажеры, а *эксклюзивную систему обучения* оперативного персонала, включающую автоматизированные обучающие курсы (первая

ступень обучения), всережимные полномасштабные компьютерные тренажеры (вторая ступень обучения), содержащую развитую систему учебно-методического обеспечения и охватывающую все цеха энергопредприятия (КТЦ, электроцех, цех ТАИ, химцех, ТТЦ, ремонтный цех и др.). Все программные продукты АО «ТЭСТ» *эксклюзивны*, то есть для каждого энергоблока создается *своя оригинальная* модель оборудования и процессов. Программные продукты АО «ТЭСТ» *адаптивны*, то есть могут изменяться при изменении объекта (ремонт, реконструкция, режимные настройки и др.).

В объем поставки («под ключ») также включается:

- современная вычислительная и видеотехника (персональные компьютеры, жидкокристаллические экраны, принтеры и т. п.);
- пуско-наладочные работы по аппаратной части тренажеров и АУК;
- подготовка инструкторского персонала энергопредприятия по программе «ТЭСТ ЮНЕСКО» с выдачей сертификата международного образца.

О критериях научности. Вместо послесловия.

Научная методология в современном образовательном процессе персонала электроэнергетики должна распространяться на все его компоненты: цели, средства, результаты, принципы, формы и методы. Основными единицами образовательной матрицы являются технологические знания, а также современные информационные технологии (IT-тренажеры), способствующие формированию навыков и умений, которые включают обучаемого в реальный процесс управления энергетическими объектами.

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

Проблема, в философском смысле, понимается как «*знание о незнании*». В переводе с древнегреческого слово «проблема» означает: преграда, трудность, задача.

Проблема — это совокупность суждений, норм, законов, включающая в себя как ранее установленные факты, так и суждения о еще непознанном содержании объекта моделирования. Проблема выглядит как выраженное в понятии объективное противоречие между языком наблюдения (эксперимента) и теоретическим описанием (исходной моделью). Постановка и решение проблемы и служит средством получения нового знания об объекте моделирования.

Но и сама проблема определяется неоднозначно, с одной стороны, как содержание, которое не имеется в накопленном знании, с другой стороны, как реконструкция имеющейся исходной модели, то есть наличествующего массива знания.

Проблемы следует отличать от *псевдопроблем*, которые фиксируют мнимое противоречие. Псевдопроблема — это зависимое от субъекта представление (высказывание, суждение, заключение) о противоречиях между языком наблюдения и теоретическим описанием. Решение псевдопробле-

мы вследствие ее субъективности принципиально не может привести к получению истинного знания об объекте исследования (моделирования). Чаще всего псевдопроблема приводит к тупиковому решению или отсутствию решения.

Именно псевдопроблемы рассматривает известный принцип английского философа Уильяма Оккама (1285–1349) («бритва Оккама»): «Не следует множить сущности без надобности», означающий, что каждый термин обозначает лишь определенный предмет, а каждая проблема объективна своей реальной потребностью. Причины появления псевдопроблем различны — от профессиональной некомпетентности до конкурентной прагматичной тенденциозности.

Однако познающий субъект (разработчик) находится не только в проблемной ситуации «знания о незнании». Чаще всего он пребывает в *допроблемной* ситуации — «незнания о незнании». Указанная стадия в настоящее время покрывает собой все реалии обыденной жизнедеятельности многих российских и зарубежных фирм — разработчиков тренажеров.

Прагматический смысл наших публикаций, а также разрабатываемых нормативных документов и состоит в том, чтобы донести до познающего субъекта номинальные (требуемые) характеристики объекта моделирования и, таким образом, перевести разработчика из допроблемной ситуации в проблемную.

Для качественной дифференциации принципов построения моделей энергообъектов необходимо рассмотреть общепризнанные «критерии научности», которые отделяют науку от ненауки.

Критерии научности, включенные в структуру научной методологии, призваны отсеять проблемы от псевдопроблем, а также оценить продукты и методы познания 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 научной методологии: объективность, опытная подтверждаемость, рациональность, воспроизводимость, интересубъективность, общезначимость, формальная непротиворечивость, когерентность.

Основным критерием научной методологии является *объективность*, которая фиксирует совпадение знания со своим объектом и устраняет все, что связано с субъективизмом в познавательной деятельности (псевдопроблемы). Объективность способствует изучению сущности самой вещи. Независимость от познающего субъекта считается основополагающей чертой объективности.

Научная методология, претендующая на объективность, отбрасывает все

псевдопроблемы, т. е. высказывания, суждения и заключения, в которых просматривается явная причастность к характеристикам индивидуального мышления.

В связи с этим, весьма современной выглядит классификация псевдопроблем английского философа Френсиса Бэкона (1561 – 1626), т. е. искаженных представлений людей о действительности, которые он назвал «идолами познания»: идолы рода, идолы пещеры, идолы рынка, идолы театра.

Идолы рода свидетельствуют о том, что человеческому роду изначально присущи многочисленные заблуждения, ограниченные и ложные представления. *Идолы пещеры* обусловлены сложностью внутреннего мира человека, а зачастую и неадекватностью его психики, в силу которых восприятие окружающего мира искажается и деформируется. *Идолы рынка* порождаются неверной и несогласованной терминологией, благодаря чему возникают пустые и бесплодные «рыночные» споры и дискуссии. *Идолы театра* являются следствием некритического заимствования положений различных, зачастую противоречащих друг другу методологий и доктрин, благодаря чему познающий субъект оказывается на «сцене» вымышленного, нереального мира.

Можно отметить, что, несмотря на прошествие четырехсот лет со времен Френсиса Бэкона, многочисленные революции, трансформации, реформации и реформы, человечество в смысле гносеологии мало изменилось, и упомянутые идолы, или псевдопроблемы вольготно чувствуют себя как в нашем обществе в целом, так и в среде разработчиков тренажеров и программного обеспечения.

Подход к причинам появления псевдопроблем, предложенный русским ученым Л. Н. Гумилевым¹¹ связан с объяснением процессов этногенеза выбросами космической энергии. Возникающее на основании этих выбросов явление *пассионарного скачка* (от латинского *passio* — страсть) приводит к «уклонению от видовой нормы», рождению мутантов — *пассионариев* — индивидов с повышенной энергетичностью. Импульс пассионарности может быть так силен, что носители данного признака не могут рассчитать последствия своих поступков. Поэтому пассионарность следует понимать не как атрибут сознания, а как важный признак конституции нервной системы. По определению Л. Н. Гумилева пассионарность обитает в сфере эмоций, в отличие от активности, связанной с деятельностью сознания.

¹¹ Гумилев Лев Николаевич (1912 – 1992) — философ, историк, географ. Сын известных русских поэтов Н. С. Гумилева (расстрелян в 1921 г.) и А. А. Ахматовой. Подвергался репрессиям в 1930 – 1950 гг. Создатель учения о человечестве и этносах как биосоциальных сущностях

Причем пассионариев могут характеризовать весьма далекие от идеальных качества: амбициозность, гордость, тщеславие, алчность и пр.

Пассионарность — это характерологическая доминанта, необходимое внутреннее стремление (осознанное или чаще неосознанное) к деятельности, направленное на осуществление какой-либо цели (чаще иллюзорной, т. е. псевдопроблемы). Эта цель представляется пассионарной особи ценнее даже собственной жизни и счастья современников и соплеменников.

Наложение друг на друга несовместимых мироощущений этносов, ассимиляция разнохарактерных поведенческих стереотипов, негармоничное сочетание двух — трех элементарных психотипов рождает такое явление, как «химера» (в биологии это особая форма клеток, возникающая в результате прививок). По выражению Гумилева, «идеологические концепции, порождаемые химерами, наподобие вампиров, «сосут кровь» из здоровых этносов». Дальнейшее взаимодействие «химер» с этносом приводит в итоге к аннигиляции, т. е. к взрыву и превращению псевдопроблемы в ничто («вспышка и пепел»).

Тем не менее, пассионарность, в целом, не может повлиять на научное и социальное развитие общества. Да и как может эмоция изменить что-либо в стихии сознания-разума?

Следующий критерий научности — *опытная подтверждаемость* (верификация, валидация) — фиксирует чистые данные опыта и направлена на установление реальных свойств и характеристик объекта на основе эмпирической проверки.

Принцип опытной подтверждаемости стремится оградить научную методологию от не имеющих позитивного смысла субъективных утверждений и доктрин. По этой причине носители псевдопроблем (см. выше), как правило, игнорируют указанный критерий научности.

Рациональность в познании предполагает построение схем деятельности, связанных с целесообразностью и общезначимостью. Родоначальник рационализма математик Рене Декарт (1596 – 1650), рассматривая принципы очевидности и достоверности, выдвигает четыре правила: принимать за истинное только то, что не дает никакого повода к сомнению; разлагать сложные проблемы на простые компоненты; располагать простые элементы в строгой последовательности; составлять полные перечни и обзоры имеющихся элементов, чтобы была уверенность в отсутствии допущений.

Принцип *воспроизводимости* определяет идентичность результатов экспериментальных наблюдений разными субъектами при одинаковых воздействиях как на одном и том же объекте, так и на других объектах того же класса.

Объективность методологии тесно связана с *интерсубъективностью* и

общезначимостью. Интерсубъективность — это особая общность между познающими субъектами, условие передачи знания, значимость опыта одного субъекта для другого.

Общезначимость фиксирует гносеологический смысл единодушного восприятия научной информации, а также претендует, чтобы знания были общими для всех, и активно использует конвенции-соглашения.

Согласно сформулированному Аристотелем (384 – 322 до н. э.) закону *формальной непротиворечивости* невозможно, чтобы одно и то же свойство, в одно и то же время, и было присуще, и не было присуще одному и тому же объекту в одном и том же отношении. Логическая версия этого закона гласит, что противоположные высказывания не могут быть истинными.

Критерий научности — *когерентность* обеспечивает согласованность, взаимосвязанность полученных исследовательских результатов с теми знаниями, которые уже были оценены как фундаментальные. Тем самым когерентность обеспечивает сохранность науки от проникновения в нее претенциозных, не имеющих достаточных оснований суждений и положений.

В общий реестр критериев научного познания входят такие понятия, как *строгость, полнота, простота, достоверность, обоснованность, доказательность* и др.

Понятие научной *строгости* входит в состав критерия объективности и является условием, предполагающим, что все положения научной дисциплины должны быть обоснованными и логически соотнесенными.

Требования *полноты* включают в себя семантическую и синтаксическую полноту, как норму всестороннего описания действительности.

Принцип *простоты* имеет как онтологическое (гармония и завершенность, объективно присущие природе), так и синтаксическое и прагматическое обоснование.

Понятие синтаксической простоты задается представлением оптимальности и удобства применяемой символики, способов кодирования, трансляции знания, что особенно важно в программном обеспечении технических средств обучения. Из всех теорий (моделей), трактующих одни и те же факты, выбирается наиболее простая. Понятие прагматической простоты касается представления о простоте экспериментальных, технических, алгоритмических аспектов научной деятельности. «Темные понятия» и неоправданно усложненные построения свидетельствуют о неудовлетворительности теории (модели объекта).

В настоящее время считается, что невозможно ограничить реестр критериев научности. Развитие науки и методологии познания приводит к дополнениям современных критериев науки, к которым, например, относят

прогрессизм, нетривиальность, полифундаментализм, информативность, эвристичность и т. д.

И, тем не менее, применение всех ранее перечисленных, известных критериев науки при разработке современной методологии создания адекватных моделей энергообъектов и при определении номинальных требований нормативных документов позволит выработать объективный и правомерный подход как к собственно системе обучения, так и к разработке тренажеров для качественной подготовки оперативного персонала, что авторы и попытались сделать в данной монографии.

Конечного пользователя тренажерной продукции *не интересует* исходная система уравнений, описывающая энергообъект, и, тем более *метод ее решения*. Пользователь принимает *сертифицированное* техническое устройство и проверяет его по заранее оговоренному регламенту. Цель пользователя тренажерной продукции состоит в обеспечении *гарантированной* успешной работы человеко-машинной системы, связанной с качественной и количественной адекватностью модели объекту-прототипу.

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

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

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

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

Литература

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. Брокгауз Ф. А., Ефрон И. А. Энциклопедический словарь в 82-х томах. СПб. 1901 г.
5. Русский энциклопедический словарь. М., 1990 г.
6. The New Encyclopaedia Britannica. 35 vol. Chic., 1977.
7. Тренажерные системы / В. Е. Шукшунов, Ю. А. Бакулов, В. Н. Григоренко и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 256 с.
8. К истории отечественной авиационной психологии / Под. ред. К. К. Платонова – М. Наука, 1981 – 318 с.
9. История США, в 4-х томах // АН СССР, Москва, 1985.
10. EPRI NDE Center Training. Courses, Materials & Services. Charlotte, NC, 2003.
11. U.S. Department of Education // Center for Education Statistics, Wash. 2004.
12. ANSI/ISA-77.20-1993. Formerly ANSI/ISA-S77.20-199. Fossil Fuel Power Plant Simulators – Functional Requirements.
13. World economic and social survey / UN, N.-Y., 2003.
14. World economic outlook // IMF, N.-Y., 2002.
15. Веников В. А., Гусейнов А. Ф., Суханов О. А. Функциональное представление подсистем в кибернетическом моделировании // Тр. семинара. Кибернетика электроэнергетических систем. Брянск: 1974. Вып.2.
16. 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.
17. Нюберг Н. Д. О познавательных возможностях моделирования. В кн.: Математическое моделирование жизненных процессов. М.: Мысль, 1968.
18. Изоморфизм. Философская энциклопедия. Т. 2. М., 1962.
19. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
20. Магид С. И. Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. – М.: Издательство ЭИИ, 1998. 156 с.
21. Растринин Л. А., Маджаров Н. Е. Введение в идентификацию объектов управления. М.: Энергия, 1977. 216 с.
22. Терно О. Р. Гибридные функции – метод описания сложных систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1965. №6.
23. 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.
24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

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

29. 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.

30. 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.

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

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

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

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

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

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

37. 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.

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

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

40. Магид С. И., Долгоносков 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.

41. Магид С. И., Долгоносов 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.

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

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

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

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

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

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

48. Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 434 с.

Содержание

Введение. Человеческий фактор и надежность электроэнергетики	7
Глава 1. Краткая история развития зарубежной и отечественной тренажерной техники	
1.1. Терминология	12
1.2. Авиационные тренажеры	12
1.3. Тренажеры в промышленности США	14
1.4. Тренажеры в отечественной энергетике. Родоначальники и исполнители «тренажерного проекта»	23
Глава 2. Методика построения системы оперативных (тренажерных) логико-динамических моделей оборудования и процессов энергетических объектов	
2.1. Основные принципы и подходы к моделированию энергообъектов	28
2.2. Методология имитационного моделирования энергетических объектов	32
2.3. Анализ и содержание этапов разработки системы оперативных тренажерных моделей	48
Глава 3. Новая системно-имитационная методология и современные научно-технические требования при моделировании энергетических распределенных систем для тренажеров эксплуатационного персонала энергетических объектов	
3.1. Проблемы, состояние моделирования, структура и сущность современных моделей энергообъектов	76
3.2. Современные требования новой методологии при разработке моделей энергетических систем	78
3.3. Требования к современной интегрированной системе обучения оперативного и обслуживающего персонала электроэнергетики. Цели и структура системы обучения	89
3.4. Требования к современным тренажерам и автоматизированным учебным курсам (АУК) для подготовки персонала энергетике. Эффективность тренажерной подготовки	90
3.5. Современная реализация технических средств обучения (ТСО) на объектах генерации РФ	94
Глава 4. Нормативно-правовое обеспечение средств тренажерной подготовки персонала предприятий электроэнергетики	
4.1. Первые нормативные документы СССР, регламентирующие требования к техническим средствам обучения персонала электроэнергетики	100
4.2. Технические условия для сертификации прикладных программных средств тренажеров тепловых электростанций и сетей	105
4.3. Цели и задачи разработки новой нормативной базы. Назначение и область применения	114
4.4. О необходимости нормативной оценки эффективности и качества тренажерной техники	116
4.5. Характеристики качества технических средств обучения	119
4.6. Краткое описание критериев индекса уровня качества тренажера	122
4.7. Вероятностно-статистический подход к оценке качества и эффективности динамических моделей энергообъектов для тренажеров оперативного персонала	130
Заключение	141
О критериях научности. Вместо послесловия	149
Литература	155

Научное издание
МАГИД С. И., АРХИПОВА Е. Н.

**Тренажерная подготовка персонала энергетики.
История. Состояние. Нормы.**

Редактор — Чижов В. В.
Художественный редактор: — Маланьин Д. Б.
Подписано в печать 28.11.2017 г. Отпечатано в ООО «Паритет».
Издательство «Энергобезопасность»
Москва 2017

Магид Сергей Игнатьевич — генеральный директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей»,
доктор технических наук, профессор,
действительный член Академии Промышленной Экологии,
директор Департамента TEST UNESCO «Технические обучающие системы в энергетических технологиях»,
главный редактор научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики»,
Заслуженный энергетик Российской Федерации,
Заслуженный энергетик Республики Казахстан.

Архипова Елена Николаевна — исполнительный директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей»,
доктор технических наук,
заместитель главного редактора научно-технического журнала «Надежность и безопасность энергетики»
Заслуженный энергетик Российской Федерации.

ISBN 978-5-600-02001-6

9 785600 020016

Издательство «Энергобезопасность»