

УДК 621.311

М. А. ДУЭЛЬ, д-р техн. наук, профессор

Г. И. КАНЮК, д-р техн. наук, профессор

Т. Н. ФУРЦОВА, канд. техн. наук, доцент

Е. Н. БЛИЗНИЧЕНКО, ассистент

Украинская инженерно – педагогическая академия, кафедра теплоэнергетики и энергосбережения, г. Харьков

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

*Рассмотрены способы автоматического определения энергетических характеристик энергооборудования в темпе технологических процессов, необходимых для реализации оптимального управления в иерархической системе «энергоблок – электростанция – энергосистема»*

*Розглянуті засоби автоматичного визначення енергетичних характеристик енергообладнання у темпі технологічних процесів, необхідних для реалізації оптимального керування у ієрархічній системі «енергоблок – электростанція – енергосистема»*

### Постановка задачи

Среди основной информации о работе энергооборудования электростаций, находящихся в составе многоуровневой системы «энергоблок-электростанция-энергосистема», для эффективной эксплуатации энергооборудования и решения многих задач оперативно-диспетчерского управления важное место принадлежат энергетическим характеристикам как энергоблока в целом, так и его отдельных частей.

Определение энергетических характеристик необходимо не только для оптимизации режима электростанции, но и для определения влияния различных нарушений нормального режима работы энергооборудования на его характеристики. Поэтому автоматизация оперативного определения энергетических характеристик энергооборудования является своевременной и актуальной задачей.

Применяемые способы определения энергетических характеристик. Энергетические характеристики могут определяться с помощью специально организованных балансовых испытаний или в ходе нормальной эксплуатации. В зависимости от поставленных перед ними целей испытания подразделяются на [1]:

а) режимно-наладочные, проводимые с целью построения режимных оптимальных карт работы энергооборудования (например, зависимостей оптимального значения коэффициента избытка воздуха от нагрузки энергоблока);

б) режимно-информационные, проводимые для определения статических характеристик (например, расходных характеристик и характеристик удельных приростов) или для определения степени нарушения нормального режима работы энергооборудования (например, при отключении воздухоподогревателя, дымососа или дутьевого вентилятора и т. п.);

в) эксплуатационные, проводимые после капитального ремонта или реконструкции, при переходе на другой вид топлива, при появлении систематических отклонений параметров от нормальных значений и т. п.;

г) специальные, проводимые для выявления характеристик отдельных элементов энергоблоков (пароперегревателя, водяного экономайзера, воздухоподогревателя, циркуляционной системы и т. п.) или с целью определения их состояния;

д) приемно-сдаточные, проводимые с целью проверки гарантированных заводом-поставщиком технико-экономических показателей энергооборудования.

Они проводятся при постоянной нагрузке, на расчетном виде топлива, при чистых

поверхностях нагрева, при минимальных колебаниях всех параметров и соблюдении других необходимых условий.

Из-за сложности современного энергооборудования, особенностей его эксплуатации, большого объема экспериментальных данных, а также сложности их математической обработки экспериментаторы сталкиваются с необходимостью регистрации большого объема первичной информации и выполнения значительного количества достаточно трудоемких вычислений для получения конечных результатов эксперимента. Многие из этих работ приходится выполнять вручную, что приводит к существенному удлинению сроков получения результатов испытаний, не обеспечивает их требуемой точности и значительно снижает производительность труда работников, проводящих подобные испытания.

На период испытаний обычно устанавливают дополнительные самопишущие приборы, подключаемые к датчикам через различного рода согласующие приставки. Однако в случае необходимости одновременной регистрации большого числа параметров такая система становится громоздкой, а использование для этого многоточечных приборов ведет к нежелательному увеличению временного интервала регистрации каждого параметра, т. е. к потере части информации.

Кроме того, многочисленные приборы требуют значительных затрат труда для настройки и тарировки при подготовке к проведению испытаний.

Необходимо также отметить, что для снятия любых характеристик энергооборудования обычно требуются длительные испытания (4–24 часа, а иногда и более). Это объясняется инерционностью тепловых процессов и, следовательно, затратами времени на переходный процесс с одного режима на другой, а также большими внешними и внутренними возмущениями во время эксплуатации, которые часто невозможно предотвратить даже при специально организованных испытаниях (например, неравномерность подачи и изменения качества топлива). В связи с необходимостью проведения активного эксперимента появляются дополнительные потери за счет нарушения хода нормальной эксплуатации электростанции (например, потери топлива из-за нарушения оптимального распределения нагрузок между блоками при определении их расходных характеристик).

Отмеченные обстоятельства затрудняют оперативное использование энергетических характеристик для качественной эксплуатации энергооборудования и обуславливают принятую на большинстве электростанций практику их определения только после капитальных ремонтов оборудования или каких-либо значительных работ по его реконструкции. Это соответствует периодическому обновлению энергетических характеристик примерно через 1,5–2 года. Естественно, что подобные энергетические характеристики не могут быть эффективно использованы для реализации сформулированных задач АСУ ТЭС [2].

Использование средств вычислительной техники для автоматизации определения энергетических характеристик. Использование средств вычислительной техники в АСУ энергоблоками позволяет автоматизировать процесс экспериментального определения различных характеристик энергооборудования. При этом могут быть оптимизированы планы экспериментов и обработка их результатов. Синхронный ввод данных от ряда измеряемых параметров в информационные или управляющие вычислительные машины, также вычислительные возможности процессора позволяют проводить первичную обработку исходных данных в темпе с экспериментом, определять статистики отдельных параметров и связь между ними, а также вести отбраковку явных сбоев и выявлять нарушения технологического режима при испытаниях. Получение информации в более емком, сжатом виде после предварительной обработки на вычислительной машине значительно уменьшает затраты на дальнейшую обработку полученных данных, а также позволяет корректировать планы эксперимента по ходу его проведения.

В последнее время вычислительные машины на электростанциях начинают все шире применять для проведения различных экспериментов и анализа получаемых результатов.

Так, в работах [3, 4] освещен опыт Центрального научно-исследовательского института

комплексной автоматизации (ЦНИИКА) по использованию УВМ типа “Комплекс”, эксплуатирующейся на блоке 200 МВт Змиевской ТЭС, для определения статических, энергетических и экстремальных характеристик этого блока, а также проведения балансовых испытаний парогенератора типа ТП-100. С помощью УВМ, установленной на энергоблоке 800 МВт Славянской ТЭС, Центральный котлотурбинный институт имени И. И. Ползунова (ЦКТИ) проводил испытания этого блока с целью определения некоторых динамических характеристик [3]. На японской электростанции Тамасиме в функции УВМ, установленной на блоке 350 МВт, входит проведение балансовых испытаний парогенератора и определения ряда характеристик, необходимых для контроля за техническим состоянием турбогенератора при нестационарных режимах [2].

Большие возможности вычислительных систем по приему, переработке, хранению и анализу значительных объемов информации обусловили разработку новых методов проведения и обработки результатов эксперимента. Некоторые из этих методов, разработанных применительно к определению энергетических характеристик энергооборудования, приведены в [1, 5].

Для более эффективного использования систем обработки и анализа информации в АСУ различными объектами сейчас начали разрабатывать специальную аппаратуру и программы, обеспечивающие работу этих систем в режиме диалога с человеком.

Анализ работ по проведению эксперимента с помощью вычислительных систем позволяет наметить следующие основные функции системы автоматизации экспериментов в АСУ ТЭС [1, 6]:

- 1) сбор и регистрация данных, поступающих от испытуемого объекта;
- 2) хранение и экспресс-анализ экспериментальных данных;
- 3) реализация алгоритмов планирования экспериментов;
- 4) автоматизированное управление процессами эксперимента;
- 5) обработка и интерпретация результатов проведенного эксперимента;
- 6) накопление данных по серии экспериментов и их статистическая обработка;
- 7) обеспечение возможности непосредственного оперативного общения экспериментатора с объектом исследования;
- 8) оформление и выдача результатов обработки экспериментальных данных в форме, удобной для последующего использования.

Ниже перечислены основные задачи, для которых необходимы энергетические характеристики энергооборудования.

Для оптимизации режимов энергоблоков: составление режимных оптимальных карт работы энергоблока, т. е. зависимости управляющих воздействий от контролируемых параметров технологического процесса (например, зависимость оптимального избытка воздуха от активной нагрузки генератора; зависимость динамических настроек регулятора от нагрузки парогенератора или активной нагрузки генератора и т. д.); определение сроков профилактических и капитальных ремонтов; оценка эффективности от проведения организационно-технических мероприятий (например, оценка эффекта от ремонта отдельных видов оборудования и т. п.).

Для оптимизации режима электростанции (энергосистемы): распределение активной и реактивной энергетических нагрузок по блокам с выбором оптимального состава основного оборудования; распределение видов используемого топлива по блокам; оптимизация поддержания вакуума; оптимизация графика проведения организационно-технических мероприятий, текущих и капитальных ремонтов и т. д.

Естественно, что по мере развития и совершенствования АСУ ТЭС круг задач, для решения которых необходимо определение энергетических характеристик, будет непрерывно расширяться.

При создании системы управления экспериментами очень важно оценить их основные свойства. По классификации, предложенной в [1], рассматриваемые эксперименты могут быть

локальными (определение характеристик отдельных видов энергооборудования) или сложными универсальными (проведение балансовых испытаний энергоблока). Они также могут быть как пассивными, так и активными с оптимальным управлением и комбинированным видом моделей (детерминированными и стохастическими).

Необходимо подчеркнуть, что проведение любого эксперимента всегда связано с участием человека-оператора.

Точность характеристик играет существенную, а иногда определяющую роль. Например, показано, что использование неточных расходных характеристик при распределении активных нагрузок методом равенства удельных приростов может привести не к выигрышу, а к существенным пережогам топлива [1]. Поэтому очень важны вопросы оценок точности получаемых характеристик и учет их в алгоритмах управления. Однако многие из этих вопросов до сих пор полностью не решены, а для решения некоторых из них принятые нормативные метрологические характеристики средств измерения явно недостаточны. В дальнейшем при разработке методик определения характеристик необходимо ориентироваться на новые идеи в нормировании метрологических характеристик средств измерения.

Следует также отметить, что пока нерешены многие проблемы приема и обработки исходной информации о работе энергоблока. В частности, имеются еще не все требуемые унифицированные датчики необходимой точности и соответствующей номенклатуры.



Рис. 1. Схема использования результатов экспериментального определения энергетических характеристик энергоблока ТЭС

карт.

При разработке планов экспериментов задача обычно делится на две части (рис. 1) – планирование однофакторных и многофакторных экспериментов. Это традиционное

На рис. 1 приведена укрупненная схема общей задачи определения энергетических характеристик применительно к энергоблоку ТЭС. Стрелками показан путь прохождения информации и порядок выполнения работ при снятии характеристик.

*Информационные статистические характеристики.* Эти характеристики отражают состояние энергооборудования и режим работы энергоблока. Для их определения обычно нет необходимости изменять настройки регуляторов. Однако при их снятии необходимо фиксировать условия проведения эксперимента.

*Режимные оптимальные карты.* Эти характеристики отражают зависимость оптимального значения управляющих воздействий от контролируемых технологических параметров. Очевидно, что при их снятии необходимо проведение внутренних экстремальных экспериментов. Следовательно, определение информационных характеристик полностью входит как составная часть в методику определения режимных оптимальных

разделение связано с различным математическим аппаратом, применяемым на стадии планирования и на стадии первичной обработки результатов экспериментов. Многофакторный эксперимент необходим для определения и коррекции входных данных, приведенных к номинальным условиям. Полученные корректирующие выражения и коэффициенты используются при обработке результатов экспериментов. Кроме того, они же используются в дальнейшем при корректировке полученной для нормальных условий характеристики с целью использования ее в условиях эксплуатации.

В статистическую обработку результатов входят первичная обработка получаемых данных, отбраковка с целью выявления явных сбоев и нарушений режимов, оценка основных параметров аппроксимации, определение точности аппроксимации и сравнение получаемых результатов.

Энергоблок является сложным многосвязанным объектом управления. Кроме контролируемых параметров, определяющих условия проведения эксперимента и влияние которых поддается коррекции, имеется еще ряд неконтролируемых параметров, влияющих на характеристики и приводящих к их дрейфу во времени. Поэтому необходимо обновление характеристик, для чего нужно определять их временные статистические свойства. Методика обновления должна давать ответ на вопрос, с каким периодом и в каком объеме должна поступать новая информация. Для оптимального решения этого вопроса необходимо знать, для чего используется получаемая характеристика, а также оценить потери, связанные с уменьшением достоверности и точности, и потери, связанные с получением добавочной информации.

Следует подчеркнуть, что временные и статистические свойства энергетических характеристик сами по себе являются во многих случаях важными критериальными параметрами в алгоритмах оптимизации (например, при определении сроков ремонта оборудования).

Приведенная на рис. 1 схема использования результатов экспериментального определения энергетических характеристик энергооборудования носит в известной мере условный характер. Связи между ее отдельными частями отражают сложившиеся к настоящему времени у большинства работников АСУ ТП представления о задачах оптимизации режима ТЭС. Естественно, что по мере накопления опыта разработки и внедрения АСУ ТЭС и АЭС возможно появление и других вариантов подобной схемы.

Методология и алгоритмы определения энергетических характеристик, а также примеры их экспериментального определения на энергоблоках мощностью 200 и 300 МВт приведены в [1, 5, 7].

Примеры использования оперативных энергетических характеристик в автоматизации общестанционных задач управления ТЭС. Основное внимание до настоящего времени уделялось автоматизации технологическими процессами энергоблоков, в результате чего удалось обеспечить достаточно надежную, маневренную, и экономичную эксплуатацию энергооборудования. Что даже касается автоматизации общестанционных задач управления электростанцией в целом, то она пока ограничена только отдельными частными примерами, и не получила дальнейшего использования и развития.

Так, в 1970–1980 г.г. на Змиевской ТЭС мощностью 2400 МВт (6 блоков по 200 МВт и 4 блока по 300 МВт) была создана и внедрена в опытную эксплуатацию I очередь АСУ ТЭС. В ее состав входили подсистемы управления: энергоблоками, общестанционными объектами управления, общестанционными технологическими процессами ТЭС. Структура и результаты I очереди АСУ Змиевской ТЭС приведены в [4, 5].

Наибольший интерес представляют результаты от разработки и опытно-промышленной эксплуатации подсистемы оптимизации управления нагрузкой всех 10-ти энергоблоков ТЭС.

Известно, что для регулирования генерируемой электроэнергии в энергосистемах привлекаются все более мощные энергоблоки конденсационных ТЭС. При участии блочной ТЭС в регулировании нагрузки энергосистемы (энергообъединения) нормальный режим ее работы характеризуется значительной нестабильностью. Плановый график нагрузки такой станции становится существенно переменным,

причем фактическая нагрузка часто отличается от плановой. Переменным становится также состав основного оборудования, несущего нагрузку, т.е. часть блоков периодически выводятся в резерв. При использовании нескольких видов сжигаемого топлива часть из них может лимитироваться по интенсивности поступления на ТЭС или по потреблению за определенный период.

Увеличение неравномерности нагрузок в энергосистеме, частые колебания нагрузки ТЭС, значительная разница между прогнозируемым диспетчерским графиком и действительным значением нагрузки, существенная зависимость реальных характеристик энергоблоков от параметров режима и внешних воздействий – все это увеличивает нагрузку оперативного диспетчерского персонала ТЭС при выполнении требований наиболее экономичного распределения нагрузки между энергоблоками. В то же время даже незначительные ошибки в решении этой задачи приводят к существенным экономическим потерям.

При этих условиях в работе оперативно-диспетчерского персонала ТЭС особенно актуальное значение приобретает оптимизация нормального режима работы электростанции. Целью такой оптимизации является повышение экономичности и сохранности оборудования, т. е. достижения минимума приведенных затрат на выработку энергии при соблюдении целого ряда ограничений. К основным из них относятся необходимость выполнения диспетчерских графиков нагрузки ТЭС и расхода лимитируемого вида топлива, а также ограничения, связанные с технологическим процессом.

Можно выделить три основные задачи оптимизации режима ТЭС: выбор состава основного оборудования ТЭС на определенный период с целью минимизации затрат ТЭС на выработку электроэнергии, включая затраты на пуски (остановки) энергоблоков; распределения видов сжигаемого топлива между энергоблоками (при наличии лимитируемого вида) на определенный период или оперативно с целью минимизации расхода лимитируемых видов топлива и стоимости операций перехода с одного вида топлива на другой; распределение активной нагрузки ТЭС между энергоблоками на определенный период или оперативно с целью минимизации суммарного расхода топлива.

Получение использования достаточно точных и адекватных в каждый момент времени энергетических характеристик энергооборудования является необходимой информационной базой для решения рассматриваемых задач.

Методы решения отмеченных выше задач могут быть различны. Выбор того или иного метода определяется конфигурацией и степенью достоверностью используемых энергетических характеристик оборудования, а также трудоемкостью соответствующего метода, учитывая необходимость оперативной оптимизации режима ТЭС. Сложность методов решения; большой объем информации, который оперативно-диспетчерский персонал ТЭС должен перерабатывать в короткий промежуток времени; достаточно высокая цена ошибки, – все это обуславливает необходимость автоматизации процесса решения рассматриваемых задач.

При создании I-ой очереди АСУ Змиевской ГРЭС ЦНИИКА были проведены работы по автоматизации оперативно-диспетчерского управления ТЭС, которые легли в основу одной из первых отечественных автоматизированных систем управления, мощностью блочной ТЭС «Румб». Эта система на основании фактической информации о технологическом процессе определяет рабочие энергетические характеристики энергоблоков и оптимальную характеристику удельных приростов ТЭС, а затем распределяет нагрузку ТЭС между энергоблоками. Как составные части в эту систему входят распределение видов сжигаемого топлива и подготовка данных для решения задачи выбора состава основного оборудования.

Для решения задачи распределения нагрузки, система «Румб» предусматривает ряд режимов, требующих участие человека в управлении («Прогноз», «Совет», «Помощь»), а также режим автоматического управления мощностью – «Автомат». Распределение нагрузок во всех режимах, кроме «Прогноз» производится в реальном масштабе времени. Режим «Автомат» предполагает воздействие на блочную часть автоматической системы управления мощностью САУМ (или САУР ЧМ) в виде

поправки к распределению, учитывающей более полное и точное знание характеристик энергообъекта. Особенности системы, а также основные результаты ее опробования приведены в [4, 5].

В качестве примера автоматизации общесистемных задач управления может быть приведена Конаковская ТЭС (Россия) с 6 энергоблоками мощностью по 200 МВт, на которой поэтапно внедрялись автоматизированные системы экономического управления (АСЭУ) ТЭС. Разработкам АСЭУ ТЭС проводилась Белорусским филиалом ЭНИМ АН СССР, а ее структура и результаты имеются в [2]. Наконец, в качестве еще одного примера автоматизации решения общестанционных задач управления ТЭС следует упомянуть о реализации в составе I очереди АСУ Змиевской ТЭС определения ТЭП 6 энергоблоков по 200 МВт (№№ 1–6) [1], и этой же задачи для блоков по 800 МВт (№№ 5, 6 и 7) Запорожской ТЭС [3]. Приведенные примеры убедительно свидетельствуют об актуальности автоматизации общестанционные задач управления ТЭС, которые неразрывно связаны как с задачами управления энергоблоками, так и управлением ТЭС в составе энергосистемы, и которым пока уделялось недостаточное внимание.

### Выводы

1. Автоматическое определение энергетических характеристик энергооборудования необходимо для оптимально управления энергопроизводством в системе «энергоблок-электростанция-энергосистема».

2. Необходимо проанализировать накопленный опыт решения этих задач на отдельных опытно-экспериментальных объектах ТЭС и использовать его для реализации этой задачи на эксплуатирующихся АСУ энергоблоках ТЭС.

3. По прогнозам отечественных и зарубежных специалистов автоматическое определение энергетических характеристик энергооборудования в темпе производственного процесса даст существенный эффект [1, 6, 7].

### Список литературы

1. Дуэль М. А. Применение ЭВМ для определения энергетических характеристик энергооборудования ТЭС / М. А. Дуэль, Б. Л. Соляник, А. Е. Шульман. М.: Энергия, 1976. – 119 с.
2. Дуэль М. А. Автоматизация объектов и технологических процессов ТЭС / М. А. Дуэль, А. В. Приходько. – Х.: ФЛП Федорко М. Ю., 2011. – 436 с.
3. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками ТЭС и АЭС / М. А. Дуэль. – Х.: ЧП «КиК», 2006. – 420 с.
4. Дуэль М. А. АСУ тепловой электростанции / М. А. Дуэль, В. П. Мережко, М. М. Просветов. – К.: Техника, 1977. – 120 с.
5. Просветов М. А. АСУ Змиевской ГРЭС / М. А. Просветов, М. А. Дуэль, Б. Л. Соляник // Электрические станции, 1973. – № 5. – С. 73–75.
6. Дуэль М. А. Алгоритмическое обеспечение автоматизированных систем управления энергоблоками электростанций / М. А. Дуэль. – Х.: Знание, 2000. – 283 с.
7. Дуэль Т. Л. Использование технико-экономической информации в АСУ тепловых электростанций / Т. Л. Дуэль. – Х.: ЧП «КиК», 2006. – 256 с.

### AUTOMATION OF DETERMINATION OF ENERGY FEATURES OF ENERGY EQUIPMENT

M. O. DUEL, D-r Scie. Tech. Pf., G. I. KANJUK, D-r Scie. Tech., Pf.  
T. N. FURSOVA, Cand. Tech. Scie., associate prof., E. N. BLIZNITSHENKO,  
assistant

*This article is devoted to the methods of the automatic determination of energy features of energy equipment in the technological process necessary for the realization of optimal direction in the hierarchical system “block of energy – electric station – system of energy”.*

Поступила в редакцию 14.12.2012 г.