

Тренажеры для подготовки операторов энергооборудования

К.т.н., В. С. РАБЕНКО (Ивановский государственный энергетический университет)

В статье рассмотрены вопросы моделирования режимов работы энергетического блока тепловой электрической станции для противоаварийной тренировки операторов на компьютерных тренажерах. Основное внимание уделено комплексному решению задачи воспроизведения на модели различных режимов работы энергоблока, взятого за прототип при разработке тренажера.

Состояние вопроса. В документах РАО «ЕЭС России» [1,2] отмечается стабильно высокая доля вины оперативного персонала ТЭС, особенно персонала КТЦ, в авариях, повреждениях оборудования, технологических нарушениях. В условиях ограниченного финансирования ошибки оперативного персонала дорого обходятся АО-энерго и в конечном счете РАО «ЕЭС России» [3].

В то же время современные информационные технологии на базе относительно недорогих ПЭВМ [4,5] позволяют вести подготовку оперативного персонала без отрыва от производства [3] согласно требованиям, изложенным в [6,7].

В ИГЭУ по заказу ОАО «Костромская ГРЭС» разработан [8], прошел экспертизу ДГИЭС РАО «ЕЭС России» [9] и принят в эксплуатацию КТ для подготовки оперативного персонала котлотурбинного цеха газомазутных энергоблоков 300 МВт [10]. За прототип при реализации модели в части технологических решений, схем, динамики процессов, режимов работы был взят блок №5 (котлоагрегат ТГМП-314, турбина К-300-240 ЛМЗ, смешивающий ПНД-2, Д-10 ата, топливо: газ/мазут/в смеси).

Базовый вариант КТ рассчитан для подготовки машиниста энергоблока (МЭБ), но может быть использован и для подготовки оперативного персонала КТЦ по следующим должностям: старший машинист энергоблока, начальник смены КТЦ, машинист-обходчик по котлу, машинист-обходчик по турбине. Тренажер может применяться на различных этапах подготовки – начальная подготовка, подготовка на оперативную должность, спецподготовка (поддержание квалификации и противоаварийная подготовка), переподготовка на новую должность, квалификационная комплексная проверка знаний [7].

По заказу ОАО «Рязанская ГРЭС» разработан и сдан в опытную эксплуатацию КТ пылеугольного энергоблока 300 МВт. За прототип взят блок №1 (котлоагрегат Пп-990/255 (П-59), турбина К-300-240 ЛМЗ, поверхностные ПНД, Д-7 ата, РОУ 255/40 ата прогрева, схема пылеприготовления прямого вдувания с молотковыми мельницами и инерционными сепараторами, топливо: бурый уголь (мазут/газ/в смеси).

Базовый вариант КТ предусматривает два рабочих места обучаемых для подготовки машинистов энергоблока по котлу (МЭБк) и по турбине (МЭБт).

В настоящее время начаты работы по созданию аналогичных КТ пылеугольного блока 300 МВт с турбоустановкой К-300-240 ХТГЗ и газомазутного блока 800 МВт.

С учетом наметившейся тенденции на модернизацию систем контроля и управления (СКУ) энергоблоков ТЭС современным поколением АСУТП [11] изучается вопрос о создании экспериментального образца КТ энергоблока на сверхкритические параметры пара с компонентами программно-технического комплекса (ПТК) «Квинт». Отличительной особенностью данного тренажера будет идентичность функций АСУТП, а также информационных и моторных полей [12] рабочих мест операторов.

Аппаратная база КТ. Тренажер (рис. 1) рассчитан для работы в локальной или корпоративной сети ТЭС под управлением Windows 98 или Windows 2000 в одноранговой сети Microsoft.

Использование файл-сервера [13] для нормальной работы тренажера не требуется. Все компьютеры должны быть оснащены сетевыми картами Fast Ethernet. Один компьютер должен быть оснащен процессором не ниже Intel Pentium IV и высокоскоростным диском для выполнения расчетов в реальном или ускоренном масштабе времени. Остальные компьютеры могут иметь более низкие параметры процессора.

Для реализации базового варианта сетевого КТ не требуется привлечения никаких специальных технических средств. Базой являются ПЭВМ массового применения. Использование специально разработанной программы [14] делает управление тренажером максимально удобным.

Для имитации структуры блочного щита управления конфигурация тренажера предусматривает оптимально 5-8 шт. мониторов для размещения моторных и информационных полей на одном рабочем месте подготавливаемого оператора (органы управления – 1; схемы – 1,2; приборы контроля – 1,2; сигнализация – 1; тренды – 1). В состав тренажера входит выделенное автоматизированное рабочее место (АРМ) инструктора тренировки.

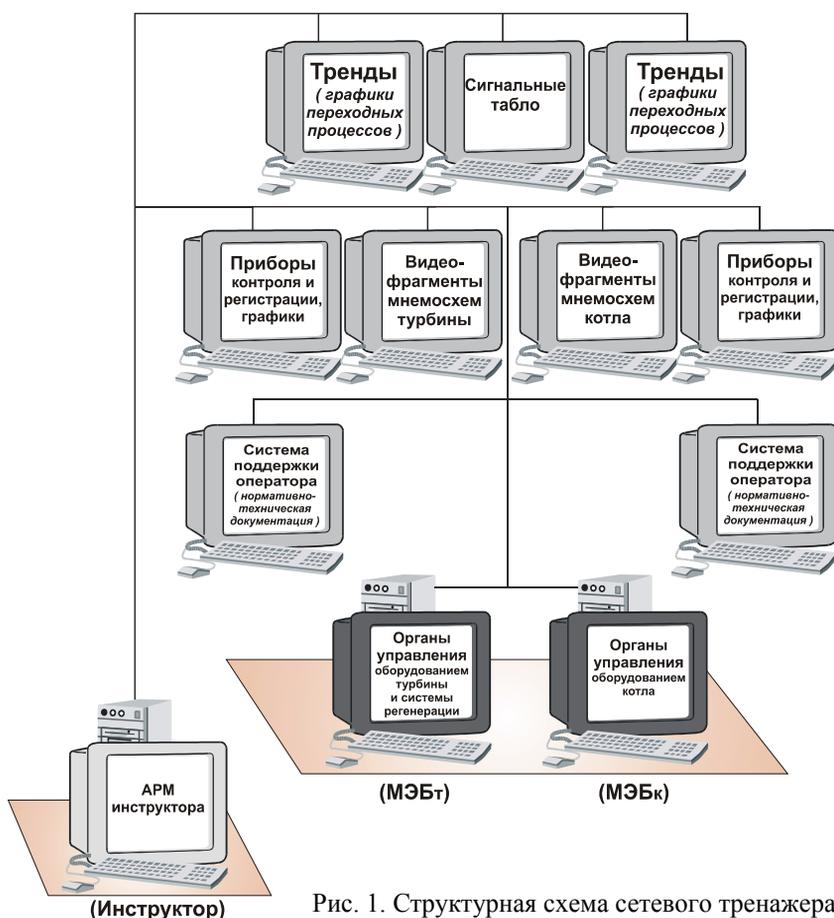


Рис. 1. Структурная схема сетевого тренажера

Программная часть тренажера. Программный комплекс модели режимов работы энергоблока реализован в среде Delphi по модульному принципу для организации сетевой многопользовательской технологии динамической обработки и обмена данными в реальном или ускоренном масштабе времени [15], а также для унификации программного обеспечения объектов моделирования. Укрупненная структурная схема построения программной части тренажера представлена на рис. 2.

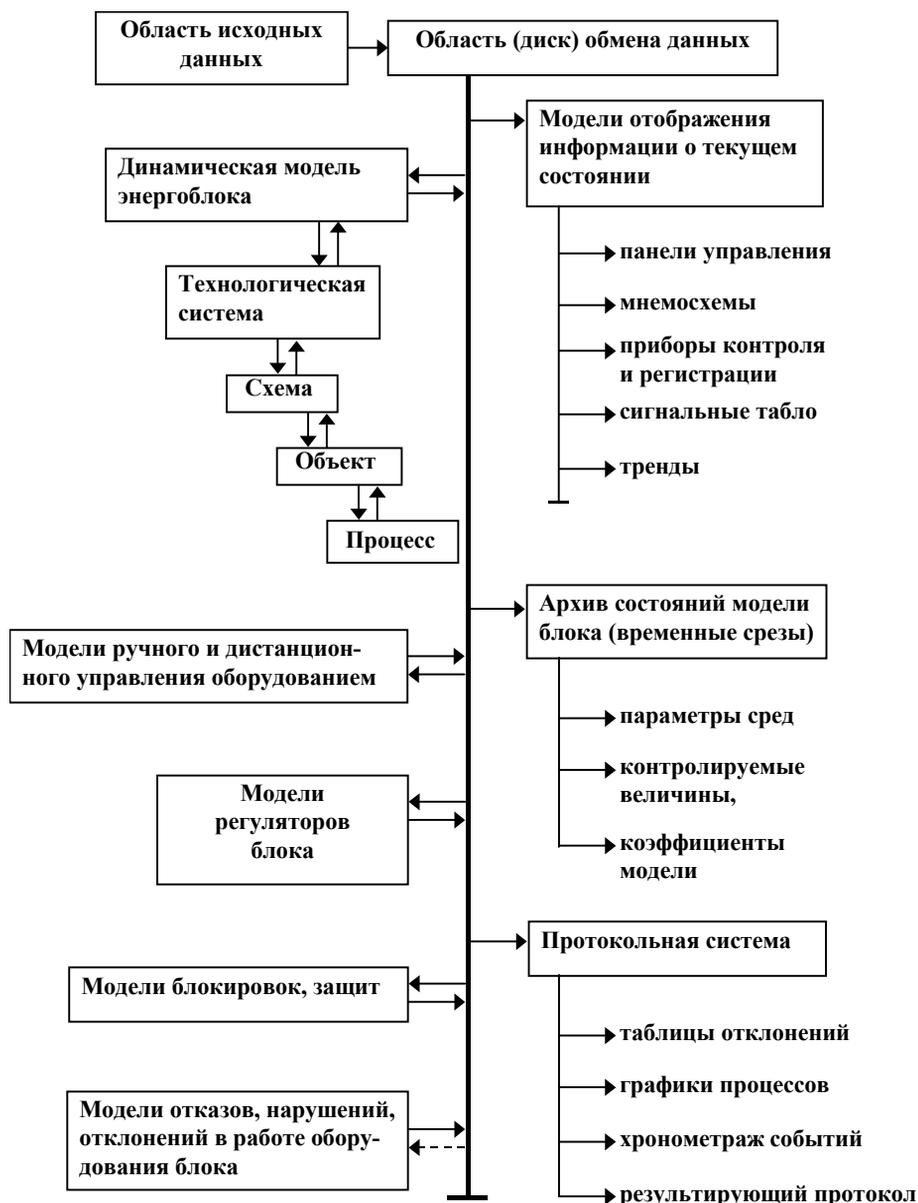


Рис. 2. Структура программной части тренажера

Модульное построение программной части позволяет развернуть тренажер на необходимом количестве компьютеров и обеспечить надежную работу программно-технического моделирующего комплекса в одноранговой сети. при этом соблюдается заданная скорость обмена данными при цикле расчета параметров модели энергоблока равная 0,1 с.

Основные положения построения нелинейной модели блока. В основу методики построения нелинейной всережимной модели энергоблока положен принцип декомпозиции.

1. Модель блока как сложная динамическая система разделяется на подсистемы путем разрыва инерционных связей между подсистемами. В качестве подсистем рассматриваются функционально законченные технологические схемы или участки схем (табл. 1), которые в свою очередь разделяются на оконечные тракты греющей и нагреваемой сред (рис. 3).

2. В свою очередь тракт среды разделяется на расчетные участки, соединенные расчетными узлами (рис. 4). За расчетный узел принимается аккумулирующая емкость, соединительный узел, коллектор, трубопровод, окружающая среда. В общем случае расчетный участок тракта представляет соединение гидравлических сопротивлений и нагнетательных агрегатов.

3. В пределах расчетного участка теплогидравлика разделяется по протекающим процессам на подсистемы (теплообменная и гидравлическая), так как скорости переходных процессов существенно различаются.

4. В основу математического описания динамики расчетного участка положен метод расчета теплогидравлического контура произвольной топологии (см. рис. 4). Это позволяет имитировать нарушение плотности теплогидравлического участка с истечением в теплообменную или окружающую среду.

Таблица 1. Перечень основных подсистем модели блока

№ п/п	Подсистема
1	Водопаровой тракт котла
2	Вторичный перегрев пара
3	Газовоздушный тракт котла
4	Узел впрысков в тракт котла
5	Распоясочный узел котла
6	Газовое кольцо
7	Мазутное кольцо
8	Паровое кольцо
9	Воздушное кольцо
10	Калориферы котла
11	БРОУ
12	Паропроводы острого пара
13	Паровпуск турбины
14	Прогрев металла турбины
15	Обогрев фланцев и шпилек турбины
16	Тракты отборов пара
17	Концевые уплотнения турбины
18	Маслоснабжение подшипников ТГ
19	Регулирование ТГ
20	Подшипники ТГ
21	Виброхарактеристики ТГ
22	Техническое водоснабжение
23	Группа эжекторов
24	Конденсатор
25	Группа ПНД
26	Деаэрационная установка
27	Питательная установка блока
28	Группа ПВД
29	Охлаждение статора генератора
30	Охлаждение ротора генератора

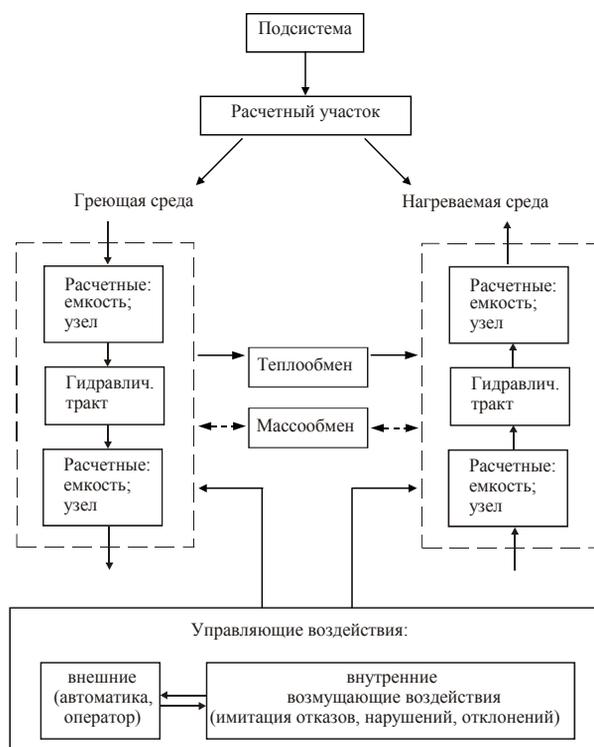


Рис. 3. Декомпозиция расчетного участка подсистемы модели блока

Имитация нарушения плотности тракта среды

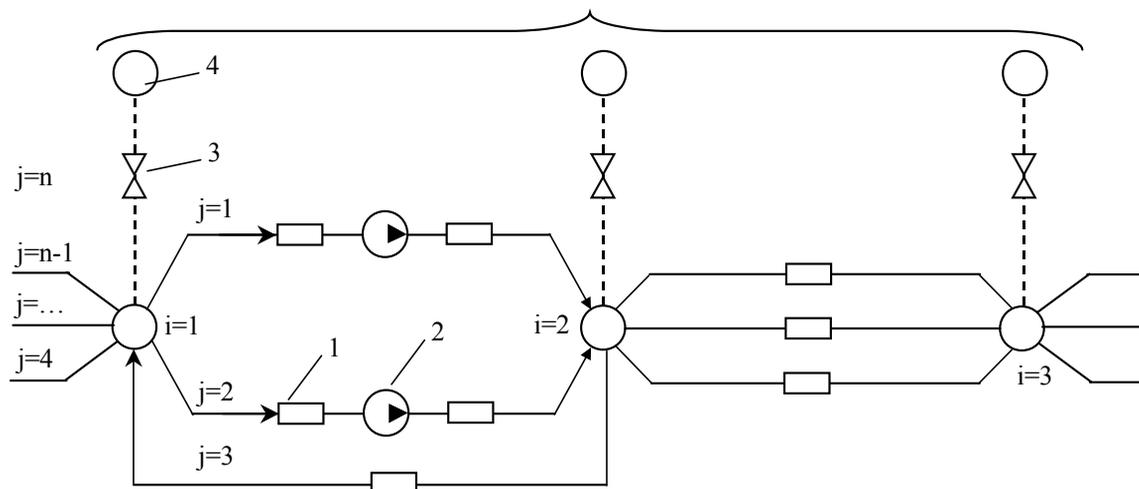


Рис. 4. Структурная схема теплогидравлического контура произвольной топологии: i – номер расчетного узла тракта; 1 – суммарное гидравлическое сопротивление расчетного участка тракта; 2 – нагнетательный агрегат; 3 – фиктивное переменное гидравлическое сопротивление; 4 – окружающая или теплообменная среда

Согласно этому методу для каждого расчетного узла записываются уравнения сохранения энергии и массы:

$$\left. \begin{aligned} \rho_i V_i \frac{dh_i}{d\tau} &= \sum_j G_j h_j - \left(\sum_k G_k \right) h_i, \\ \frac{V_i}{v_i} \beta_p \frac{dp_i}{d\tau} - \frac{V_i}{v_i c_{pi}} \beta_t \frac{dh_i}{d\tau} &= \sum_j G_j - \sum_k G_k. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь i – номер расчетного узла; j – порядковый номер участка тракта подвода среды к расчетному узлу; k – номер участка тракта отвода среды из узла; ρ_i, v_i – соответственно плотность и удельный объем среды в рассматриваемом узле; V – эквивалентный объем расчетного узла, включающий объемы участков присоединенных трактов; p_i, h_i – соответственно давление и теплосодержание среды в расчетном узле; h_j – теплосодержание среды на выходе из j -го подводящего тракта; G_j, G_k – массовые расходы среды соответственно через j -й подводящий и k -й отводящий участки трактов;

$\beta_p = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} \Big|_h$; $\beta_t = \frac{c_p}{v} \frac{\partial v}{\partial h} \Big|_p$ – соответственно коэффициенты сжимаемости и температурного расширения.

Для всех расчетных узлов теплогидравлического контура записываются уравнения (1), решение которых позволяет найти изменения давлений и теплосодержаний среды во времени.

В свою очередь, каждый участок тракта описывается уравнением сохранения количества движения, из решения которого находятся изменения расходов среды через рассматриваемые каналы.

Для участка тракта, содержащего в качестве одного из своих гидравлических элементов нагнетательный агрегат, уравнение сохранения количества движения будет выглядеть следующим образом:

$$\left(\sum_m \frac{\ell_m}{S_m} \right) \frac{dG_j}{d\tau} = H(G_j) - (p_{i+1} - p_i) - (z_j + z_n) G_j^2 \pm \Delta p_{\text{нив}}. \quad (2)$$

В случае отсутствия в составе гидравлических элементов нагнетательного агрегата уравнение запишется как

$$\left(\sum_m \frac{\ell_m}{S_m} \right) \frac{dG_j}{d\tau} = (p_i - p_{i+1}) - z_j G_j^2 \pm \Delta p_{\text{нив}}. \quad (3)$$

Здесь m – порядковый номер гидравлического элемента, входящего в состав участка тракта; ℓ_m , S_m – соответственно эквивалентные длина и площадь проходного сечения m -го гидравлического элемента; G_j – массовый расход среды через участок тракта, соединяющий i -й и $(i+1)$ -узлы; $H(G_j, n, \beta)$ – напор, создаваемый нагнетательным агрегатом (где n – частота вращения ротора; β – угол разворота лопаток рабочего колеса); p_i , p_{i+1} – давления среды в оконечных участках тракта; z_j – суммарное гидравлическое сопротивление всех элементов, входящих в состав j -го участка; $z_{\text{н}}$ – гидравлическое сопротивление нагнетательного агрегата в остановленном состоянии, $\Delta p_{\text{нив}}$ – нивелирный перепад давлений.

Суммарное гидравлическое сопротивление участка тракта определяется следующим образом:

а) для линейного участка тракта

$$z_j = \sum_k z_k, \quad (4)$$

б) при параллельном соединении n элементов

$$1/\sqrt{z_j} = \sum_n \left(1/\sqrt{\left(\sum_k z_k \right)} \right). \quad (5)$$

Гидравлическое сопротивление для наиболее характерных случаев

$$z_k = \begin{cases} z_{\text{уск}} = (1/\rho_1 - 1/\rho_2)/S^2 - \text{для ускорения среды;} \\ z_{\text{тр}} = \lambda(\ell_{\text{тр}}/d_r)/(2\bar{\rho}S^2) - \text{трения;} \\ z_{\text{м}} = \begin{cases} \xi_{\text{м}}/(2\bar{\rho}S_{\text{эв}}^2) - \text{местного условно-постоянного сопротивления;} \\ 1/(2\bar{\rho}\mu^2 F^2) - \text{местного переменного сопротивления.} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь ρ – плотность среды; S – сечение прохода среды; $\ell_{\text{тр}}$ – расчетная длина канала; d_r – гидравлический диаметр; λ – коэффициент гидравлического трения; $\xi_{\text{м}}$ – коэффициент местного гидравлического сопротивления; μ – коэффициент расхода; $F=f(h)$ – площадь проходного сечения под регулирующим органом (РО) переменного гидравлического сопротивления (трубопроводная энергетическая арматура (ТЭА); направляющие аппараты (НА) тягодутьевых механизмов (ТДМ)) (h – величина перемещения (ход) РО). Индексы: 1 – вход; 2 – выход; $\bar{\rho}$ – среднее значение; м – местный; уск – ускорение; тр – трение; экв – эквивалентный.

При моделировании динамики процессов технологических систем в качестве переменных гидравлических сопротивлений прежде всего следует рассматривать ТЭА и НА ТДМ, с помощью которых осуществляется воздействие на теплогидравлические процессы. Конструктивные характеристики ТЭА (зависимость площади проходного сечения от хода РО: $F_i/F_{\text{max}}=f(h_i/h_{\text{max}})$) прини-

маются по справочным данным [16], паспортным характеристикам или по данным натурных испытаний в зависимости от типа ТЭА.

Рассмотренные предложения позволяют путем введения в расчетную схему теплогидравлического контура фиктивной ТЭА (см. рис. 4) имитировать нарушение плотности теплогидравлического участка переменного (задаваемого) значения сечения с истечением в окружающую теплообменную среду (например, разрыв трубопровода или сосуда, находящегося под избыточным давлением; нарушение плотности вакуумной системы конденсатора турбоустановки; разрыв трубной системы поверхностного теплообменного аппарата; повышенные присосы воздуха в газовый тракт котлоагрегата).

5. Динамика теплообмена элементов гидравлического тракта описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1'' V_1 \frac{dh_1''}{d\tau} &= G_1 (h_1' - h_1'') + \bar{\alpha}_1 F_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_m), \\ M_m c_m \frac{d\bar{t}_m}{d\tau} &= \bar{\alpha}_1 F_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_m) + \bar{\alpha}_2 F_2 (\bar{t}_2 - \bar{t}_m), \\ \rho_2'' V_2 \frac{dh_2''}{d\tau} &= G_2 (h_2' - h_2'') + \bar{\alpha}_2 F_2 (\bar{t}_m - \bar{t}_2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь ρ – плотность, h – теплосодержание, t – температура, c – теплоемкость, α – коэффициент теплоотдачи, F – поверхность, V – объем, M – масса, G – расход; индексы: 1 – греющая среда, 2 – нагреваемая среда, ' – на входе, '' – на выходе, m – металл, $\bar{}$ – среднее значение.

Моделирование процессов гидро-, паро-, газодинамики и тепломассообмена во всех режимах реализовано в реальном масштабе времени по отношению к энергоблоку, взятому за основу при создании тренажера. Предусмотрена функция перехода к ускоренному масштабу времени работы модели блока.

Математическая модель процесса расширения пара в турбине основывается на представлении проточной части турбины как последовательности паровых объемов, разделенных сопротивлениями и учитывает тепловое состояние металла системы «статор-ротор».

Модель абсолютных и относительных тепловых перемещений в системе «статор-ротор» цилиндров турбоустановки реализована на общих методах теории прочности представления сложных геометрических элементов конструкций корпусов и роторов цилиндров эквивалентными стержнями и оболочками, а неравномерности распределения температур в них представлены действием эквивалентной системы сил и моментов. При этом используются температурные поля роторов и корпусов, полученные в ходе расчёта процесса расширения пара с учётом теплового состояния металла турбоустановки. Значения абсолютных и относительных удлинений определяются путём алгебраического суммирования соответствующих составляющих по участкам, на которые разбивается упруго-связанная система элементов «статор-ротор». В качестве участков, на которые разбивается проточная часть турбины, как и при построении математической модели процесса расширения пара, выступают отсеки, то есть участки с постоянным расходом пара.

Имитационная математическая модель изменения виброхарактеристик турбоагрегата во всех режимах его работы реализована на основе теории колебаний для системы соединенных роторов турбины, сопряженных с ротором генератора. Так как виброхарактеристики измеряются на подшипниковых опорах турбоустановки, то моделируется изменение виброхарактеристик (виброперемещение, виброскорость) в трех плоскостях на каждой подшипниковой опоре.

В качестве базы модели процессов горения и тепловыделения в топочной камере котлоагрегата (КА) принят нормативный метод теплового расчета котельных агрегатов [14]. Данный метод расчета предполагает предопределенность в качестве исходных данных температур обогреваемой среды и дымовых газов, соблюдение баланса топливо–воздух–вода. По заданной точности расчет требует ряда последовательных приближений.

Отличие реализованной модели состоит в том, что тепловыделение в топке рассчитывается безытерационным методом по факту количества и условий поступления топлива и воздуха при текущем состоянии газовоздушного и водопарового трактов для любого режима работы КА. В общей постановке задачи модель горения предполагает сжигание любых топлив, любого качества (например, обводненного мазута), в том числе и в смеси.

Определенные параметры горения в топке позволяют далее провести зонный расчет тепломассообмена по газовому и водопаровому трактам КА.

Гидравлический и газовоздушный тракты котла разбиваются на следующие участки, рассматриваемые как объекты с сосредоточенными параметрами (рис. 5): нижнюю радиационную часть (НРЧ), среднюю радиационную часть (СРЧ), верхнюю радиационную часть (ВРЧ), фронтальный потолочный экран и экраны поворотной камеры (ФПЭ + ЭПК), ширмовый пароперегреватель (ШПП), подвесные трубы конвективной шахты (ПТКШ), конвективный пароперегреватель высокого давления (КПП ВД), второй конвективный пароперегреватель низкого давления (КПП НД-2), первый конвективный пароперегреватель низкого давления (КПП НД-1), водяной экономайзер (ВЭК), регенеративный воздухоподогреватель (РВП), калориферы.

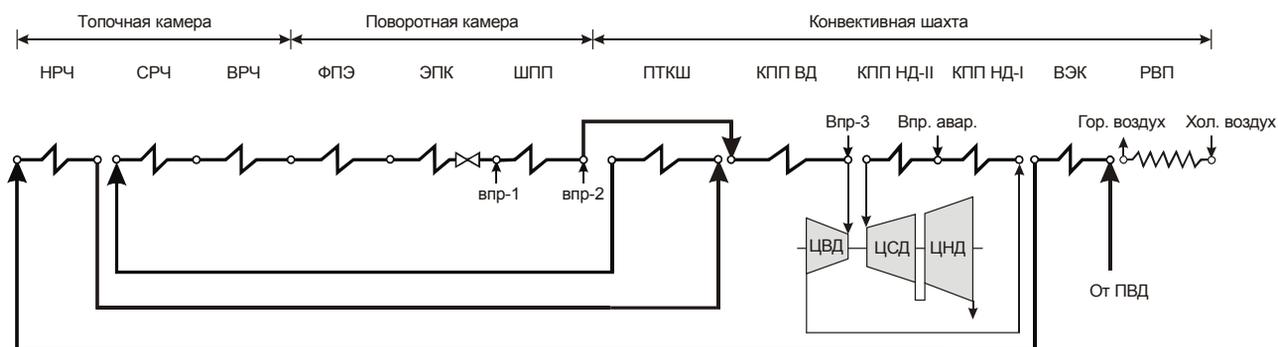


Рис. 5. Расчетная схема одного потока водопарового тракта

Алгоритм расчета модели блока.

1. Цикл расчета параметров модели принят постоянным и равным 0,1 с с учетом устойчивости решения системы уравнений модели блока.

2. В начале цикла расчета значения всех входных параметров модели считаются известными по результатам предыдущего шага расчета. Все необходимые значения параметров модели размещаются в общей базе данных, постоянно обновляемой в конце вычислительного цикла модели блока.

3. Производится расчет паро-, газодинамики по всем подсистемам модели блока. В результате определяются давления в расчетных узлах трактов и расходы через расчетные участки.

4. На каждом цикле расчета всех параметров модели, при известных параметрах гидравлики, рассчитывается теплообмен в пределах каждого участка.

5. По результатам расчета динамики теплогидравлики всех подсистем модели блока с любой рабочей средой в конце каждого шага вычислительного процесса определяются необходимые теплофизические параметры греющей и нагреваемой сред и тепловое состояние металла во всех расчетных точках модели блока.

6. Рассчитываются положения РО переменных гидравлических сопротивлений ($\bar{h}_i = h_i / h_{\max}$): регулирующей, запорной, отсечной, предохранительной ТЭА, специальной арматуры и НА ТДМ блока. Расчет производится с учетом внесенных управляющих воздействий системой автоматического управления (САУ) и операторами в условиях дистанционного и ручного управления. Одновременно рассчитываются положения фиктивной арматуры, определяющей величины проходных сечений неплотностей (разрывов) участков трубопроводов, теплообменных поверхностей и аппаратов. Управление фиктивной арматурой осуществляется с АРМа инструктора для имитации отклонений, нарушений и отказов со стороны теплогидравлики в работе оборудования блока. Здесь же задаются отказы в работе элементов САУ и системы управления исполнительными механизмами блока.

7. По конструктивным характеристикам ТЭА и НА ТДМ определяются площади проходных сечений под РО по известным зависимостям $\bar{F}_i = f(\bar{h}_i)$.

8. По рассчитанным значениям теплофизических параметров сред [16], конструктивным и гидравлическим характеристикам элементов оборудования определяются гидравлические сопротивления расчетных участков.

9. В конце цикла расчета известны все текущие параметры модели энергоблока. Параметры сохраняются с возможностью архивации в форме файла исходного состояния модели любого временного снимка режима работы блока.

Объем моделирования. В объем моделирования компьютерного тренажера [15] входят: состав технологических схем и оборудования блока; система контроля и управления; система защит и блокировок оборудования; перечень режимов нормальной эксплуатации; перечень нарушений и отказов в работе оборудования блока; пределы моделирования; удаленное автоматизированное рабочее место (АРМ) инструктора для подготовки, управления и протоколирования результатов тренировки.

Модель блока-прототипа включает:

- 31/25 видеофрагментов схем со всем оборудованием, управляемым с БЩУ. (Здесь и далее в числителе – для газомазутного блока 300 МВт, в знаменателе – для пылеугольного);
- 16/21 видеофрагментов панелей пульта управления: нагрузкой блока; 21/30 насосным агрегатом; 6/6 тягодутьевыми механизмами и их направляющими аппаратами; 59/83 регуляторами в автоматическом и дистанционном режимах; 430/561 электрифицированной и ручной запорной арматурой в режимах дистанционного (с панелей управления) и ручного («по месту» – с видеофрагментов схем) управления; 20/21 предохранительными устройствами; 6/6 ключами останова блока;
- оперативный контроль: 228/342 показывающих и регистрирующих приборов, сгруппированных на видеопанели; 182/188 табло предупредительной и аварийной сигнализации; 370/506 трендов;
- 42/22 защит: общеблочных, котлоагрегата, турбины, генератора, вспомогательного оборудования. Алгоритмы функционирования защит и блокировок, заложенных в модель, адекватны алгоритмам блока-прототипа.

Перечень моделируемых режимов нормальной эксплуатации предусматривает:

- пуски из любого теплового состояния;
- нагрузку и разгрузку блока во всем энергетическом диапазоне его работы;
- останов блока с расхолаживанием турбины и без расхолаживания турбины.

Пределы моделирования тренажера включают: выполнение подготовительных, пусковых и остановочных операций; ручное, дистанционное и автоматическое управление оборудованием в нормальных, с отклонениями и аварийных режимах работы блока в соответствии с положениями инструкции по эксплуатации энергоблока-прототипа.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) инструктора. Предложенная и разработанная модель АРМа (рис. 6) прежде всего позволяет инструктору в любой момент времени ведения на тренажере соответствующего режима работы блока снять снимок всех параметров модели и сохранить в базу данных исходных состояний блока в соответствии с темой тренировки.

Для формирования сценария противоаварийной тренировки инструктор может в модель состояния блока внести условия возникновения аварийной ситуации. Отклонения в состоянии оборудования из-за изменения пропускной способности, повышенного гидравлического сопротивления, ухудшения условий теплообмена; нарушения в работе элементов управления и отказы оборудования блока могут задаваться в любом сочетании. Инструктор имеет возможность задать условия ситуации в период подготовки тренировки или в процессе ее выполнения, как по времени ее возникновения от начала тренировки, так и по условию достижения объектом определенного состояния.



Рис. 6. Функциональные возможности выделенного АРМа инструктора тренировки

Данные возможности АРМа инструктора позволяют существенно расширить тематику противоаварийной подготовки операторов на тренажере и использовать его для анализа различных режимов работы блока.

Верификация модели тренажера. Под верификацией математической модели тренажера [15] понимается процедура подтверждения результатов расчета параметров и величин технологических процессов на тренажере для стационарных, нестационарных и переходных режимов энергоблока-прототипа путем сопоставления их с экспериментальными, проектными и расчетными данными.

Проверка точности моделирования стационарных режимов проводилась для всего энергетического диапазона работы энергоблока с привлечением данных тепловых испытаний, режимных карт и проектных материалов. Вычисленные в тренажере параметры технологического процесса соответствуют параметрам блока-прототипа в пределах установленных [15] значений отклонений.

Достоверность моделирования нестационарных режимов нормальной эксплуатации [15] определялась как достижение соответствия изменения параметров на тренажере изменению параметров на энергоблоке-прототипе в идентичных условиях.

Адекватность модели нестационарных режимов нормальной эксплуатации, характеризующихся непостоянством значений контролируемых параметров, проверялась сравнением результатов имитации пуска блока из холодного состояния на тренажере с результатами регистрации значений контролируемых параметров, снятых при пуске блока-прототипа по специальной программе ис-

пытаний. За весь период пуска регистрировалось более 200 шт. аналоговых и дискретных параметров с малыми интервалами времени, в совокупности дающих подробную картину ведения режима персоналом блока. Воспроизведение режима на тренажере выполнялось в соответствии с инструкцией по эксплуатации блока-прототипа с соблюдением последовательности операций, регламентируемых скоростей и интервалов времени.

В табл. 2 и 3 представлены результаты оценки отклонений вычисленных в модели тренажера (Т) основных параметров и величин технологического процесса для трех уровней мощности энергоблока (Б).

Таблица 2. Оценка точности моделирования на тренажере стационарных режимов турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ для различных уровней мощности энергоблока

Наименование величины	Ед. измерения	Диапазон измерительного канала	δх, %	δх для уровней мощностей, %								
				100			70			40		
				Б	Т	δх, %	Б	Т	δх, %	Б	Т	δх, %
Вакуум в конденсаторе	мм.рт.ст.	760	0,5	722,5	724,0	0,20	730,6	730	0,08	736,5	735,0	0,20
Давление пара в СК ЦВД	кгс/см ²	400	2,0	237,0	241,5	1,13	200,0	210,0	2,50	127,0	118,0	1,43
Температура пара в СК ЦВД	°С	600	2,0	538,0	544,3	1,05	540,0	544,8	0,80	541,0	544,7	0,62
Давление пара в камере РС	кгс/см ²	250	2,0	170,0	165,2	1,92	116,0	115,1	0,36	68,1	63,2	1,96
Давление пара за 6-й ступ.	кгс/см ²	250	2,0	99,0	94,0	2,00	80,0	78,0	0,80	40,0	39,0	0,40
Темп-ра пара за 6-й ступ.	°С	600	2,0	398,8	400,0	0,20	377,0	385,0	1,33	407,0	405,0	0,33
Давление на выходе ЦВД	кгс/см ²	50	2,0	38,0	39,0	2,00	32,0	33,0	2,00	16,0	16,0	0
Давление пара в ОК ЦВД	кгс/см ²	300	2,0	35,5	36,0	0,17	30,0	30,0	0,00	14,0	13,8	0,07
Темп-ра пара в ОК ЦВД	°С	600	2,0	546,0	543,0	0,50	547,0	546,0	0,17	546,0	545,0	0,17
Давление на выходе ЦСД	кгс/см ²	10	2,0	1,2	1,3	1,00	0,7	0,8	1,00	-0,14	-0,1	0,40
Темп-ра на выходе ЦНД	°С	100	2,0	33,3	32,5	0,80	28,8	29,1	0,30	25,7	26,3	0,60

Таблица 3. Оценка точности моделирования на тренажере стационарных режимов котлоагрегата ТГМП-314 (топливо: мазут) для различных уровней мощности энергоблока

Наименование величины	Ед. измерения	Диапазон измерительного канала	δх, %	δх для уровней мощностей, %								
				100			70			40		
				Б	Т	δх, %	Б	Т	δх, %	Б	Т	δх, %
Расход топлива*	т/ч	100	2,0	74,9	70,5	4,40	48,0	49,2	1,20	31,7	31,4	0,30
Паропроизводительность**	т/ч	510	2,0	475,0	474,3	0,14	320,0	322,0	0,39	200,0	199	0,20
Давление острого пара за котлом	кгс/см ²	400	2,0	255,0	248,4	1,65	210,0	216,8	1,70	124,0	120,9	0,77
Темп-ра острого пара за котлом	°С	600	2,0	545,0	545,2	0,03	541,0	545,7	0,78	544,0	540,0	0,67
Давление пара ХПП	кгс/см ²	60	10,0	39,2	40,4	2,00	25,3	28,7	5,67	15,4	16,2	1,33
Температура пара ХПП	°С	600	10,0	292,0	292,2	0,03	288,0	278,4	1,60	295,0	300,0	0,83
Температура пара ГПП	°С	600	2,0	543,0	544,9	0,32	543,0	545,8	0,47	545,0	540,0	0,83
Давление п.в. перед котлом	кгс/см ²	400	2,0	305,0	312,2	1,80	240,0	250,0	2,50	191,0	188,0	0,75
Темп-ра п.в. перед котлом	°С	300	1,0	271,0	272,0	0,33	247,0	253,6	2,20	222,0	223,2	0,40
Расход п.в. на котел	т/ч	1200	2,0	950,0	948,2	0,15	640,0	643,7	0,31	400,0	398,8	0,10
Температура среды до ВЗ котла	°С	600	2,0	437,0	444,4	1,23	430,0	438,5	1,42	418,0	396,0	3,67
Температура среды за СРЧ	°С	600	2,0	399,0	395,6	0,57	356,0	379,3	3,88	318,0	336,7	3,12
Температура среды за ВРЧ	°С	600	2,0	407,0	410,0	0,50	368,0	392,9	4,15	329,0	346,0	2,83
Темп-ра острого пара за КПП ВД	°С	600	2,0	545,0	545,2	0,03	541,0	545,7	0,78	544,0	540,0	0,67
Темп-ра острого пара за 3-м впр.	°С	600	2,0	545,0	544,9	0,02	541,0	544,8	0,63	543,0	544,8	0,30
Темп-ра пара до аварийного впр.	°С	600	10,0	496,0	456,9	6,52	502,0	463,5	6,42	501,0	477,2	3,97
Темп-ра пара за аварийным впр.	°С	600	2,0	457,0	456,9	0,02	450,0	461,9	1,98	471,0	473	0,33
Темп-ра уходящих газов за ДС	°С	200	10,0	157,0	162,5	2,75	152,0	152,7	0,35	136,0	146,0	5,00

ХПП, ГПП – соответственно паропроводы холодной и горячей сторон конвективного пароперегревателя низкого давления (КПП НД); КПП ВД – конвективный пароперегреватель высокого давления; ВЗ – встроенная задвижка котла; ДС – дымосос; Б – блок-прототип; Т – тренажер. Примечание. * – расход мазута в модели тренажера определялся при нормативной влажности 3%; ** – для одного потока двухниточной схемы парового тракта котлоагрегата.

На рис. 7 приведены зависимости изменения некоторых параметров энергоблока при пуске из холодного состояния от момента розжига горелок до перехода с ПЭН на ПТН.

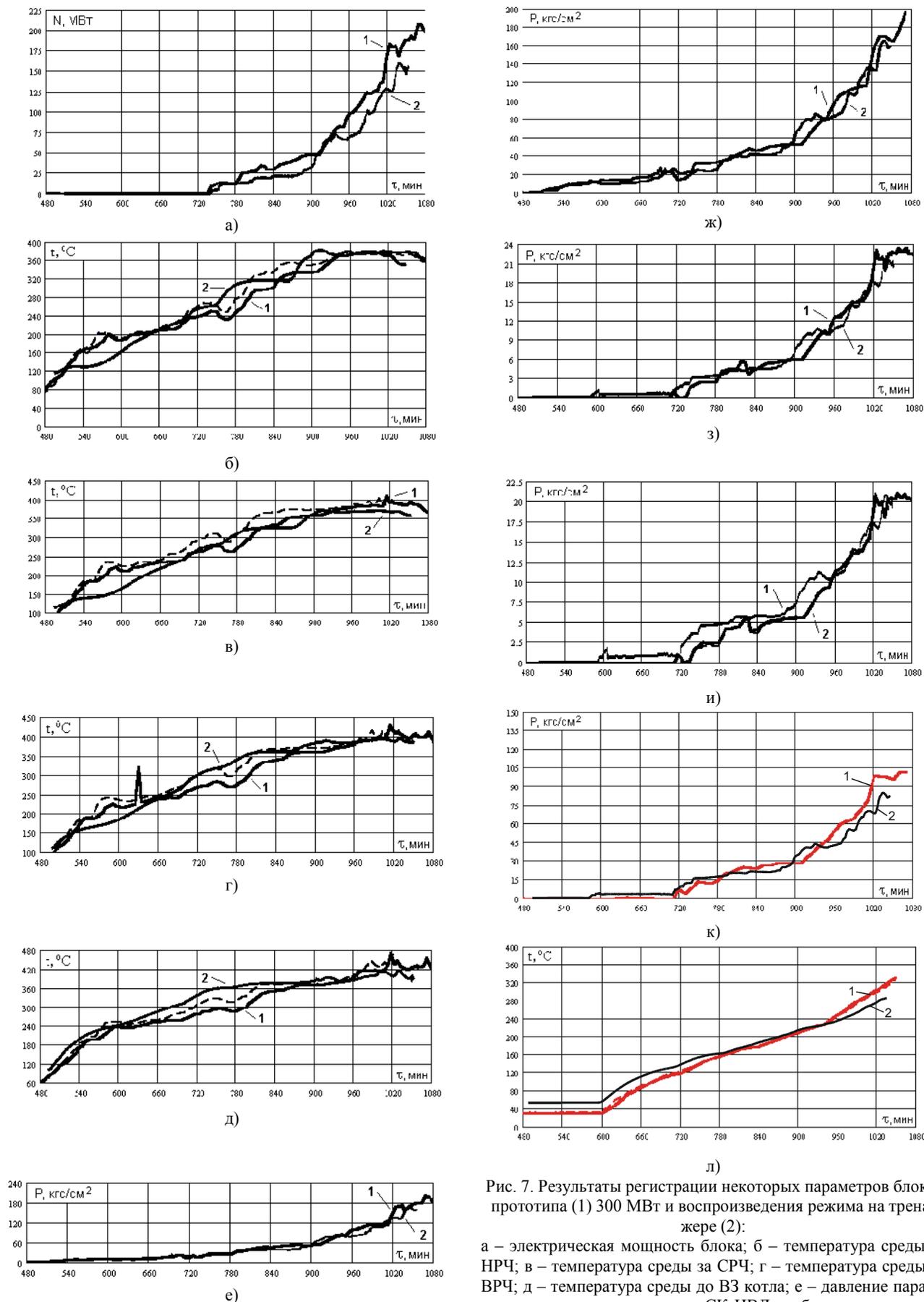


Рис. 7. Результаты регистрации некоторых параметров блока-прототипа (1) 300 МВт и воспроизведения режима на тренажере (2):

а – электрическая мощность блока; б – температура среды за НРЧ; в – температура среды за СРЧ; г – температура среды за ВРЧ; д – температура среды до ВЗ котла; е – давление пара за котлом; ж – давление пара в СК ЦВД турбины; з – давление пара ЦВД турбины; и – давление пара ППП перед ЦСД турбины; к – давление пара в камере РС; л – температура металла фланцев ЦВД (низ).

Сравнительный анализ результатов регистрации пуска блока и воспроизведения на нелинейной модели тренажера показывает, что рассчитываемые и натурные переходные процессы по длительности, последовательности и скоростям изменения параметров отличаются незначительно. Некоторое отличие изменения параметров процессов на тренажере объясняется невозможностью достичь точного повторения действий операторов и САР при выполнении пусковых операций на блоке.

Библиографический список

1. О совершенствовании эксплуатации турбинного оборудования ТЭС. Приказ РАО «ЕЭС России» №307 от 23.08.1999 г. – М.: РАО «ЕЭС России». – 20 с.

2. О первоочередных мерах по повышению надежности работы ЕЭС России. – Оперативное указание ОУ-08-01-ВП РАО «ЕЭС России» от 22.01.2001 г. – М.: РАО «ЕЭС России». – 3 с.

3. Программа внедрения компьютерных тренажеров на электростанциях ОЭС Центра. – М.: Центрэнерго, 1997. – 3 с.

4. Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики / А. В. Мошкарин, М. А. Девочкин, Б. Л. Шелыгин, В. С. Рабенко; Под ред. А. В. Мошкарин; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 256 с.

5. Рабенко В. С., Мошкарин А. В. Повышение безопасности, надежности, экономичности и продление срока службы оборудования предприятий тепловой энергетики средствами новых компьютерных технологий подготовки оперативного персонала / Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №2. – С. 31-39.

6. РД 34.12.102-94. Правила организации работы с персоналом на предприятиях и в учреждениях энергетического производства / Утв. РАО «ЕЭС России» 29.04.94; Разраб. Департамент генеральной инспекции по экспл. электростанций и сетей, Севзапэнергонадзор, Центрэнергонадзор, Южэнергонадзор, Департамент эксплуатации энергосистем и электрических станций, Дирекция по работе с персоналом и подготовке кадров РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 1994. – 62 с.

7. Правила работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 110 с.

8. Рабенко В. С. Компьютерный тренажер энергоблока 300 МВт. Свидетельство №2001610871 от 18.07.2001 г. – М.: Роспатент.

9. РД 153-34.0-12.305-99. Нормы годности программных средств подготовки персонала энергетики / Утв. РАО «ЕЭС России» 02.06.99; Разраб. Департамент генеральной инспекции по эксплуатации электростанций и сетей и финансового аудита, АО ГВЦ энергетики, МГУ, Новочеркасский гос. ун-т; Южный центр подготовки кадров «Южэнергонадзор»; Срок действ. установлен с 01.10.99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 36 с.

10. Свидетельство РАО «ЕЭС России» № 19 о соответствии «Нормам годности программных средств подготовки персонала энергетики» компьютерного тренажера энергоблока 300 МВт / Регистр. 31.08.02.

11. Программно-технический комплекс «Квинт» / Н.М. Курносов, В.В. Певзнер, А.Г. Уланов, Е.А. Яхин // Теплоэнергетика. – 1993. – №10. – С. 2–10.
12. ГОСТ 26387-84. Система человек-машина. Термины и определения.
13. Сетевой компьютерный тренажер для комплексной подготовки оперативного персонала тепловых электрических станций / Э. К. Аракелян, В. П. Зверьков, В. Ф. Кузицин и др. // Вестник МЭИ. – 1998. №3 – С. 15–20.
14. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод).- М.: Энергия, 1973. – 295 с.
15. РД ЭО 0278-01. Требования к техническим средствам обучения для подготовки персонала атомной станции / Утв. концерном «Росэнергоатом» 2001; Разраб. ГП ВНИИАЭС.- 50 с.
16. Арматура энергетическая для ТЭС и АЭС: Отраслевой каталог. – М., НИИ эконом. в энерг. машиностроении, 1986. – 247 с.