

Человеческий фактор в эксплуатации атомных электростанций

Улучшение взаимодействия „человек – машина“

Э. Сватон, В. Небойян и Л. Ледерман

При эксплуатации крупных и сложных интерактивных систем ошибка оператора может стать причиной выхода их из строя. Опыт эксплуатации атомных электростанций показывает, что на ошибки персонала приходится значительная часть инцидентов, связанных с безопасностью. Однако этот опыт свидетельствует о том, что вмешательство человека может быть очень эффективным, если оно основывается на доскональном знании ситуации, сложившейся на АЭС. Таким образом, эффективное взаимодействие „человек – машина“ играет важную роль не только в предупреждении ошибок персонала, но и помогает оператору в непредвиденной ситуации.

Надежность человека как элемента системы можно рассматривать с качественной и с количественной стороны. В первом случае речь идет об успешном выполнении персоналом своих обязанностей, обеспечивающих безопасную работу и готовность системы. С количественной точки зрения она имеет отношение к данным об интенсивности отказов или вероятности ошибок, которые можно, например, использовать в вероятных оценках безопасности (ВОБ).

Обучение и подготовка

Квалифицированный персонал играет главную роль в обеспечении безопасной и надежной эксплуатации атомной электростанции. Для поддержания квалификации на требуемом уровне необходимо осуществлять непрерывное обучение персонала; сюда входят: первоначальная подготовка, переподготовка, совершенствование и расширение знаний и профессионального мастерства. Во всех странах в зависимости от национальных условий созданы свои собственные системы обучения, однако персонал АЭС должен обладать определенными профессиональными навыками, общими для всех стран, так как в деле обеспечения безопасной и надежной эксплуатации атомной электростанции не может быть компромиссов. Следовательно, программа подготовки персонала предприятий ядерной энергетике в любой стране должна га-

рантировать достижение одинакового уровня подготовки.

В частности, одним из основных квалификационных требований в будущем станет приспособляемость, т. е. способность справляться с нестандартными ситуациями. Сотрудник должен обнаружить отклонение, проанализировать его и сформулировать задачу и, если потребуется, принять решение о необходимости и путях его устранения.

Если обучение, в основном, связано с формальными занятиями и непрерывным повышением компетентности, то в процессе подготовки основное внимание фокусируется на задачах по совершенствованию конкретных профессиональных навыков. В дополнение к подготовке, проводимой в учебных классах и на рабочих местах, особое внимание привлекло использование в этих целях тренажеров. В большинстве стран, имеющих АЭС, действуют, как правило, хорошо отлаженные программы подготовки персонала на тренажерах. Однако „возраст“, тип, размер и возможности тренажера могут ограничивать ее ценность. Тем не менее, подготовка и переподготовка персонала на тренажерах незаменимы для повышения эксплуатационной безопасности станции, знаний и мастерства персонала, необходимых для управления АЭС в нормальных и аварийных режимах. Более того, преимущества подготовки на тренажерах можно рассматривать в двух аспектах. С точки зрения ВОБ полученный опыт подготовки на тренажерах можно использовать для выбора сценариев подготовки, а также для совершенствования и улучшения процедур ВОБ. Второй аспект связан с возможностью оценки модификаций АЭС с точки зрения человеческого фактора. К их числу относится новое оборудование, правильность и целесообразность процедур эксплуатации АЭС в нормальных и аварийных режимах, а также корректировка и совершенствование программ подготовки.

Подготовка на тренажерах

Используемые в течение многих лет в качестве одного из основных средств подготовки операторов АЭС полномасштабные тренажеры превратились в очень сложные установки. Сейчас мы можем исполь-

Г-жа Сватон, г-н Небойян и г-н Ледерман являются штатными сотрудниками Департамента ядерной энергии и безопасности.



Вверху: Пульт управления АЭС Бецнау-1 в Швейцарии

Внизу: Инспекция реакторного оборудования во Франции (Фото: French Nuclear Newsletter, 1986)



зовать сценарии подготовки, о которых еще пять лет назад не могло быть и речи. А как мы распорядимся компьютерными мощностями, которые у нас будут еще через пять лет? С одной стороны, ряд специалистов считает, что для расширения масштабов подготовки необходимы более высокие компьютерные мощности. Однако доминирует мнение, что имеющихся компьютерных мощностей достаточно для того, чтобы справиться с этой задачей. В то же время, очевидно стремление к созданию тренажеров с повышенной точностью моделирования. В течение последних пяти лет основной упор делался на достижение высокой точности моделирования активной зоны и системы теплоносителя реактора. Вопрос о том, насколько оправдано дальнейшее повышение точности моделирования, требует особого рассмотрения и анализа. Одно дело обеспечить более высокую точность, и другое, более важное, — определить необходимость этого шага в силу того, что существующие модели не обеспечивают достижения целей подготовки. Последнее совещание специалистов МАГАТЭ по учебным тренажерам для АЭС показало, что некоторые конструкторы выявили аспекты подготовки, которые оправдывают совершенствование моделей. Это хороший признак. Проектирование учебных тренажеров должно основываться на анализе целей обучения. В прошлом этого не было.

Полномасштабный тренажер — это мощный инструмент подготовки, однако, в силу своей сложности и высокой стоимости, его не всегда можно применять для удовлетворения всех потребностей подготовки. По имеющимся оценкам из 75–80 % общего объема подготовки на полномасштабный тренажер, моделирующий работу блочного щита управления (БЩУ), приходится лишь 25–30 %.

Для лучшего понимания работы определенных систем и процессов на АЭС или подготовки персонала к выполнению ограниченных функций используются „неполномасштабные” тренажеры в виде станционного анализатора, микротренажерной системы или „функционального” тренажера. В этих случаях главная задача заключается в формировании соответствующей „умозрительной” модели системы, которая позволяет продумать весь процесс ее эксплуатации, максимально используя и обрабатывая пространственную информацию. Хорошим примером служит применение полумасштабных моделей системы теплоносителя реактора с водой под давлением (PWR), называемых стеклянными моделями. Несмотря на то, что давления в этих моделях не являются характерными, такая подготовка играет важную роль, так как дает возможность непосредственно наблюдать термодинамические процессы.

Говоря о дальнейшем развитии тренажеров для подготовки персонала, необходимо отметить, что в настоящее время внимание сосредоточено на процессах осмысления — как мы изучаем и подходим к проблеме взаимодействия „человек — машина”, совершенствуя при этом свои знания о познавательных способностях человека, чтобы уменьшить нагрузку на оператора и повысить надежность его работы.

Анализ опыта тренажерной подготовки персонала к работе в аварийных ситуациях показал, что важные с точки зрения безопасности инциденты часто ставят операторов в ситуацию, когда события развиваются совершенно отлично от сценариев, отработанных на тренажере. Далее, в силу того, что аварийные условия — это редкое событие, возникают определенные трудности, связанные с прогнозированием и анализом поведения человека в этой ситуации. Однако общая польза и важность тренажерной подготовки персонала к работе в экстремальных условиях общепризнаны, особенно, если в сценариях аварийных ситуаций последовательность событий может начинаться на различных уровнях мощности реактора, а их имитация осуществляется до достижения условий разрушения активной зоны. Более того, если стажер в определенной ситуации допускает ошибку, процесс моделирования можно прервать, указать ему на ошибку и обсудить ее. Затем можно возобновить программу, установив, таким образом, ценную обратную связь между инструктором и стажером. Для систематического анализа данные можно собирать с помощью автоматической системы, контролирующей действия стажера, или схемы, информирующей инструктора об ошибках. При проведении ВОБ все чаще используются данные о поведении человека, собранные в процессе тренажерной подготовки.

Сбор данных об ошибках персонала

Анализ аномальных событий и результаты ВОБ показывают, что во многих случаях их причиной являются ошибочные действия операторов. Основной источник информации о поведении/ошибках операторов — это опыт эксплуатации атомных электростанций. В дополнение к национальной практике направления отчетов о событиях, связанных с безопасностью, в регулирующие органы, существует несколько международных информационных систем. Информационная система об инцидентах на АЭС Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (NEA/OECD) собирает данные о типичных примерах аварийных ситуаций в Западной Европе, Канаде, Японии и США. Информационная система МАГАТЭ об инцидентах на АЭС (IAEA — IRS) в основном выполняет аналогичные функции, кроме того, в нее поступают отчеты из стран Восточной Европы и развивающихся государств. Другая система — Информационная система об аномальных событиях Объединенного исследовательского центра в Испре — получает информацию из некоторых национальных систем. Однако в этих информационных схемах данные об ошибках персонала не конкретизируются, поэтому для выделения информации о влиянии ошибок персонала на развитие аварии необходимо разработать соответствующие методы анализа. Пока еще немногие электроэнергетические компании приступили к созданию систем, анализирующих роль ошибок персонала в инцидентах.

Идентифицировано несколько общих ситуаций:

- Как правило, ошибки происходят во время проведения испытаний и технического обслуживания. Внедрение автоматически помогло бы решить некоторые проблемы.
- Персонал чаще всего допускает ошибки при эксплуатации систем с низким уровнем готовности или дублирования или с недостаточным уровнем автоматизации.
- Ошибки персонала в аномальных условиях чаще всего происходят после подачи аварийного сигнала.
- Одной из основных причин ошибок персонала является плохая конструкция (с точки зрения системной техники, компоновки БЩУ и принципов эргономики).

Передача информации во время пересменок персонала также часто приводит к ошибкам.

ВОБ дает ценную информацию для определения систем станции, взаимодействующих с человеком, для обобщения этих данных с точки зрения аналогичных задач или общих причин. Однако отсутствие реальных данных о поведении человека, особенно в аномальных условиях, как правило, накладывает определенные ограничения. В этой области ВОБ необходимо рассматривать скорее как индикатор потенциальных проблем во взаимодействии „человек — машина”, а не как средство прогнозирования поведения человека.

Информационная обратная связь

Анализ аварий в некоторой степени позволяет понять причины ошибок персонала. Оператор должен иметь обратную связь, весь вопрос лишь в том, как разработать критерии ее оценки.

При решении проблем, связанных с ошибками персонала и использованием эксплуатационного опыта, одни страны сосредоточили свое внимание на создании баз данных, другие — тренажеров. В этой ситуации может возникнуть вопрос: Каким образом опыт оператора можно сделать общим достоянием и как оценить разнообразные преимущества различных аспектов? Должны ли конструкторы разработать твердую стратегию? Исследования в этой области нужно продолжать, причем в различных направлениях, кроме того, по мнению многих экспертов необходима координация усилий*.

В настоящее время вопросы обратной связи в области влияния человеческого фактора на важные события анализируются в нескольких научно-исследовательских центрах. Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) создала официальную Программу анализа инцидентов (IPP). Одна из ее целей заключа-

* Это общее мнение экспертов, выраженное на совещании специалистов МАГАТЭ, проходившем в мае 1987 г. в г. Роскильде „Информационная обратная связь в области человеческого фактора в ядерной энергетике: Влияние эксплуатационного опыта на системный анализ и эксплуатацию”.

ется в обеспечении систематического и квалифицированного анализа эксплуатационных событий. Любое незначительное событие должно сообщаться в NRC, а задача IPP — дать его реалистичное описание.

В Японии отчет об инциденте должен быть направлен в банк данных в течение 48 часов, а полный отчет — в течение 30 дней. Доля ошибок персонала в общем числе инцидентов составляет приблизительно 10%. В более чем половине случаев (54%) произошел автоматический останов, в 15% — был снижен уровень мощности, 31% случаев не имел никаких последствий. Половина ошибок персонала (51%) связана с неправильным техническим обслуживанием, а 29% — с неправильной эксплуатацией.

По оценкам одного бельгийского эксперта причиной 40 случаев аварийного останова 7 реакторов на 70% стал человеческий фактор. Глубокий статистический анализ, проведенный компанией „Электриситэ де Франс” (EdF), показал, что относительно небольшое число ошибок происходит ночью, когда активность спадает, и в обеденные часы. К числу наиболее распространенных ошибок относятся оплошности и промедление в выполнении операций. Что касается механизма ошибок, то в большинстве случаев операторы забывают выполнить какую-либо операцию или не могут правильно определить операцию, которую нужно выполнить, плохо анализируя при этом состояние системы.

Тренажерная подготовка также может стать действенным средством обратной связи о поведении оператора, однако для проведения эффективных исследований потребуются большие денежные средства и усилия. Для создания оперативной обратной связи в области эксплуатационного опыта операторов во Франции, например, был создан полномасштабный тренажер, моделирующий работу компьютеризированного БЩУ.

Вспомогательные системы оператора

Вспомогательные системы оператора относятся к классу устройств, которые должны устанавливаться на БЩУ атомной электростанции для оказания помощи оператору в выполнении его функций и уменьшения тем самым вероятности ошибок. К числу таких систем относится широкий диапазон устройств, начиная от простых, например, цветной маркировки дисплея, чтобы его можно было отличить от группы аналогичных дисплеев, до сложных устройств, таких как стоящий перед оператором видеодисплей, на котором сведены показания многочисленных индикаторов, установленных на БЩУ. Значительные усилия были сосредоточены на разработке компьютеризированных информационных и вспомогательных систем оператора.

Концепции различных систем разрабатывались в зависимости от поставленных задач. Если первые системы должны были в основном контролировать функции, критически важные с точки зрения безопасности, а также обнаруживать и определять мес-

то возникновения неисправностей, то в задачу более поздних систем в дополнение к этим ограниченным функциям вошло предоставление информации о нормальной конфигурации станции как функции режима эксплуатации и возможного поведения оборудования АЭС.

Все возрастающее применение компьютеризированных вспомогательных систем оператора необходимо изучать в свете задач, которые они должны решать, подчеркивая, таким образом, относительно тесное взаимодействие между человеком и компьютером.

Идентификация. Компьютеры хорошо справляются с анализом событий в рамках заранее определенных схем, однако человек превосходит их в оценке любой новой схемы, которая может возникнуть. Более того, человек способен обрабатывать неполную информацию. Сила компьютеров — в оценке и анализе данных измерений и проведении сложных расчетов. Для идентификации они используют, главным образом, процессы дедукции, основанные на определенных правилах.

Анализ и интерпретация. Компьютеры могут очень быстро и надежно выполнять сложные алгоритмические операции, однако их возможности ограничены с точки зрения эвристических операций. В отличие от них человек способен обобщать примеры, исходя из своих собственных оценок, опыта и глубоких знаний.

Сравнение. К явным преимуществам компьютерной техники следует отнести возможности сбора, обработки и сравнения больших объемов точных данных в соответствии с заранее разработанными правилами. Однако человек может использовать данные из различных источников и различного формата и проводить их сравнение, полагаясь больше на свой опыт, чем на точный расчет.

Планирование. Компьютерная техника, конечно, имеет преимущество, если перед ней поставлена задача найти оптимальное решение хорошо сформулированной задачи. Но даже при незначительном изменении задачи проявляются сильные стороны человека, который может легко приспособить существующие процедуры для решения возникшей ситуации и, если необходимо, даже разработать новые процедуры.

Вообще, компьютеры эффективны и надежны только при решении очень хорошо сформулированных задач с использованием точных данных, правил или процедур. Человек может выполнять такие операции в аналогичных условиях, но, кроме того, он способен решать и плохо сформулированные задачи, имея неполную информацию и используя недостаточно точные правила или инструкции. Таким образом, человек может управлять системой даже в ситуациях, в которых компьютеры обречены на неудачу. Следовательно, тот факт, что компьютеры могут лучше справиться с некоторыми задачами, вовсе не должен стать причиной замены или человека на посту оператора.

Использование информации ВОБ для принятия решений в области безопасности

В течение последних 15 лет ВОБ являлись основным средством анализа безопасности реактора. Было проведено свыше 30 ВОБ, результаты которых дали важную информацию для проектирования и эксплуатации АЭС. Несмотря на потенциал таких исследований, масштабы их фактического использования для принятия решений были очень скромными. Одна из причин заключается в том, что в отчетах ВОБ полезные результаты перемешаны с огромной массой технической информации, не имеющей отношения к принятию решений. Другая причина состоит в том, что отчеты ВОБ понятны только лицам, хорошо знакомым с методологией.

Несколько лет назад была начата работа, направленная на более оперативное и интерактивное использование информации ВОБ. Целью этих усилий являлось создание „живой модели ВОБ”, которую легко можно было бы применить для решения вопросов эксплуатационной безопасности.

В тот же период быстрое развитие получили небольшие компьютеры, особенно персональные. В настоящее время небольшие компьютеры используются во многих отраслях промышленности в качестве отдельных установок или автоматизированных рабочих мест, соединенных с более крупным компьютером.

Аналогично этому в интерактивных системах, созданных для использования информации ВОБ, применяются новейшие разработки в области технологии небольших компьютеров. Благодаря высокой интерактивности и легкости в управлении, эти системы особенно удобно применять для пополнения и обновления информации ВОБ и ответов на вопросы типа „а что, если . . . ?”

Использование информации ВОБ для решения проблем эксплуатационной безопасности основано на том факте, что изменения в конфигурации станции могут повлиять на общую безопасность эксплуатации АЭС. К их числу относится контроль и оценка состояния важных для безопасности систем, модификации эксплуатационных процедур, изменения в технических спецификациях (в частности, в тех, что касаются продолжительности испытаний и технического обслуживания, а также допустимого времени простоя), определение очередности ремонта оборудования, оценка изменений в конструкции с учетом взаимосвязи между различными системами станции, определение очередности в проведении инспекционной деятельности.

В настоящее время упор делается на предоставление информации, необходимой для принятия решений при работе станции в нормальном режиме эксплуатации. В пакеты программ включается модель станции, основанная на результатах анализа дерева отказов и дерева событий. Основными потребителями таких пакетов программ являются сотрудники электроэнергетических компаний и регулирующих органов.

В последнее время были разработаны две системы: *PRISIM* (Система вероятностной оценки инфор-

мации по безопасности). Это пакет программ для персональных компьютеров, который открывает оперативный доступ к информации, имеющей отношение к ВОБ. В базе данных хранится предварительно обработанная информация, которая основана на наиболее важных результатах ВОБ и модели безопасности станции и которая позволяет проводить оценку изменений в безопасности станции, вызванных изменениями существующих на ней условий. Вопросы безопасности, связанные с изменениями конфигурации станции, можно решать с помощью модели, которая дает возможность пользователю точно определить (на основе схем и перечней компонентов) новый статус станции и рассчитать новый коэффициент безопасности. Для классификации систем безопасности и действий оператора предпринимаются различные важные меры. С помощью данного пакета программ можно также анализировать степень оперативности срабатывания систем безопасности в случае возникновения определенных неисправностей. В результате такого анализа в конструкции могут быть выявлены слабые места, например, уязвимость в случае отказа вспомогательных систем. Предварительно обработанная информация, основанная на наиболее важных результатах ВОБ, включает в себя описание наиболее серьезных последствий аварии, действий оператора по их ликвидации, взаимосвязи вспомогательных систем, библиотеки технических спецификаций, определение приоритетов и классификации систем, подсистем, компонентов и действий оператора, имеющих отношение к безопасности. Система *PRISIM* была разработана по заказу Комиссии по ядерному регулированию США для оказания помощи инспекторам. В настоящее время ведется монтаж такой системы на нескольких АЭС, а именно „Арканзас нуклиар уан” (первый энергоблок), „Пич боттом-2” и „Серри-1”.

ESSM (Монитор состояния важных для безопасности систем). Это также пакет программ, основанных на применении методов анализа дерева отказов, который дает возможность операторам проанализировать ситуацию в режиме „он-лайн” и быстро провести вероятностные оценки систем станции в интерактивном режиме. Клавиатуры и дисплеи мониторов на центральном БЩУ используются для ввода и вывода на дисплей информации о текущем состоянии станции и конфигурации ее компонентов. В любое время операторы могут запросить систему *ESSM* провести оценку общей готовности важных для безопасности систем. Программа *ESSM* выполнит сложный анализ дерева отказов систем (моделируя сложную взаимосвязь дублирующих и основных систем) с учетом бездействующего в данный момент оборудования и конфигурации станции. Затем на дисплее оператора появится оценка состояния готовности наиболее важных систем, которое было определено с помощью критериев вероятностной оценки. Одновременно система *ESSM* контролирует выполнение детерминистических правил эксплуатации. Если в результате нарушения этих правил требуется немедленно принять меры, то всю необходимую информацию оператор увидит на экране дисплея. В допол-