

Тренажер на АЭС Серри в шт. Виргиния.
(Предоставлено: INPO.)



Техника моделирования в обучении операторов

*Полномасштабные
тренажеры
для конкретных
реакторов являются
частью новой
реальности*

Томас Перкинс

В конце 60-х и в начале 70-х годов ядерная энергетическая промышленность Соединенных Штатов взяла на себя обязательства, связанные с обучением операторов атомных электростанций на тренажерах. В течение этого периода все четыре американские фирмы, поставляющие атомные электростанции, открыли свои собственные центры обучения, причем каждый из центров имеет свой собственный полномасштабный тренажер. Операторы АЭС, работающие в разных странах мира, прошли обучение по эксплуатации атомных электростанций на общих курсах этих центров. Обучение в соответствии с особенностями отдельных конкретных АЭС осуществлялось сразу же по возвращении на свои станции.

К концу 1978 г. использование тренажеров при обучении операторов АЭС получило признание во всем мире. Центры обучения были открыты в Канаде, Франции, ФРГ, Японии, Испании, Швеции,

Г-н Перкинс является управляющим по международным вопросам, Link Simulation Systems, Division of the Singer Company, Silver Spring, Maryland.

© 1985, The Singer Company, Link Simulation Systems Division. За разрешением на перепечатку всей статьи или ее части обращаться в адрес фирмы.

Великобритании, а также на Тайване. Американский национальный стандарт для тренажеров, используемых при обучении и подготовке операторов АЭС, впервые принятый в 1977 г., установил минимальные требования к таким тренажерам. Ранее обучение операторов было сосредоточено, в основном, на изучении обычных рабочих процедур и рассмотрении сценариев невероятных катастрофических аварий. Ядерная промышленность гарантировала, что меры по безопасности, предусмотренные на ядерных реакторах и в системах управления и защиты, дают уверенность, что „серьезные аварии не могут иметь места”.

28 марта 1979 г. на втором блоке АЭС Три Майл Айлэнд в Миддлтауне, шт. Пенсильвания, произошла крупная авария. Эта авария привела к критической оценке готовности эксплуатационного персонала на случай аварии. Выводы, сделанные после аварии комиссией Кемени, и другие рекомендации, касающиеся тренажеров для АЭС, оказали существенное влияние на подход ядерной промышленности к обучению операторов.

Обычно считают, что аварии на реакторе Три Майл Айлэнд могло бы не быть, если бы операторы были подготовлены соответствующим образом, а

обучение только на тренажерах не позволило избежать аварии.

Проще говоря, существующие тренажеры не были запрограммированы на моделирование такого необычного режима реактора, когда происходит утечка большей части теплоносителя первого контура. Эта авария ускорила проведение полной переоценки программы обучения операторов для ядерной промышленности.

Понимание сложности процессов, требований, предъявляемых к операторам, и значения обучения приводят к созданию всеобъемлющих программ обучения, осуществляемых промышленностью и правительственными организациями. Традиционный путь производственного обучения не может больше рассматриваться как достаточный при обучении операторов АЭС. Старый подход — „тренируй руки, а не сообразительность” уступил место интегрированному, систематическому, основанному на практической деятельности подходу к подготовке персонала АЭС.

Сложность современных атомных станций требует, чтобы тренажер для АЭС был основным средством, используемым компетентным инструктором для обучения и оценки способности оператора работать в нормальных и аномальных условиях реальной установки. Однако наличие полномасштабного тренажера для конкретного реактора является только одним компонентом эффективной программы обучения. Современные интегрированные программы включают обучение теоретическим основам и принципам эксплуатации, а также обучение непосредственно на тренажере. Основной упор делается на нормальную эксплуатацию, наиболее вероятные аварии и взаимодействие человека с машиной.

Тренажеры после аварии на реакторе Три Майл Айленд

Полномасштабный тренажер для конкретной АЭС представляет собой точную копию блочного щита управления станции и панели для инструктора, приводимых в действие большой цифровой ЭВМ. Компьютерные программы являются математическим представлением физических явлений в реакторе и передаточных функций систем управления и защиты.

Это определение сохраняется в силе с начала 1979 г. вплоть до настоящего времени. Основным отличием существующих тренажеров от тренажеров конца 70-х годов является достоверность и точность моделирования, достоверность — в отношении развития обычных и аномальных событий на установке, и точность — в отношении требований к допускам для стационарного и переходного режимов. (Достоверность — степень сходства с имитируемой установкой).

В следующих разделах описаны некоторые характерные особенности современного полномасштабного тренажера для конкретной установки.

Блочный щит управления

Обычно полномасштабный тренажер включает точную и полную копию всего оборудования основного блочного щита управления АЭС. Полнота воспроизведения зависит от индивидуальных требований заказчика. Некоторые электроэнергетические фирмы требуют, чтобы точная копия включала все задние панели, световую индикацию (включая эффекты уменьшения силы света, связанные с запуском мощных моторов), настилку полов и даже звуковые эффекты (шум турбины, сбросы пара и т.п.), связанные с открыванием дверей блочного щита управления. Другие требуют воспроизведения только передних панелей, причем иногда не в полном объеме.

В конце 70-х годов обычный тренажер имел отношение ввод/вывод — показатель количества приборов блочного щита управления тренажера — в пределах от 6000 до 8000. Сегодня не является необычным отношение от 16000 до 20000. Помимо консолей основного пульта управления также создается копия панели дистанционного аварийного останова реактора, располагающаяся в отдельном помещении.

В оборудование основного блочного щита управления входят также интегрированные системы управления производственными процессами на АЭС с помощью ЭВМ и системы визуального вывода данных (дисплей) по параметрам безопасности. Тщательной разработке системы визуального вывода данных уделяется все больше и больше внимания, чрезвычайно важное значение приобретает ознакомление операторов с одновременным визуальным выводом информации на ЭЛТ и на обычных приборах.

Благодаря такому широкому использованию систем визуального отображения точность и достоверность могут достигать в настоящее время такого уровня, какого ранее никогда не было в распоряжении обучающегося. Эти новые требования к точности и достоверности приводят к увеличению времени поставки современных тренажеров и, следовательно, значительно повышают их стоимость.

В настоящее время ведутся исследования, направленные на определение того, что действительно необходимо для эффективной подготовки операторов. Действительно ли требуется изучать на тренажере работу систем, необходимых для вспомогательных операций на АЭС, а также осуществлять наблюдение на долгосрочной основе? Каковы требования к подготовке оператора АЭС и какой другой персонал АЭС может обучаться на данном тренажере? На эти вопросы должна ответить каждая организация, намеревающаяся приобрести полномасштабный тренажер.

Вопрос, связанный с объемом моделирования, точностью и достоверностью, должен быть оценен при выборе наиболее экономичного решения для обеспечения эффективной подготовки операторов.

При принятии этого решения важно не забывать об основном назначении тренажера, используемого для обучения: предоставление достаточной информации обучающемуся для того, чтобы он мог определить — работает ли установка в нормальном или аномальном режиме, а также предоставить оператору возможность влиять на производственный процесс и наблюдать реакцию этого процесса на его действия, связанные с управлением, или на его бездействие.

Панель инструктора

С увеличением сложности тренажера, используемого для обучения, все более и более сложной становится роль инструктора как руководителя процесса обучения. Инструктор обязан легко и быстро справляться с введением неисправностей, с дополнительными функциями оператора, создавать различные рабочие ситуации и, главным образом, контролировать всю деятельность обучающегося. Для выполнения этих задач панель инструктора, как правило, оборудована цветными дисплеями с высоким разрешением и большими экранами, конструкция которых удобна для инструктора. Это позволяет инструктору быстро выполнять свою основную задачу по составлению плана обучения.

Использование экономичных по времени программируемых функциональных ключей, выбор функций по курсору и ввод данных с помощью микродрайва — позволяют инструктору расходовать больше времени на выполнение своей основной задачи — обучения.

Обычно с панели инструктора можно осуществлять следующие операции:

- Инициировать заранее определенное состояние;
- Приостанавливать все расчеты;
- Вводить неисправности (мгновенные или логические);
- Осуществлять дополнительные функции операторов;
- Возвращаться к более ранним моментам обучения;
- Контролировать работу обучающегося;
- Зашкаливать или выводить из строя приборы пульта управления;
- Подавать сигналы ложной тревоги;
- Ускорять или замедлять действия;
- Выполнять программу обучения с помощью компьютера;
- Контролировать условия окружающей среды и других внешних параметров.

В дополнение к панели инструктора имеется ручное устройство дистанционного управления, используемое инструктором, когда он находится рядом с обучающимся. Это устройство позволяет инструктору управлять процессом обучения, наблюдая за обучающимся, находясь непосредственно рядом с ним за пультом управления.

Модели системы первичного контура

Спецификации на тренажеры, разработанные после аварии на реакторе Три Майл Айленд, содержат четко определенные требования к двухфазному потоку и связанным с ним процессам теплопередачи. Все крупные фирмы-изготовители тренажеров начали осуществлять программы разработок, точно отвечающие этим требованиям, и в настоящее время уже существует новое поколение усовершенствованных тренажеров для использования при обучении операторов АЭС.

Например, усовершенствованная программа Линка для активной зоны и термогидравлики в реальном масштабе времени (RETACT) используется как основа усовершенствованных моделей тренажеров АЭС. Она обеспечивает предсказывающую способность термогидравлической программы в дополнение к эксплуатационной способности тренажера, используемого для обучения. Отдельный дисплей, расположенный рядом с панелью инструктора, также обеспечивает динамичную информацию по всем параметрам, необходимым для глубокой диагностики способности реактора передавать энергию от теплоносителя к турбине или другим потребителям энергии. Данная модель разработана с учетом физических законов и использованием основных уравнений, находящихся на том же уровне, что и самые лучшие программы для анализа безопасности. Можно сказать, что эти результаты являются наилучшими оценочными результатами. Предсказывающая способность, которой обладают эти усовершенствованные модели, позволяет проводить обучение операторов на высоком и реалистичном уровне, никогда не достигавшемся ранее.

Основные фирмы-изготовители тренажеров в настоящее время демонстрируют потенциальным заказчикам созданные ими усовершенствованные математические программы, а в Европе и Соединенных Штатах Америки уже проектируются несколько тренажеров, использующих эти программы.

База данных по конструкциям и будущие модификации

Достоверность конструкции моделей систем АЭС непосредственно зависит от качества базы данных по конструкциям. Составление этой базы данных и ее поддержание представляют собой задачу, требующую большого количества времени как для энергопроизводящей компании, так и для компании, изготавливающей тренажер. Эта база данных по конструкциям должна быть хорошо определена, а владельцам тренажеров необходимо поддерживать точную и современную базу данных по конкретной установке. При внесении изменений в конкретную установку каждое изменение должно быть оценено и внесено соответствующее изменение в тренажер. В свою очередь, базу данных по кон-

струкции тренажера необходимо обновлять, отражая современное состояние тренажера. Таким образом, система контроля за отклонениями от первоначального проекта, использующая вычислительную технику, является необходимым требованием для большинства тренажеров, изготавливаемых в настоящее время.

На всех фазах осуществления проекта владелец тренажера и его изготовитель должны работать в тесном контакте по сбору и учету всех возможных для применения данных по имитируемой установке. При возможности данные по эксплуатации реальной установки, включая данные по переходным процессам во время аварии и при возникновении непредвиденных случаев, используются в первоначальной конструкции. Если тренажер проектируется до или параллельно проектированию АЭС, тогда тренажер должен быть окончательно доведен после ввода АЭС в эксплуатацию. Эта доводка обычно осуществляется персоналом, связанным с математическим обеспечением, работающим у владельца тренажера, или же фирмой-изготовителем тренажера по отдельному соглашению.

Эти усилия по доводке и будущая модификация математических моделей должны быть облегчены с точки зрения понимания моделей и их усовершенствования без изменения остальной части математического обеспечения. Для выполнения этого математические модели для всех различных систем должны быть в виде модулей с минимальным сопряжением между моделями. Подход типа „сверху вниз” к проектированию моделирования систем, — где один модуль управления требует одного или более сегментов программы, что в свою очередь требует использования различных компонентов и подпрограмм, — позволяет облегчить проведение будущей модификации.

Благодаря модульному характеру современной конструкции и средствам математического обеспечения, поставляемым вместе с тренажером, большинство владельцев тренажеров в состоянии внести большую часть изменений, не прибегая к помощи первоначального изготовителя.

Компьютерная система

Понятие „компьютерная система” включает все необходимое оборудование и математическое обеспечение для использования тренажера и его нормальной эксплуатации. Сюда относятся все соединения (интерфейс ввода/вывода) с аппаратурой блочно-цифрового управления.

Большинство фирм-изготовителей тренажеров во всем мире в настоящее время предлагают вычислительные машины серии 32 фирмы Гоулд компьютер систем дивизиона. Вычислительный комплекс обязан обеспечить достаточную скорость вычислений, объем памяти и гибкость программирования для того, чтобы достичь уровня работы, требуемого от тренажера.

Как правило, данная система должна обеспечивать выполнение следующих операций:

- Управлять процессом обучения;
- Реалистично отражать действия обучающегося оператора по управлению в реальном масштабе времени;
- Обеспечивать управление всеми периферийными устройствами ЭВМ и выполняемыми функциями;
- Обеспечивать достаточную длину цифровых кодов для отражения установленных точностей;
- Обеспечивать достаточные скорости передач ввод/вывод и скорости итераций математических моделей с тем, чтобы реакции тренажера, наблюдаемые на пульте управления, не очень отличались от реакций реальной АЭС;
- Поддерживать техническое обслуживание системы математического обеспечения и деятельность, связанную с модификацией программ, посредством применения соответствующих языковых процессоров и вспомогательной программы;
- Поддерживать вспомогательные функции, осуществляемые одновременно с работой тренажера, в зависимости только от имеющихся ресурсов и времени;
- Обеспечивать достаточный запас времени и объем памяти (или способности к расширению) с целью осуществления будущих модификаций.

Типичный вычислительный комплекс фирмы Гоулд как минимум включает: двухпроцессорный компьютер серии 32/97, построчно-печатающее устройство; терминалы визуального отображения на ЭЛТ; приводные устройства диска 300-MB; блоки с магнитной лентой 75-IPS и устройство 1000-CPM для считывания с перфокарты.

Развитие вычислительной техники происходит настолько быстро, что очень часто ко времени доставки тренажера его компьютер уже отстает, по крайней мере, на целое поколение от имеющихся в это время лучших образцов. Поэтому портативность математического обеспечения стала чрезвычайно важной частью конструкции тренажера. В настоящее время при проектировании портативной системы повышенное внимание привлекают следующие несколько областей: использование эксплуатационного программного обеспечения разработчика без изменений, программирование полностью на языке высокого уровня и использование структурной конструкции и программирования.

Нарушения нормальной работы

Нарушения нормальной работы определяются как выход из строя или ухудшение работы компонентов АЭС, и они могут быть разделены на 2 категории: общие нарушения и нарушения работы, специфические для каждой системы. Общие нарушения нормальной работы могут охватывать большинство компонентов АЭС, таких как насосы, клапаны, теплообменники, регуляторы и т.д.; к специфическим нарушениям относятся течь твэлов,



Тренажеры представляют собой подлинные модели конкретного блочного щита управления. На фото показаны системы для АЭС Саскуэханна, США (вверху) и для АЭС Брюс-Б с реакторами типа КАНДУ фирмы Онтарิโอ хайдро, Канада. (Предоставлены: верхнее фото — Link SSD; нижнее фото — CAE Electronics Ltd.)



От самолетов до энергетических установок и далее

Разработка современных сложных тренажеров для обучения операторов АЭС базируется на более чем 50-летнем опыте, накопленном технологией обучения в космической промышленности.

За вторую половину нашего столетия технология обучения полету продвинулась от механических тренажеров для пилота до сложных систем с использованием вычислительной техники, имитирующих космические полеты. Например, прежде чем американский космический корабль многоцелевого назначения „Колумбия“ осуществил свою первую рабочую миссию в конце 1982 г., команда и вспомогательный персонал использовали тренажеры.

Так же, как при разработке современных тренажеров для АЭС был использован их собственный, накопленный в прошлом, опыт, так и эти тренажеры прокладывают путь для многих других типов устройств для обучения операторов в электроэнергетической и других отраслях промышленности.

Электростанции, работающие на ископаемом топливе, уже с 1977 г. используют для обучения операторов сложные полномасштабные тренажеры. Сейчас они имеются в разных странах, включая Австралию,

Федеративную Республику Германии, Индию, Индонезию, Южную Корею, Саудовскую Аравию, Южную Африку, США, а также Тайвань. В других странах используются иные типы тренажеров.

Обрабатывающие отрасли промышленности одни из самых последних стали использовать тренажеры для обучения операторов. Использование технологии имитирования управления в этих отраслях промышленности вышло за пределы области обучения операторов установки. В настоящее время технология имитирования при обучении в реальном масштабе времени доказывает, что является экономически выгодным средством при проектировании установок высокой сложности. Например, достоверность моделирования обеспечивает лучшее понимание процессов, позволяя владельцу осуществлять модификацию конструкции установки и вносить изменения в механизм управления технологическим процессом раньше или параллельно со строительством реальной установки и пусковым этапом. В некоторых случаях экономия на стоимости оборудования и экономия времени, необходимого для пуска установки, значительно покрывают затраты на тренажер.

Опыт, накопленный при моделировании ядерных установок, помог разработать системы тренажеров для других отраслей промышленности, как, например, показанная на фото — для газоперерабатывающего завода (Предоставлено: Link SSD.)



течь в трубах конденсатора, разрыв трубопровода и т.д.

Американский национальный стандарт для тренажеров АЭС, используемых при обучении операторов, требует введения как минимум 75 нарушений нормальной работы для демонстрации реакции АЭС и функционирования автоматических систем управления. Кроме того, в соответствии со стандартом достоверность моделирования должна позволять оператору осуществлять действия, смягчающие последствия неисправностей вплоть до приведения АЭС в приемлемые рабочие условия. Современные тренажеры далеко превосходят эти минимальные требования и имеют возможность продемонстрировать выход из строя почти любого компонента станции, что в сумме составляет несколько сотен нарушений нормальной работы. Эти общие и специфические нарушения совместно со способностью инструктора вывести из строя любой компонент оборудования пульта управления ведут к настоящему изобилию сценариев неисправностей.

Совместное изделие

Подводя итоги, можно сказать, что типичный полномасштабный тренажер для конкретной АЭС, изготавливаемый в настоящее время, действительно является совместным изделием владельцев тренажера и его изготовителей. Начиная с первоначальных усилий по сбору данных и до проведения окончательных проверочных испытаний возникают тесные рабочие взаимоотношения и дух сотрудничества. Все возрастающая сложность тренажеров требует этих тесных взаимоотношений и это сотрудничество в значительной степени проявляется в качестве конечного продукта.

Мы не должны упускать из вида то, что реальное назначение тренажера, как и других обучающих устройств — от тренажеров с частичными задачами и до полномасштабных тренажеров для конкретных установок, — может быть лучше всего использовано в интегрированной программе обучения.

Тенденции в моделировании ядерных установок

В ядерной промышленности первые два тренажера для реальных ядерных установок были построены в 1957 г. почти одновременно. Первый тренажер, построенный в Англии, предназначался для обучения операторов магноксового реактора Колдер Холл. Вторым был тренажер для атомного торгового судна Саванна. Оба эти тренажера можно считать полномасштабными тренажерами, так как каждый достоверно моделировал блочный щит управления реальной установки. Действительно, тренажер Саванны можно было использовать при проведении инженерных исследований систем корабельного двигателя.

Диапазон современных тренажеров изменяется от моделей, обучающих общим принципам, до полномасштабных тренажеров для конкретных установок, обеспечивающих полный набор устройств для обучения как студентов, не имеющих практического опыта работы, так и операторов, имеющих многолетний опыт практической работы.

Тренажеры, обучающие общим принципам, учат пониманию основных причинно-следственных связей между различными системами атомных электростанций. Становится общепризнанным тот факт, что начальное обучение операторов и вспомогательного персонала наилучшим образом может быть осуществлено как раз с помощью этого типа тренажера. Процесс изучения концепций, лежащих в основе работы ядерной установки, для не имеющего опыта обучающегося проходит легче, когда его не подавляют многочисленные детали подлинного пульта управления. После усвоения основных принципов и приобретения фундаментальных эксплуатационных навыков оператор может с уверенностью переходить к обучению на тренажере, являющемся точной копией пульта управления.

Полномасштабный тренажер конкретной установки представляет собой точную копию пульта управления этой установки. Достоверность моделирования систем установки находится на таком уровне, что опытный оператор не должен обнаружить какое-либо отличие в работе тренажера от работы истинной установки. Точность моделирования хорошо определяется посредством критических параметров и четко установленных связанных допусков.

Между этими двумя типами тренажеров находится целый спектр устройств для обучения операторов ядерных установок и вспомогательного персонала.

Использование тренажеров

Согласно данным МАГАТЭ концептуальное моделирование, основанное на применении небольших мини-компьютеров, не отражающих поведение систем во всех подробностях, становится новым средством обучения. В настоящее время используется около дюжины таких тренажеров.

Несомненно существует растущая тенденция использования тренажеров для конкретных установок. По оценке МАГАТЭ во всем мире в настоящее время используется для обучения или строится около 100 полномасштабных тренажеров для конкретных АЭС.

В Чехословакии в учебном центре института ядерных энергетических исследований используется тренажер для реактора ВВЭР-440 отечественного производства. Он является одним из самых усовершенствованных тренажеров в странах-членах Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ) и позволяет проводить моделирование нормальной эксплуатации, ожидаемых событий и аварийных условий.

Один из самых сложных в мире тренажеров для АЭС введен в эксплуатацию в учебном центре в Великобритании. Тренажер разработан для усовершенствованных реакторов с газовым охлаждением Хантерстон Б. В нем используются 52 микрокомпьютера, работающих в режиме параллельной обработки информации с объединенной памятью прямого доступа объемом более 10 мегабайт.

Завершена также работа над французским многоцелевым тренажером для функционального анализа, который может моделировать нормальную эксплуатацию и сложные аварийные сценарии в реальном масштабе времени. Он может быть использован для проектирования систем АЭС и разработки рабочих процедур, однако его основным свойством является возможность моделирования аварий.

Влияние аварий на работу всей АЭС показано вместе с несколькими возможными путями действий.

Несмотря на то, что тренажеры традиционно использовались для обучения персонала и разработки рабочих процедур, они также могут быть ценным пособием при проведении исследований. Это было продемонстрировано при оценке усовершенствованной системы визуального отображения параметров безопасности для атомной электростанции Ловиза в Финляндии.