

Новые концепции проектирования блочного щита управления

Растущий во всем мире интерес к совершенствованию взаимодействия человека и машины

Ж. Фуре

С начала 80-х годов заметно возросла роль человеческого фактора в области приборного оборудования и управления на АЭС, что обусловлено, главным образом, аварией на атомной станции Три Майл Айленд, прогрессом в сфере обработки данных, созданием индикаторного оборудования и автоматически программируемых приборов. Авария на атомной станции ясно показала, что операторы могут страдать от „информационной перегрузки“ и что необходимо уделять больше внимания человеческому фактору и приобретенному опыту эксплуатации станций.

В данной статье г-н Фуре дает обзор основных мероприятий, уже осуществленных или планируемых во всем мире в целях совершенствования взаимодействия человека с машиной в интересах безопасного и экономичного производства атомной энергии.

С конца 1979 г. меры, направленные на улучшение взаимодействия человека с машиной в мировом масштабе и особенно во Франции, Японии и США, обрели много общих черт. Эти меры предприняты после тщательной оценки и анализа и относятся, в частности, к конструкциям консолей управления и панелей, системам отображения параметров безопасности (СОПБ), системам аварийной защиты (АЗ), вспомогательным щитам управления (ВЩУ), новым приборам и процедурам.

В отдельных случаях, однако, действующие в настоящее время инструкции затрудняют использование прогрессивной технологии на базе электронно-вычислительной техники, имеющей важное значение для совершенствования взаимодействия человека с машиной. Действующие сейчас правила, такие, например, как физические критерии и критерии функционального разделения для резервного оборудования и каналов, мешают использованию многоканальных методов передачи электрических сигналов, которые могут уменьшить риск возгорания и нарушения герметичности реакторного здания. Логично поэтому сделать вывод о необходимости скорейшей адаптации существующих инструкций к использованию новой технологии.

Г-н Фуре — руководитель отдела электроники и ядерных приборов Института технологических исследований и промышленного развития Комиссариата по атомной энергии (КАЭ). Данная статья представляет собой адаптированный вариант его обширного обзора „Концепция организации блочного щита управления и взаимодействия человека с машиной для управления АЭС“.

Более того, применение новой технологии для передачи электрических сигналов по сбору, обработке и индикации данных, стандартизации контрольно-измерительных приборов может повысить надежность и готовность станции, а также сократить потенциальную опасность.

Оборудование блочного щита управления

Значение эргономики в оборудовании блочного щита управления очень быстро получило признание операторов станций.

Во Франции в результате тщательного анализа 28 идентичных установок с реакторами с водой под давлением, проведенного в соответствии с программами СР-1 и СР-2 компании Электрисите де Франс, была создана полномасштабная модель блочного щита управления. Данная модель была использована впоследствии для изучения предложений по модификации и совершенствованию схем панелей в сотрудничестве с операторами различных атомных станций, что обеспечило максимальное использование полученного ими в процессе эксплуатации опыта (составляющего в целом около 35 лет), их идей, а также допущенных ими ошибок.

В качестве основы на модели были отобраны 20 принципиальных схем для определения необходимых модификаций или усовершенствований. Принятые в итоге модификации и усовершенствования обусловили полное изменение горизонтальных панелей передней консоли управления и заднего

Блочный щит управления на станции „ТМ1-2“

щита управления. Реализация указанных модификаций на всех 28 установках завершится в конце 1986 г.

Система отображения параметров безопасности (СОПБ)

Из всех вспомогательных систем изучению системы отображения параметров безопасности было уделено первоочередное внимание. В США Центр анализа ядерной безопасности (ЦАЯБ) Института электроэнергетических исследований (ИЭИ) разработал предварительную схему наиболее характерных параметров поведения станции в пред- и послеаварийных ситуациях на основе исследования аварии на станции Три Майл Айленд.

С тех пор появилось несколько вариантов систем отображения параметров ядерной безопасности для различных типов парогенерирующих установок. Изучение и разработка этих систем иногда сильно осложнялись проблемами качества программного обеспечения и сейсмостойкости оборудования, особенно в Японии и США.

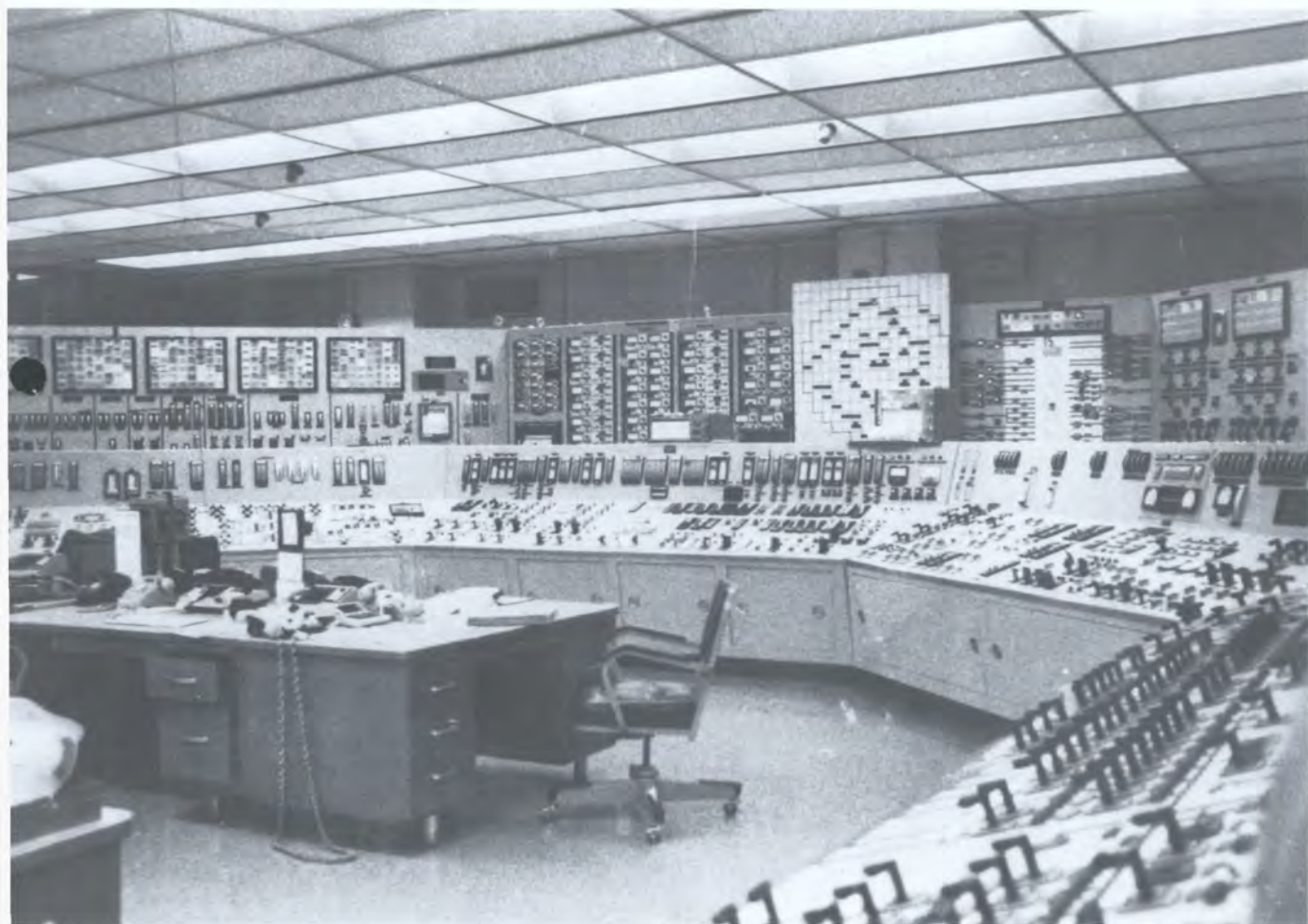
Первой системой отображения параметров безопасности, введенной в действие, была система, спроектированная

в Центре анализа ядерной безопасности для старой станции Янки Роу с первым реактором с водой под давлением, предназначенным для производства электричества в США, которая располагает крупным штатом операторов, проработавших на станции свыше 20 лет.

Вспомогательный щит управления

Вспомогательный щит управления обычно располагается по соседству с главным блочным щитом управления иногда в здании подстанции и даже у входа для посетителей с открытым для обзора пультом управления. Иногда он располагается в специально оборудованном помещении рядом с турбинным залом.

Вспомогательный щит управления (ВЩУ) и аппаратура для сбора, обработки и отображения данных значительно различаются на разных станциях. Примером наиболее современного ВЩУ может служить щит управления, созданный на атомной станции Троян, эксплуатируемой компанией Портленд Джeneral Электрик Компани в США. Здесь для него было построено отдельное здание, в котором блок визуального отображения и электрон-



Система индикации параметров безопасности

Сигналы защиты	Критические функции безопасности	
Нейтронная мощность	ВП	Реактивность
Давление в первом контуре теплоносителя	ВП	
Давление в первом контуре теплоносителя	НП	
Уровень в компенсаторе объема	НП	Целостность первого контура теплоносителя
Радиоактивность воздуха в вентиляционной системе	ВП	
Радиоактивность воздушных фильтров вентиляционной системы в здании реактора	ВП	
Давление в здании реактора	ВП	
Уровень в прямках в здании реактора	ВП	
Запас до кризиса кипения	НП	Отвод тепла из активной зоны
Тепловой удар (РТ)	НП	
Изменение запаса до кризиса кипения	НП	
Уровень в компенсаторе объема	ВП	
Тепловыделение в активной зоне	ВП	
Охлаждение активной зоны	НП	
Температура на выходе из активной зоны	ВП	
Давление пара	ВП	Отвод тепла вторым контуром
Давление пара	НП	
Уровень воды в парогенераторе	НП	
Давление в здании реактора	ВП	Целостность здания реактора
Радиоактивность в здании реактора	ВП	

Примечание. ВП — верхний предел; НП — нижний предел.

но-вычислительная техника занимают около 80 м² площади. В здании насчитывается 17 служебных помещений для группы управления аварийной ситуацией.

В ВЦУ АЭС Троян технологические сигналы обрабатываются на трех ЭВМ, которые используются также для обработки данных, получаемых от системы отображения параметров безопасности и любых данных на установке управления аварийной ситуацией. Для обеспечения всех необходимых операций требуются две из трех ЭВМ. Все сигналы хранятся в записи на пленке в течение 24 часов, а затем переносятся на диск. Быстропечатающее устройство воспроизводит часть этих сигналов по запросу. Связь ВЦУ как на региональном, так и

национальном уровнях с блочным щитом управления, системами аварийной защиты и Комиссией по регулированию ядерной деятельности США осуществляется с помощью 20 телефонных линий.

Новые контрольно-измерительные приборы

Новые контрольно-измерительные приборы включают новые датчики, соответствующие измерительные блоки и техническое оборудование для обработки данных. Соответствующее оборудование устанавливается на парогенераторах и в реакторном здании. Примерами новых датчиков являются датчики, используемые для оценки гамма-активности в диапазоне измерений порядка 10⁶ в реакторном здании и датчики для определения уровня воды в корпусе реактора над топливными сборками.

Что касается оборудования по обработке дополнительных данных, следует упомянуть о мониторе теплоносителя активной зоны, используемом для измерения предельного уровня давления и температуры. Основную часть времени этот прибор использует микропроцессор для расчета запаса до кризиса кипения в зависимости от давления в первом контуре, температуры горячих и холодных петель и температуры теплоносителя на концах тепловыделяющих сборок.

Процедуры

Имеющиеся в распоряжении оператора процедуры составляют наиболее важный компонент взаимодействия человека с машиной, поскольку в них содержатся фундаментальные исходные рекомендации по действиям оператора в случае аварии.

Начиная с 1979 г. процедуры на случай аварии разрабатываются не только на основе конкретных событий. Вместо этого применяется подход, ориентированный на общее состояние станции. Такой подход обычно обуславливает разработку комплексной логической диаграммы и является наиболее эффективным в случаях ошибки оператора при диагностике исходной причины аварии, а также в случае одновременного появления нескольких исходных причин.

Процедуры, основанные на конкретных событиях, являются более легкими для применения. Поэтому процедуры, ориентированные на общее состояние, до сих пор применяются только сменными техническими советниками, которые консультируют оперативный персонал.

Стратегия, применяемая с 1979 г. компанией Электрисите де Франс, использует процедуру, которая базируется на состоянии охлаждения активной зоны и готовности технических систем безопасности. Она применяется инженером по ядерной безопасности и радиационной защите (ISR), позволяя ему обеспечивать постоянный контроль за станцией и при необходимости давать указания



Операторы вспомогательного щита управления (ВЩУ) на АЭС Троян за полномасштабной тренировкой в условиях аварийной ситуации. Технический персонал (на переднем плане) изучает обстановку на реакторе для принятия решения. ВЩУ на АЭС Троян, являвшийся составным элементом системы аварийного управления на станции, в настоящее время стал самостоятельной установкой.

Предоставлено: INPO

оператору на включение системы аварийной защиты и на управление системой впрыска в защитную оболочку. Контролируя таким образом изменения на станции, он может даже давать указания на прекращение применяемых процедур.

В настоящее время предпринимаются шаги по дальнейшему совершенствованию имеющихся в распоряжении операторов процедур, связанных с систематическим диагнозом нарушений в системе охлаждения и определением соответствующих корректирующих мер по предотвращению или ограничению повреждений активной зоны. Важным фактором в развитии аварийных процедур является их отработка на тренажерах. До сих пор существует необходимость совершенствования тренажеров для моделирования длительных переходных процессов и состояния активной зоны в случае значительных повреждений.

Виды деятельности в области исследований и разработок, требующие особого внимания

Областями первостепенной важности в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ являются: проверка достоверности сигналов датчиков, обработка, фильтрация и класси-

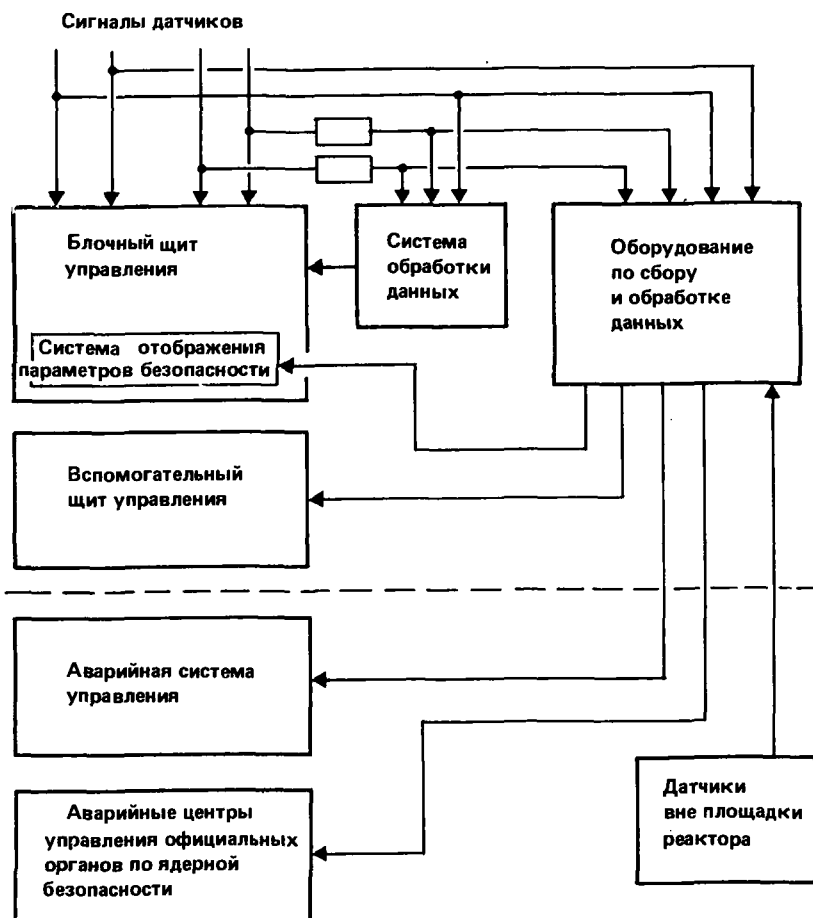
фикация сигналов защиты, общая оценка состояния станции, обработка и отображение данных, периодические испытания, байпасирование сигналов и отключений, блокировка приводов и адаптация правил применительно к новым технологиям.

Достоверность сигналов датчиков

Измерительные и позиционные датчики для приводов, таких как клапаны, электрические переключатели, прерыватели цепи и т.п. играют важную роль во взаимодействии человека с машиной, особенно потому, что операторы могут „почувствовать” процесс только с помощью сигналов, передаваемых датчиками. Достоверность этих сигналов должна быть улучшена путем повышения надежности датчиков и более широкого использования резерва сопутствующих измерений, которые зачастую могут помочь обнаружить неисправный датчик.

Кроме того, неисправный датчик может быть обнаружен с достаточной определенностью посредством относительно простого процесса корреляции сигналов датчиков, измеряющих различные физические величины. И наконец, проверка специфических характеристик в режиме on-line таких как время срабатывания датчика и уровень шума измеря-

Управление аварийной ситуацией и реакция установки: структура и поток информации



Эксплуатационный опыт ясно показывает заметное влияние поведения и действий оператора на готовность станции и ядерную безопасность. Из прилагаемой схемы видно, что итоговые заключения, касающиеся элементов взаимодействия человека с машиной (приборы, процедуры, поведение оператора), на примере различных аварий в основе своей идентичны.

Название установки	Мощность, МВт (эл.)	Год пуска	Причина	Период простоев	КИП	Процедуры	Поведение оператора
Уиндскейл	—	1956	Топливо	Снята с эксплуатации	Не пригодны	Очень не точные	Ошибки в понимании процессов
Энрико Ферми	150	1966	Топливо	4 года	Не исправны	Очень не точные	Ошибки в понимании процессов; задержка в действиях на 15 мин
Сан-Лорент А1	460	1969	Топливо	1 год	Не пригодны	—	Ошибки в понимании процессов
TMI-2	880	1979	Топливо	Неопределенный	Не пригодны	Точные	Ошибки в понимании процессов Неадекватные действия
Браунз-Ферри	2x1067	1975	Контроль и управление	1,5 года	Большие повреждения	Не полные	Эффективные действия, позволившие избежать серьезной аварии
Сан-Лорент А2	515	1980	Топливо	2 года	Частично не пригодны	Не полные	Ошибки в понимании процессов

мого сигнала может подтвердить удовлетворительную работу датчиков.

Такая непрерывная обработка сигналов и периодическая проверка характеристик должны стать предметом дальнейшего развития и применяться для большинства датчиков независимо от их предназначения. Преимущество должно отдаваться датчикам, используемым в приборах системы защиты или связанным с некоторыми устройствами управления.

Обработка, фильтрация и классификация сигналов защиты

В типовой установке мощностью от 900 до 1000 МВт количество сигналов защиты колеблется от 1000 до 1500. В течение аварии, вызванной потерей теплоносителя (ЛОКА), или подобной ей, в первые две минуты может быть подано несколько сотен сигналов с частотой 20–30 сигналов в секунду. Естественно, что операторы не смогут реагировать на все сигналы сразу. Они не в состоянии также отфильтровать их и классифицировать в порядке важности. Тем не менее, эта деятельность имеет существенное значение, поскольку она позволяет получить представление об общем состоянии установки.

Вызывает удивление тот факт, что почти на всех действующих установках проблемы кодирования, фильтрации и классификации сигналов защиты не получили высокого признания и лучшего применения. В целях улучшения этой ситуации необходимо предоставить абсолютное преимущество планируемому в этой области мероприятиям, поскольку они представляют собой одно из наиболее важных средств диагностики для оператора в случае аварии.

Внесение изменений на действующих установках с наличием проводных подблоков и блоков аварийной защиты может оказаться сравнительно трудным и дорогостоящим. Это может объяснить, но не оправдать отношение операторов установок, стремящихся планировать подобные усовершенствования на среднюю или даже длительную перспективу, в то время как в действительности требуются срочные меры для исправления явно неудовлетворительной ситуации.

Оценка состояния установки

В настоящее время операторы получают представление об общем состоянии установки с помощью панелей, на которых воспроизводится информация в аналоговой форме. Это позволяет им видеть состояние функций и систем, важных с точки зрения безопасности. Однако такое рассеяние полезной информации может мешать оператору произвести быструю общую оценку, имеющую важное значение в случае аварии и при выборе соответствующих аварийных мер.

Быструю оценку можно осуществить путем проверки ограниченного числа (до 30) физических

величин или параметров. Поэтому, даже при высокой степени автоматизации контрольно-измерительного оборудования расположение показаний параметров безопасности на пульте управления продолжает играть существенную роль. Система отображения параметров безопасности является бесспорно одним из наиболее эффективных путей оценки общего состояния станции и средством диагностики. Ее конструкция базируется на критических функциях безопасности и будет, несомненно, и далее развиваться с учетом приобретения нового эксплуатационного опыта.

Следует, однако, добавить, что общей оценки состояния функций, важных с точки зрения безопасности, в случае аварии недостаточно. Она должна подкрепляться общей оценкой состояния системы и ее компонентов, а именно: системы защиты, технических систем безопасности, систем электроснабжения, обеспечения сжатым воздухом и теплоотвода. В настоящее время данные, получаемые от этих систем и компонентов, являются отрывочными и неполными.

Обработка и отображение данных

Успехи в создании оборудования для обработки данных (цифровые компьютеры, сопутствующие интерфейсы, экраны с цветным изображением) в значительной мере улучшили обработку и отображение информации на блочном щите управления. Скорости расчета и объемы памяти нынешнего поколения ЭВМ полностью соответствуют скоростям сбора и обработки данных, необходимых для аналоговых, цифровых и дискретных сигналов, используемых в целях контроля и управления. В будущем количество таких сигналов может достичь 20000.

Графическое и цветное разрешение дисплеев обеспечивает высокую гибкость при выводе цифровых данных, графиков, текстов, диаграмм и, в целом, общей картины состояния АЭС.

При разработке систем для обработки и отображения данных следует принимать во внимание возможность для оператора последовательно обращаться к компьютеру и хранить некоторую информацию, которая может оказаться в какой-то мере ограниченной. Для обеспечения таких возможностей диалог с компьютером должен быть организован таким образом, чтобы независимо от состояния станции и выполняемых компьютером операций операторы могли иметь быстрый доступ к оперативным данным, а также к файлам данных.

Необходимо в большей мере использовать вывод данных на экран с цветным изображением посредством символов, позволяющих операторам оценивать как общую, так и детальную картину состояния станции. Для применения такого рода отображения, пока довольно редко применяемого на пультах управления, требуются исследования в области стратегии визуального отображения и способности оператора к диалогу с машиной. Кроме того, должна быть создана и испытана на тренажерах иерархическая структура для такого отображения.

Периодические испытания

Периодические испытания сейчас проводятся часто вручную. Что касается блоков и подблоков систем, важных с точки зрения безопасности, то они требуют в основном байпасирования сигналов и блокирования приводов во избежание случайного запуска защитных устройств или технических систем безопасности. Во время подобных испытаний функции, выполняемые системами безопасности, должны быть, конечно, сохранены.

Эксплуатационный опыт показывает, что в большинстве случаев периодические испытания влекут за собой случайное включение защитных устройств и технических систем безопасности. Помимо влияния на степень готовности станции, подобные действия могут привести к авариям. В основе таких действий лежат ошибки оператора, которые можно отнести на счет:

- программы процедур испытаний, в формулировке которых отсутствует единообразие, что затрудняет их применение ввиду многообразия оборудования;
- неточных диапазонов испытаний;
- действия байпасных сигналов, отключения и блокировки приводов без учета отсутствия резервного оборудования.

Вероятность ошибок оператора может быть уменьшена посредством частичной или полной автоматизации периодических испытаний и концентрации приборов контроля и управления на пульте управления; это, в свою очередь, значительно облегчит байпасирование сигналов и блокирование приводов. Предпочтительно осуществить подобную автоматизацию и концентрацию в кратчайшие сроки, с тем чтобы усовершенствовать методы общей оценки состояния станции.

Осуществленные меры, рекомендации

Еще задолго до аварии на станции Три Майл Айленд основное внимание в области исследований и разработок было сосредоточено на контрольно-измерительных приборах в системах управления и защиты, а также на вопросах взаимодействия человека с машиной.

Во Франции предметом особых забот стала разработка оборудования на основе микропроцессорной технологии, а именно на основе электронно-релейных приборов с программируемой логикой (CONTROBLOCK) и цифровой интегральной защитной системы (SPIN). Разработка систем наблюдения и диагностирования неисправностей была направлена в основном на обнаружение утечек и мигрирующего материала в петле первого контура, а также на оценку вибрационного поведения компонентов первого контура и турбогенераторной группы.

В США четыре компании по производству ядерных парогенерирующих систем предложили и разработали несколько новых усовершенствованных типов пультов управления. Они создавались, как правило, промышленными конструкторами и их конструкции отличаются даже в реакторных блоках одного и того же типа и на одной и той же площадке АЭС. Уже изготовлен целый ряд новых пультов управления, например, фирмами Бэбкок и Уилкоккс и Джeneral Электрик. Фирма Джeneral Электрик первой в начале 70-х годов приступила к осуществлению программы создания усовершенствованных пультов управления, в результате которой была разработана система „NUCLENET 1000”.

Что касается вспомогательных средств наблюдения и диагностики, то уже в 1976 г. Институт электроэнергетических исследований начал программу DASS (система диагностики и наблюдения). Диагностическая методология базировалась на использовании причинно-следственных диаграмм, но данная система так и не нашла непосредственного применения ни на одной из установок США. Институт электроэнергетических исследований осуществил также программу оценки пультов управления с учетом человеческого фактора. Сделанные в итоге выводы оказались близкими к рекомендациям Комиссии Кемени, сделанным после аварии на станции Три Майл Айленд.

В Японии программы по созданию оборудования и приборов для новых пультов управления, начатые в начале 70-х годов, — основа масштабов сегодняшней деятельности в этой области от компаний Митцубиси, Хитачи и То си ба.

Самой последовательной и долговременной программой в период, предшествовавший аварии на станции Три Майл Айленд, была, пожалуй, программа, осуществленная группой ученых, работавших над проектом реактора Хальден Организации по эконо-

мическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР). Уже в 1967 г. инициативная группа ученых приступила к исследованиям, имеющим отношение к КИП и СУЗ атомной станции на основе накопленного опыта по реакторной динамике и методам использования приборов в активной зоне. Первоначально основная цель этих исследований заключалась в применении современных теорий управления на атомных станциях с использованием цифровых компьютеров.

В середине 70-х годов произошла переориентация этих исследований. Они были нацелены на создание вспомогательных операторских систем наблюдения и диагностики, на определение роли и поведения оператора в целях избежания или ограничения последствий аварий, на совершенствование связи между оператором и машиной и на повышение надежности программного обеспечения и оборудования для систем управления на базе цифровых электронно-вычислительных устройств.

На международном уровне все рекомендации, выработанные после аварии на станции Три Майл Айленд, были суммированы в докладе ОЭСР (сентябрь 1980 г.) *Адаптация научно-исследовательских программ по ядерной безопасности с учетом аварии на станции Три Майл Айленд*. Один из разделов доклада охватывает реакторные приборы, запись и отображение данных, схему пульта управления, формулировку аварийных процедур, поведение человека, исследования на тренажерах и подготовку операторов.

Несомненно, что в основу этих рекомендаций были положены в значительной мере рекомендации, выработанные в США. Основные рекомендации Комиссии по регулированию ядерной деятельности США в области КИП и СУЗ и взаимодействия человека с машиной сводятся:

- к оценке и анализу конструкций приборов и пультов управления с учетом человеческого фактора;
- к установке новых приборов и оборудования для измерения уровня воды в корпусе реактора над топливными сборками, регулированию охлаждения активной зоны для измерения запаса до кризиса кипения, непрерывному измерению уровня воды в отстойниках защитной оболочки, измерению температуры и влажности, концентрации водорода и активной гамма-излучения;
- к установке системы отображения параметров безопасности на пульте управления, оборудованию вспомогательного щита управления по соседству с блочным щитом управления и установке устройств аварийной защиты вблизи атомной станции;
- к установке приборов связи для передачи в режиме реального времени важной информации о состоянии станции в аварийные центры официальных властей по ядерной безопасности.