

УДК 621.311.25:519.816

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко, М.Ю. Сахно

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПО ПОДГОТОВКЕ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА АЭС

Рассмотрены причины возникновения аварий, произошедших из-за ошибочных действий оперативного персонала атомной электростанции, проведен анализ современных полномасштабных и компьютерных тренажеров в учебно-тренировочных центрах атомной электростанции и показано их неполное соответствие требованиям МАГАТЭ, предложена структурная схема модели-тренажера и разработана классификация функций и задач по обмену информацией между элементами, а также выделены и показаны этапы последовательности расчета оперативной информации для принятия решения оперативным персоналом атомной электростанции.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, оперативный персонал, штатные и нештатные ситуации, полномасштабный тренажер, модель тренажера, тренажерная подготовка.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Важнейшая роль в обеспечении безопасности при эксплуатации АЭС отведена оперативному персоналу (ОП), от действий которого во многом зависит процесс ликвидации нарушений в нормальном (штатном) режиме эксплуатации или его переход в аварийную ситуацию.

В ядерной энергетике основная доля аварийных ситуаций (60...80 % общего числа) связана с ошибками ОП АЭС (табл. 1).

Таблица 1

Объем аварий  
из-за ошибочных действий ОП АЭС

Страна	Объем аварий (%)
США	21
ФРГ	29
Япония	19

В настоящее время технологические действия, выполняемые ОП на сложных и небезопасных энергетических производствах и установках, описываются десятками различных инструкций, составляющих тысячи страниц текста. Время их освоения составляет несколько месяцев, а оперативная переподготовка ОП затруднена. При этом необходимо отрабатывать штатные (ШАС) и нештатные (НШАС) аварийные ситуации, которые часто по требованиям безопасности невозможно смоделировать на реальном объекте. В настоящее время деятельность ОП моделируется на полномасштабных тренажерах, а компьютерные тренажеры используются для моделирования физических процессов.

Неисправности, возникающие при функционировании технических систем и технологического

оборудования АЭС, как правило, приводят к различным ШАС и НШАС. Решение данной проблемы связано с безошибочными оперативными действиями ОП АЭС в режиме реального времени и использованию автоматизированных систем по поддержке и принятию решений [1].

Причины ошибочных действий ОП в основном состоят в некачественной (неадекватной воспроизводимости штатной и нештатной аварийной ситуации на АЭС) тренажерной подготовке на тренажерах (автоматизированное средство обучения), которые не полностью охватывают возможные ШАС и НШАС, а, следовательно, ограничивают частично или полностью возможность в приобретении навыков работы ОП по этим ШАС и НШАС.

Анализ аварий, связанных с ошибочными действиями ОП, показал, что на АЭС главной составляющей деятельности ОП является оперативное принятие решений (ПР) в режиме реального времени, а особенно алгоритм действий, который позволит как диагностировать, так и своевременно предупредить и локализовать аварию [2].

К деятельности ОП предъявляются следующие требования [3]:

- обладать знаниями в объеме, достаточном для самостоятельной деятельности в контуре АСУ ТП энергоблока;
- иметь комплекс навыков приема, оценки и переработки информации, ПР и их реализации, увязки сведений, получаемых от средств отображения информации, с состоянием технологического обеспечения и ходом технологических процессов (ТП);
- глубоко понимать эталонные типовые модели состояния объекта управления и хода ТП, а также их оперативные данные, выводимые на системы обработки информации;

– знать взаимосвязи и взаимозависимости между состоянием технологического оборудования и ходом ТП;

– понимать цели и мотивы, которыми должен руководствоваться ОП в своей деятельности.

Тренажная подготовка на современном уровне не может рассматриваться иначе как важная составляющая информационных технологий обучения ОП (ИТ-подготовка) и включает следующие компоненты: организационную структуру; нормативную базу; учебно-методическое обеспечение; технические средства обучения.

Наиболее сложной и ответственной функцией деятельности ОП является управление оборудованием в случае отклонения от нормального режима функционирования, приводящих к аварийному состоянию. В этом случае ОП должен принимать объективные решения, как правило, в условиях неполной информированности, неопределенности и дефицита времени.

Развитие и закрепление способностей 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, т.е. в нештатных ситуациях [4].

На сегодняшний день к автоматизированным тренажерно-обучающим системам (АТОС) по подготовке ОП АЭС предъявляются требования согласно концепции МАГАТЭ [5]:

– использование учебных пособий, слайдов, аудиовизуальных материалов, компьютерных систем модели в масштабе станции и тренажеров для выполнения отдельных задач;

– использование тренажеров, представляющих собой пульт управления;

– тренажеры должны быть оснащены программным обеспечением, которое в достаточной мере охватывает нормальную эксплуатацию, ожидаемых при эксплуатации событий и ряда аварийных условий;

– для видов деятельности, которые необходимо выполнять быстро и с мастерством и которые не могут быть отработаны на действующем оборудовании, необходимо предусмотреть макеты и модели;

– обучающимся необходимо также ставить задачу действий в редких и аномальных ситуациях, которые имеют низкую вероятность возникновения и которые поэтому не могут быть воспроизведены в реальной практике станции.

Как показал анализ требований к существующим современным АОС (тренажерам) по подготовке ОП АЭС [1, 3, 6, 7, 10], они не отвечают в полной мере изложенным выше требованиям МАГАТЭ. Авторами предлагается поиск новых подходов для обработки и анализа объема информационного пространства тех-

нологического процесса с целью выявления признаков аварийности технологических параметров.

**Целью статьи** является усовершенствование концептуального подхода к построению структурно-функциональной схемы модели-тренажера по выполнению функций и задач оперативного персонала для их качественной подготовки и дальнейших действий по принятию решений в штатных и нештатных аварийных ситуациях.

## Основной материал

**1. Анализ современного состояния тренажерно-обучающих систем по подготовке оперативного персонала.** Система АТОС представляет собой тренажер на основе аппаратно-программного функционально-ориентированного комплекса для обучения ОП и отработки им определенных навыков и умений.

Рассмотрим современное состояние АТОС в наиболее развитых странах мира, занимающихся их разработкой и производством. Проблемой разработки тренажеров для подготовки ОП занимаются многие мировые фирмы, такие как Siemens, GSE Systems, Western Services Corporation и др.

В большинстве стран очень широко используются полномасштабные тренажеры (ПМТ). Во Всероссийском научно-исследовательском институте по эксплуатации АЭС разработана и внедряется информационная система управления квалификацией ОП – система eTAKE® [4]. Подготовка оперативного персонала в Чехии ведется на тренажерах двух типов: для реактора типа ВВЭР 440 (АЭС Дукованы) и типа ВВЭР-1000 (АЭС Темелин). В Германии является уникальная система тренажеров, представляющих собой модель реактора PWR (1:10), частично построенная из прозрачных материалов (Biblis Glass Model (Ker Kraftwerk Obrigheim GmbH), для наилучшего обзора при обучении. Для таких стран Азиатско-Тихоокеанского региона, как Япония и Южная Корея, характерно проведение обучения ОП на малых (компактных) тренажерах. Наибольшее количество тренажеров эксплуатируется в учебно-тренировочных центрах (УТЦ) США (29) и Японии (28) и всего лишь по одному тренажеру в Чехии и Румынии. Важным показателем, характеризующим отношение к подготовке высококвалифицированных кадров для АЭС в стране, является финансирование.

На сегодняшний день лицензии на подготовку ОП имеют все атомные станции Украины, на всех АЭС созданы УТЦ, оснащенные тренажерами, которые полностью имитируют работу атомного энергоблока. Во время создания украинской системы подготовки и лицензирования ОП АЭС использован опыт европейских стран [6].

Подготовка ОП была признана одним из самых важных направлений для обеспечения без-

опасности АЭС Украины, не последнюю роль сыграли причины аварии на Чернобыльской АЭС. В связи с этим проводились мероприятия начиная от создания нормативной базы до материально-технического оснащения учебно-тренировочных центров. Но главной особенностью этих мероприятий было признание важности подготовки ОП на государственном уровне: концепция национальной системы подготовки ОП АЭС Украины была одобрена Кабинетом Министров Украины (письмо КМУ от 10 февраля 1997 г. №2207/45). Концепция предусматривала поэтапное выполнение технических и организационных мероприятий [7].

Рассмотрим современное состояние обеспечения тренажерами для тренажной подготовки ОП на Украинских АЭС.

Ровенская АЭС. Сейчас УТЦ на Ровенской АЭС оснащен двумя тренажерами ПМТ-440 (аналог БЩУ блока №2) и ПМТ-1000 (аналог БЩУ блока №3). Также с 2003г. применяется система поддержки принятия решений (СППР) «КАДО».

Хмельницкая АЭС. На Хмельницкой АЭС подготовка ОП ведется на ПМТ фирмы S3 Technologies, также используется тренажер ЦТАВ, в котором установлено оборудование, использующееся на АЭС. Ведутся работы по модернизации существующей автоматизированной системе контроля радиационной обстановки и внедрению адаптированной для ХАЭС системы «КАДО».

Южноукраинская АЭС. На Южноукраинской АЭС техническая база УТЦ включает два ПМТ – прототипа действующих блоков ЮУАЭС, компактные тренажеры, АТОС.

Запорожская АЭС. На Запорожской АЭС установлены ПМТ производства Московской фирмы ДЖЭТ, также используется СППР «ВЫБРОС». Эта система является устаревшей, она не способна предоставлять качественную поддержку при ПР во время радиационной аварии. Некоторое время назад была начата работа по разработке СППР «ПРОЗА», однако в связи с объективными причинами завершена разработка только нескольких модулей указанной СППР. В настоящее время в Украине отсутствует современная СППР для аварийного реагирования при радиационных авариях [8].

Существующие ПМТ предназначены для моделирования технологических процессов в реальном масштабе времени, моделирование информационно-вычислительной системы, сигнализации и фрагментов отображения информации, управления исходными состояниями учебно-тренажерных занятий. ПМТ состоят из оборудования пультов управления и панелей блочного щита управления, серверов, рабочих станций операторов и инструкторской станции. На ПМТ моделируются все элементы технологических систем энергоблока, как в режимах нор-

мальной эксплуатации, так и в аварийных режимах. В моделях рассчитываются около 800000 параметров с шагом дискретизации 0,25 сек.

Таблица 2

ПМТ в УТЦ АЭС Украины

ЮУАЭС	ЗАЭС	РАЭС	ХАЭС
ВВЭР-320/3(5)	ВВЭР-320/5	ВВЭР-440/2	ВВЭР-320/1
ВВЭР-302/1	ВВЭР-320/3	ВВЭР-320/5	
	ВВЭР-320/1		

В ВАТ «ЛьвовОРГРЕС» создано несколько десятков ситуационных компьютерных тренажеров, среди которых – тренажер оценки аварийных ситуаций и тренажер планирования действий ОП. Эти тренажеры формируют у ОП навыки взаимодействия во время оперативных переключений и при ликвидации аварии.

Однако, в связи с возникающими авариями на АЭС, можно сделать вывод, что имеющиеся на сегодняшний момент тренажеры не обеспечивают в достаточной мере подготовку ОП к действиям по ПР в ШАС и НШАС в режиме реального времени.

**2. Концепция разработки подходов к построению тренажеров для тренажной подготовки оперативного персонала АЭС.** На сегодняшний момент существует два основных подхода к построению тренажеров: метод жестких планов (сценариев) тренировок и метод свободного выполнения операций, ограниченного только действием общих планов переключений. Исходя из анализа аварий, преимущество оказывается на стороне второго подхода, хотя он сложнее для разработки, чем первый. Тренировки по заданному сценарию вырабатывают у ОП привычку следовать заученному плану, в то время как свободный порядок операций в условиях действия общих правил развивает у ОП умение оценивать ситуацию на любой схеме и находить рациональный путь решения любой задачи. Тренировки на тренажере без жестких сценариев действий ОП, регламентируемые только общими правилами, развивают у ОП понимание логики переключений в сетях с различными схемами соединений. Ясное понимание ОП общего смысла и логики действий уменьшает вероятность принятия им неверных решений.

В то же время методика свободного порядка операций, ограниченного лишь действием общих правил, обладает тем недостатком, что она непосредственно не демонстрирует ОП правильное решение.

Исходя из анализа отечественных разработок тренажерных комплексов и требований к моделям тренажеров предлагается вариант структурной схемы модели – тренажера для подготовки ОП (рис. 1).

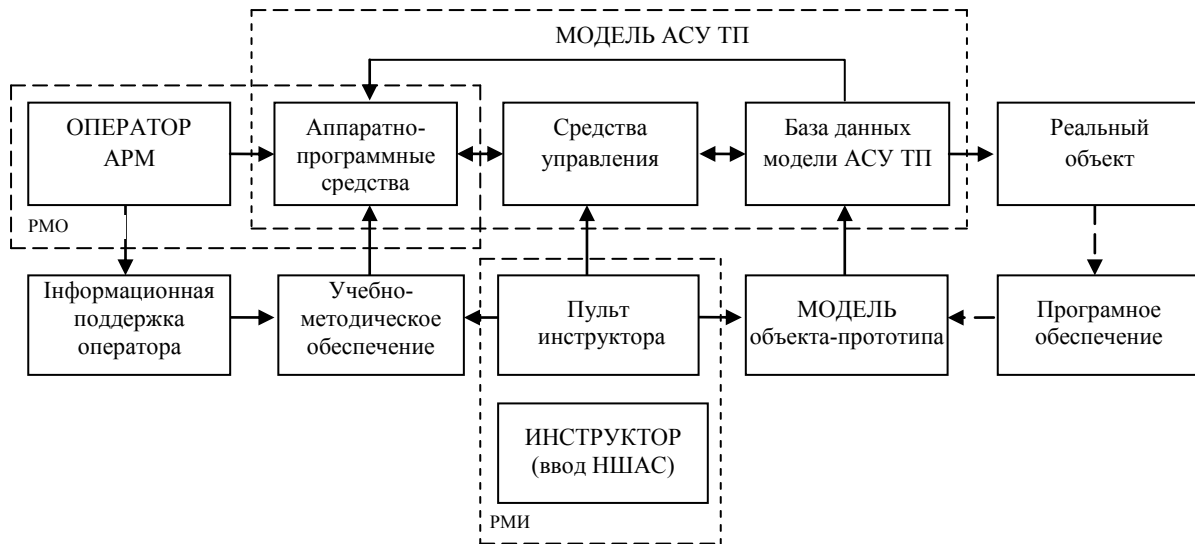


Рис. 1. Структурная схема модели - тренажера

Эта структурная схема модели-тренажера отвечает основным функциям тренажера, а именно: обеспечение ОП адекватной информационной модели прототипа объекта управления; обеспечение возможности качественного и количественного анализа информации и правильного ПР; обеспечение целенаправленного формирования и усовершенствования ОП профессиональных навыков и умений по ПР в ШАС и НШАС.

Предложенная структурная схема по своему составу позволяет отображать характеристики объекта управления и штатный человеко-машинный интерфейс.

Отображение характеристик объекта управления означает имитацию в тренажере результирующих функций, а также внешних и внутренних связей, которые соответствуют начальному объекту с такой точностью, которой достаточно для решения поставленных задач обучения ОП в необходимом объеме. Это обеспечивает адекватность моделируемых информационных потоков (ИП) с точной имитацией каждой составляющей, точный учет динамики его изменения и синхронизации информации, которая поступает с различных источников. Также в модели тренажере происходит реализация нормальных (ШАС) режимов работы, пусковых, регулирующих, остановочных и аварийных (НШАС) состояний энергообъекта.

Отображение штатного человеко-машинного интерфейса означает, что кроме адекватности ИП другие параметры рабочего места оператора (цвет, наличие мнемосхем, приборов, датчиков и др.) были строго одинаковыми на тренажере, и на энергообъекте. Это обуславливается тем, что важной составляющей формируемых на тренажере навыков являются не только оперативные навыки ПР, но и реализация моторных функций.

Требования к пульту инструктора модели тренажера следующие: пульт инструктора позволяет иметь возможность (вручную и автоматически) формировать рабочее задание на тренировку, задания внутренних и внешних возмущений, изменение масштаба времени, остановку процесса, возвращение в начальное состояние, ведение протоколов с фиксацией времени, количества и типа ошибок, срабатывания защит и блокировок, фиксацию отклонений и графиков основных параметров.

Требования к модели объекта управления: адекватность модели тренажера позволяет обеспечить в имитирующем объекте результирующие функции, а также внешние и внутренние связи, которые соответствуют начальному объекту с такой точностью, которой достаточно для решения поставленных заданий в необходимом объеме, при этом отличие результата от необходимого допущения должно лежать в пределах назначенного допущения.

Важнейшее требование к тренажерам – адекватность статического и динамического поведения модели реальному ТП. Мировая практика указывает в качестве достижимой цели точность в  $\pm 5\%$  для критических и  $\pm 10\%$  для некритических параметров в статических режимах при обеспечении ускорения моделирования в пределах от двух до пяти.

Адекватность тренажеров в переходных динамических режимах более трудна для проверки и, как правило, оценивается экспертно в качественном уровне. Необходимым условием адекватности является стабильность модели, под которой понимается принадлежность параметров модели (как внешних, так и внутренних) заранее заданному рабочему диапазону, без срывов и сбояв в вычислении.

Также важным элементом тренажеров для АЭС является комплекс программ, описывающий сложные динамические процессы.

На тренажерах моделируются как режимы нормальной эксплуатации энергоблока, так и аварийные режимы. Наиболее важными для безопасной эксплуатации АЭС и наиболее трудными с точки зрения моделирования являются аварийные режимы. Точность работы тренажеров должна соответствовать проектным расчетам.

Для стационарных режимов погрешность расчета основных параметров не должна превышать 1%

номинальных значений. Остальные параметры рассчитываются с точностью до 8%. В динамических режимах эти показатели составляют 3% и 8% соответственно.

Требования американского стандарта к данным показателям составляют 5% и 10%.

Авторами разработана классификация функций и задач по обмену информацией между элементами (рис. 2).

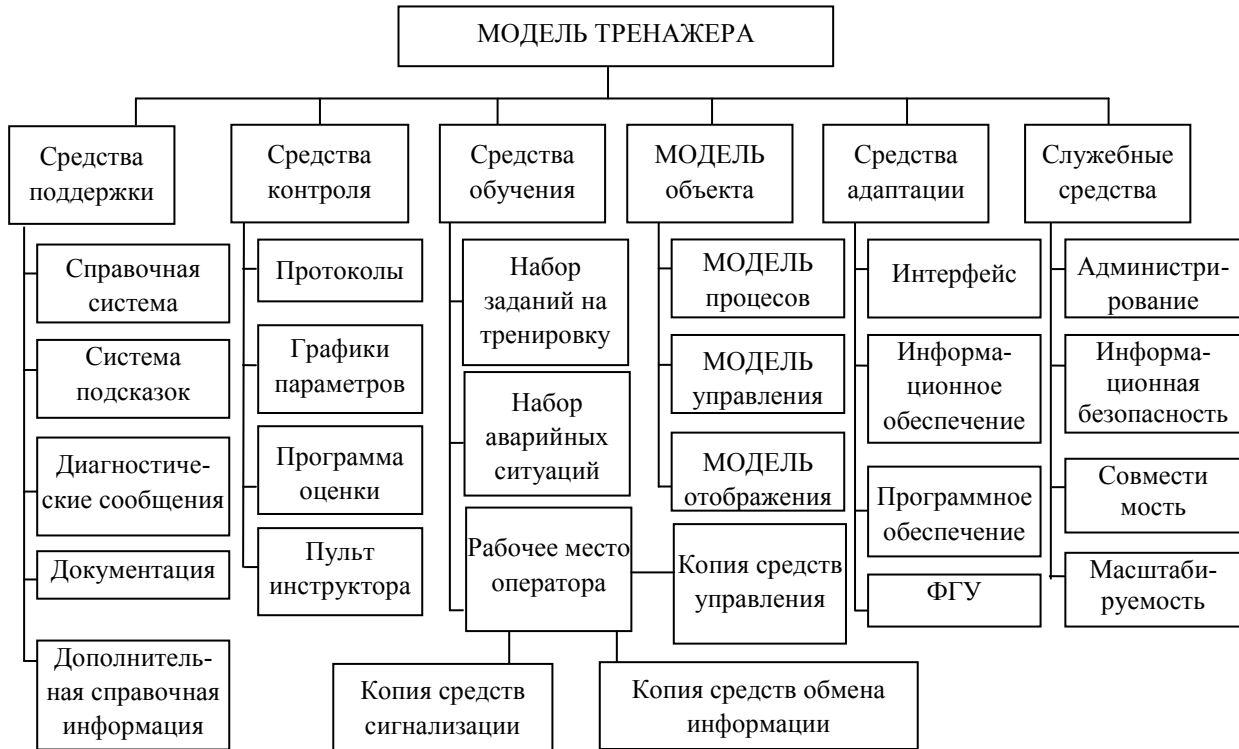


Рис. 2. Схема классификаций функций и задач модели - тренажера

В функциональной схеме предложено разделить модель-тренажер на шесть основных подсистем: средства обучения ОП, средства контроля и анализа процесса обучения, средства поддержки ОП и инструктора, модель энергообъекта, средства адаптации, служебные средства.

Предложенная функциональная модель тренажера может использоваться на всех этапах подготовки: начальная подготовка, самостоятельная подготовка; подготовка на должность ОП; поддержка квалификации ОП; переподготовка на новую должность; квалификационная проверка знаний; противоаварийные тренировки смены с целью выработки навыков коллективных действий; для проведения межуровневых тренировок.

Моделируя предусмотренные техническими заданиями режимы нормальной эксплуатации, аварийные режимы, а также режимы с наложением нескольких отказов, компьютерный комплекс должен обеспечивать работу тренажера в режиме реального времени.

Неравнозначность элементов является обязательным условием функционирования большинства

систем. Так, в атомной энергетике классификация элементов АЭС по влиянию на безопасность осуществляется на четырех уровнях:

– к 1 классу относятся твэлы и элементы АЭС, отказы которых являются исходными событиями, приводящими к повреждению твэлов и запроектным (непредусмотренным проектом, а потому самым тяжелым) авариям;

– ко 2 классу – элементы АЭС, отказы которых являются исходными событиями, приводящими к повреждению твэлов и авариям, а также элементы системы безопасности, отказы которых приводят к невыполнению этими системами своих функций;

– к 3-му – элементы, выполняющие контрольные функции радиационной защиты;

– к 4-му – остальные элементы [9].

Состояние исправности элементов АЭС ОП необходимо оценивать по поступающей оперативной информации о состоянии ТП АЭС.

**3. Разработка этапов последовательности учета оперативной информации.** Для правильного ПР, ОП должна предоставляться адекватная расчет-

ная оперативная информация об экономичности и надежности работы оборудования. Этапы последо-

вательности расчета оперативной информации представлены на рис. 3.

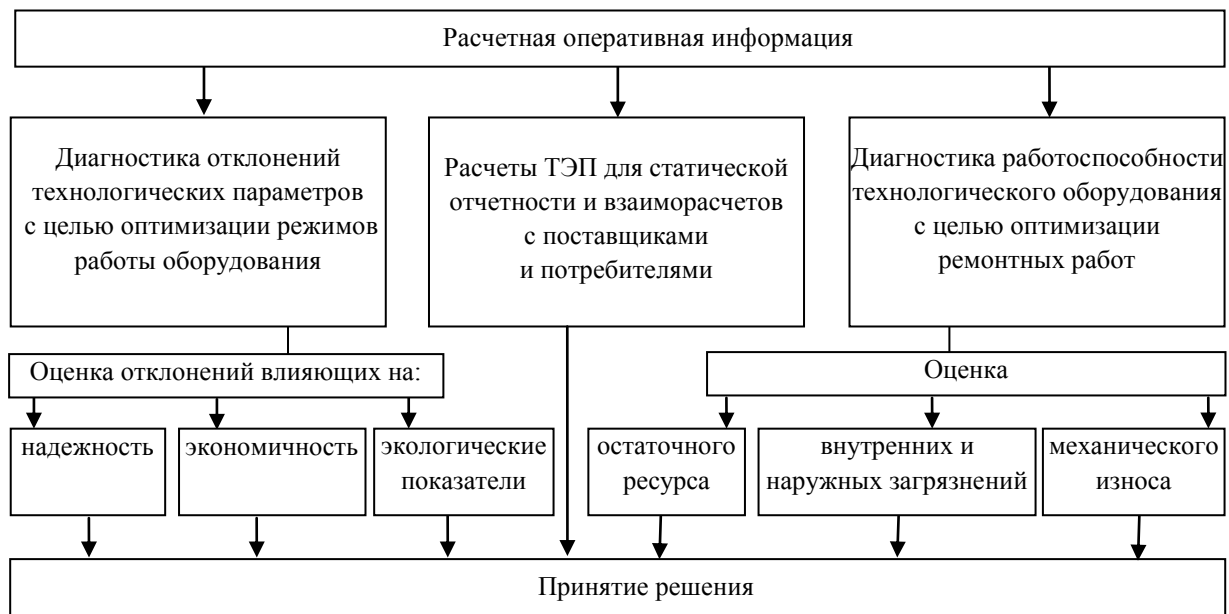


Рис. 3. Этапы последовательности расчета оперативной информации

Рассмотрим формирование этапов последовательности расчета оперативной информации. После получения ОП расчетной оперативной информации производится диагностика отклонений технологических параметров с целью оптимизации режимов работы оборудования. Затем выявляются отклонения технологических параметров, влияющих на надежность, экономичность и экологические показатели, что способствует адекватной оценке ТП и принятию правильного решения в случае отклонения. В случае проведения ремонтных работ, производится диагностика работоспособности оборудования с целью его оптимизации, кроме того, оперативным персоналом оценивается механический износ, внутренние и наружные загрязнения и остаточный ресурс, а также производятся расчеты ТЭП для статической отчетности и взаиморасчетов с поставщиками и потребителями.

Таким образом, решение принимается на основе расчета оперативной информации о надежности, экономичности, экологических показателей, оценке остаточного ресурса, механического износа и внутренних и наружных загрязнений.

## Выводы

1. Рассмотрены требования МАГАТЭ к созданию АТСО и показано, что существующие на сегодня АТСО не отвечают данным требованиям по обработке оперативной информации в режиме реального времени.

2. Предложена структурная схема модели-тренажера, которая позволяет обеспечить учет и

адекватность информационной модели объекта прототипа и возможность качественного и количественного анализа информации и правильного принятия решения ОП, кроме того, созданная схема модели-тренажера адекватно описывает процесс протекания технологического процесса на объекте-оригинале.

3. Разработана классификация функций и задач по обмену информацией между элементами в функциональной схеме и предложено разделить модель тренажера на основные подсистемы средства обучения ОП, средства контроля и анализа процесса обучения, средства поддержки ОП и инструктора, модель энергообъекта, средства адаптации, служебные средства, которая позволит применять функциональную модель на всех этапах подготовки.

4. Выделены этапы последовательности расчета оперативной информации, которые позволяют принимать решение на основе расчета оперативной информации о надежности, экономичности, экологических показателей, оценке остаточного ресурса, механического износа и внутренних и наружных загрязнений.

## Список литературы

1. Кунаев М.А. Оперативная диагностика энергетических установок / М.А. Кунаев // *Атомная стратегия 21 века, март 2010.* – 02(45). – С. 14-17.
2. Ляшенко О.В. Алгоритм формирования оперативных знаний оператора системы перегрузки ядерного топлива / О.В. Ляшенко // *Труды ОДУ.* – 2004. – Вып. 1(21). – С. 3-7.
3. Тарарькин С.В. ИГЭУ.: Подготовка кадров для АЭС / С.В. Тарарькин // *Безопасность окружающей среды.* – 2010. – №2. – С. 70-74.

4. Попов А.Н. К вопросу о подготовке инженерно-технических кадров в электроэнергетике / А.Н. Попов, Д.С. Апарин, В.А. Серяков // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 86-91.

5. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Набор, квалификация и подготовка персонала для атомных электростанций. Руководства - NS-G-2.8 2005г.

6. Кабаев С.Т. Подготовка специалистов для атомной отрасли в странах СНГ / С.Т. Кабаев // Новоуральский государственный технологический институт, материалы конференции. Фундаментальные исследования. – 2006. – С. 91-93.

7. Николаевский И. Проблемы системы обучения персонала – проблемы безопасности АЭС / И. Николаевский // Національна безпека України. – 2005. – № 9-10. – С. 28-34.

8. Турбаевский В.В. Системы поддержки принятия решения при радиационных авариях на АЭС: состояние и

пути совершенствования / В.В. Турбаевский // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – 2(50). – С. 24-28.

9. Ястребенецкий М.А. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / М.А. Ястребенецкий, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская и др. – К.: Техника, 2004. – 472 с.

10. Соляник С.Н. Разработка и эксплуатация автоматизированных обучающих на запорожской АЭС / С.Н. Соляник, В.А. Якимов, С.Н. Соляник // Вестник СевГТУ. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – Вып. 39: Механика, энергетика, экология. – С. 57-59.

Поступила в редколлегию 26.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПО ПІДГОТОВЦІ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ АЕС

П.Ф. Буданов, К.Ю. Бровко, М.Ю. Сахно

Розглянуті причини виникнення аварій, що сталися із-за помилкових дій оперативного персоналу атомної електростанції, проведений аналіз сучасних повномасштабних і комп'ютерних тренажерів у навчально-тренувальних центрах атомної електростанції і показана їх неповна відповідність вимогам МАГАТЭ, запропонована структурна схема моделі-тренажера і розроблена класифікація функцій і завдань за обміном інформацією між елементами, а також виділені і показані етапи послідовності розрахунку оперативної інформації для прийняття рішення оперативним персоналом атомної електростанції.

**Ключові слова:** атомна електростанція, оперативний персонал, штатні і нештатні ситуації, повномасштабний тренажер, модель тренажера, тренажна підготовка.

### ANALYSIS OF THE MODERN STATE AND PROSPECT OF DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SYSTEMS ON PREPARATION OF OPERATIONS STAFF OF NUCLEAR POWER PLANT

P.F. Budanov, K.Yu. Brovko, M.Yu. Sakhno

Reasons of origin of failures, happening from the erroneous actions of operative personnel of nuclear power plant are considered, the analysis of modern full scale and computer trainers is conducted in the educational-training centers of nuclear power plant and their incomplete accordance is shown to the requirements of IAEA, the flow diagram of model-trainer is offered and classification of functions and tasks is worked out on an exchange by information between elements, and also the stages of sequence of calculation of operative information are distinguished and shown for a decision-making by the operative personnel of nuclear power plant.

**Keywords:** nuclear power plant, operative personnel, regular and nonpermanent situations, full-scale trainer, model of trainer, training preparation.