

УДК 621.311.22/23

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

**А.М. КЛЕР, А.С. МАКСИМОВ, Е.Л. СТЕПАНОВА**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, Иркутск*

Разработана методика построения быстродействующих математических моделей теплофикационных турбоустановок, использование которых позволяет проводить оперативную оптимизацию режимов работы крупных промышленно-отопительных ТЭЦ. Предложены подходы к идентификации математических моделей паровых турбоустановок по результатам замеров их параметров. Представлен пример идентификации параметров паровой турбоустановки Т-100/120-130. На основе оптимизационных расчетов режимов работы промышленно-отопительной ТЭЦ построена ее эквивалентная энергетическая характеристика при заданной тепловой нагрузке внешних потребителей.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН на протяжении длительного времени разрабатываются математические модели энергетического оборудования теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) [1], которые позволяют проводить расчеты с достаточно большой точностью, однако требуют значительных затрат машинного времени. При вариантных расчетах технологических схем ТЭЦ такие затраты не являлись существенным затруднением, однако при оптимизации режимов работы, когда число обращений к расчету схем оборудования превышает сотни, а то и тысячи, проблема оптимизации (быстродействия) моделей встает достаточно остро. Поэтому для задачи оптимизации режимов при оперативном управлении работой ТЭЦ возникла необходимость в разработке “быстродействующих” математических моделей основного энергетического оборудования, такого как паровые котлы и теплофикационные турбоустановки. Быстродействующие математические модели паровых котлов основаны на представлении КПД котла в виде функции его паропроизводительности, температур питательной воды на входе в экономайзер котла и воздуха, на входе в его воздухоподогреватель. Успешное использование такого подхода обусловлено тем, что паровой котел связан с другими элементами технологической схемы ТЭЦ небольшим количеством связей. Это позволяет представить его КПД с высокой точностью, как достаточно простую функцию (например, полином) от небольшого числа входных параметров. При построении такой зависимости используется подробная модель котла, что обеспечивает точность быстродействующей модели.

Наиболее сложной, требующей больших вычислительных ресурсов является задача расчета паровых теплофикационных турбоустановок. В такой задаче число входных параметров достаточно велико, как правило, более десяти. Влияние каждого такого параметра на выходные параметры существенно зависит не только от его значения, но и от значений других входных параметров. Это делает построение

быстродействующих математических моделей теплофикационных турбоустановок сложной задачей, для решения которой до настоящего времени отсутствовали эффективные методы.

#### ЗАДАЧА РАЗРАБОТКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБИН

Для разработки быстродействующих моделей турбоустановок использовался метод, основанный на расчетах с привлечением подробной модели турбоустановки в узлах заранее заданной многопараметрической сетки. Суть данного подхода заключается в следующем: имеется  $n$  параметров, являющихся входными для модели  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ; известны пределы изменения каждого из них; меняя параметры в известных пределах с выбранным шагом, с помощью точной модели определяется  $m$  выходных параметров  $y_1, y_2, \dots, y_m$ . Таким образом, получаем набор выходных параметров, рассчитанных в узловых точках сетки. Быстрый расчет по такой сетке производится путем интерполяции выходных параметров по ближайшим к заданной точке узловым точкам сетки, являющимся вершинами  $n$ -мерного прямоугольного параллелепипеда (число таких вершин равно  $2^n$ ). Координаты узлов сетки, ближайших к заданной точке  $x_i$ , определяются из следующих условий:

$$\begin{aligned} x_i^{k_i} &= x_i^0 + \Delta x_i (k_i - 1), \\ x_i^{k_i} &\leq x_i^3 \leq x_i^{k_i+1}, \quad i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $k_i$  — номер искомого узла сетки  $i$ -ого параметра,  $x_i^{k_i}$  — значение  $i$ -го входного параметра в  $k_i$  точке сетки,  $x_i^0$  — начальное (при построении сетки) значение  $i$ -го входного параметра,  $\Delta x_i$  — шаг сетки изменения  $i$ -го входного параметра,  $x_i^3$  — значение  $i$ -го входного параметра в заданной точке.

Координаты угловых точек параллелепипеда, используемые при интерполяции, определяются всеми возможными комбинациями найденных указанным способом пар координат  $x_i^{k_i}, x_i^{k_i+1}$  отдельных входных параметров. В общем виде задача состоит в поиске такой функции  $f^j$   $j$ -го выходного параметра  $y_j$ , от входных параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , значения которой в вершинах найденного указанным выше способом параллелепипеда будут равны значениям выходного параметра  $y_j$  в угловых точках. С помощью этой функции определяется значение  $y^t$  в текущей точке  $x_1^t, \dots, x_n^t$ . В качестве такой функции предлагается использовать полином вида

$$\begin{aligned} f^j(x_1, x_2, \dots, x_n) &= a_0 + \sum_{l_1=1}^n a_{l_1}^j x_{l_1} + \\ &+ \sum_{l_1=1}^{n-1} \sum_{l_2=l_1+1}^n a_{l_1 l_2}^j \prod_{h=1}^2 x_{l_h} + \dots + \sum_{l_1=1}^{n-n+1} \sum_{l_2=l_1+1}^{n-n+2} \dots \sum_{l_n=l_{n-1}+1}^n a_{l_1 l_2 \dots l_n}^j \prod_{h=1}^n x_{l_h}. \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты полинома  $a_0, a_1, \dots, a_{l_1 \dots l_n}$  определяются из системы линейных алгебраических уравнений, задающих равенства  $f^j$  и  $y_j$  во всех угловых точках параллелепипеда:

$$y^j = f^j(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), \quad (3)$$

где  $i = 1, \dots, 2^n$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Такой подход позволяет решить задачу с достаточной точностью, однако при большом количестве входных параметров  $n$  он может ни только не привести к ускорению расчетов, но и значительно их замедлить из-за резкого возрастания требуемого числа узлов многомерной сетки. Кроме того, хранение файла сетки потребует больших объемов памяти компьютера. Поэтому создание сетки для турбоустановки в целом оказалось практически неразрешимой задачей, поскольку в ней имеется более десятка входных параметров. Для преодоления этой трудности целесообразно разделить турбоустановку на части (в каждой из которых число входных параметров не более 5–6) и разработать быстродействующие модели, используя многомерные сетки для каждой части. Для расчета турбоустановки в целом производится итерационная увязка быстродействующих моделей ее частей.

В результате инженерного анализа признано целесообразным разделить теплофикационную турбоустановку на следующие части:

1. Турбоустановка без конденсатора.

Входные параметры модели этой части турбоустановки: расход, давление и энтальпия свежего пара, давление пара перед регулирующей диафрагмой, расход питательной воды через регенеративные подогреватели высокого давления (ПВД), давление пара на входе в конденсатор, расход и энтальпия сетевой воды перед сетевыми подогревателями.

Выходные параметры модели — расход и энтальпия пара на входе в конденсатор, энтальпия и расход основного конденсата после регенеративных подогревателей низкого давления (ПНД), расход и энтальпия конденсата после ПВД, расходы пара на сетевые подогреватели, энтальпия сетевой воды после бойлеров и мощность турбоустановки.

2. Паровой конденсатор.

Входные параметры математической модели конденсатора: расход и энтальпия пара на входе, расход и входная энтальпия охлаждающей воды, расход и входная энтальпия воды теплофикационного пучка.

Выходные параметры модели конденсатора — давление пара в конденсаторе, выходные энтальпии охлаждающей воды, воды теплофикационного пучка и конденсата.

В результате расчет турбоустановки сводится к итерационному расчету с использованием двух быстродействующих упрощенных математических моделей собственно турбоустановки и конденсатора. При этом требуется задавать начальное значение давления пара в конденсаторе турбоустановки. Первоначально проводится расчет упрощенной математической модели собственно турбоустановки при заданном давлении в конденсаторе, в результате чего определяется энтальпия пара на входе в конденсатор. Затем производится расчет конденсатора и уточняется давление пара в нем.

Следует отметить, что выше речь шла о входных параметрах, совместно влияющих на выходные (основные). Кроме того, среди входных параметров турбоустановки можно выделить параметры (дополнительные), влияние которых на основные можно учитывать независимо друг от друга. Это происходит из-за малого отклонения данных параметров от некоторых базовых значений. На отклонение дополнительного параметра от его базового значения вводятся поправки.

Суммируя значение  $j$ -го выходного параметра, полученного с использованием основной сетки с поправками по всем дополнительным параметрам, определим окончательное значение  $j$ -го выходного параметра:

$$y_j = f^t(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{t=1}^h \varphi_t^j [(z_t - r_t), x_1, x_2, \dots, x_n], \quad (4)$$

где  $h$  — количество дополнительных входных параметров,  $z_t, r_t$  — базовое и расчетное значения дополнительного входного параметра соответственно,  $\varphi_t^j$  — поправка к значению выходного  $j$ -го параметра  $y_j$  на отклонение значения  $t$ -го дополнительного параметра от базового значения.

Введение поправок  $\varphi_t^j$  значительно увеличивает точность расчета выходных параметров.

При расчете многомерной сетки, координатами которой являются основные параметры (основная сетка), дополнительные параметры принимаются равными базовым значениям при расчете каждого выходного параметра. Для учета отклонения значения каждого дополнительного параметра от базового так же вводится своя дополнительная сетка. Координатами ее узлов являются значения основных параметров и данного дополнительного.

Следует отметить, что фактическое состояние оборудования ТЭЦ меняется в ходе эксплуатации. Так, может происходить занос солями проточной части турбины, загрязнение теплообменных поверхностей конденсатора, регенеративных подогревателей и т. п. Для учета этого требуется корректировка (идентификация) коэффициентов моделей элементов турбоустановки по результатам текущих замеров ее параметров [2, 3].

Ранее проводимые в ИСЭМ СО РАН исследования, связанные с идентификацией математических моделей, определили следующий подход к решению задачи [3]:

$$\min_{x_n^i, x_3^i, \theta} f(y^i, x_n^i, x_3^i, \theta), \quad (5)$$

при условиях:

$$H(y^i, x_n^i, x_3^i, \theta) = 0, \quad (6)$$

$$G(y^i, x_n^i, x_3^i, \theta) \geq 0, \quad (7)$$

$$\left| x_{3j}^i - \overline{x_{3j}^i} \right| \leq \psi \sqrt{\sigma_{xj}}, \quad (8)$$

$$\left| y_{3j}^i - \overline{y_{3j}^i} \right| \leq \psi \sqrt{\sigma_{yk}}, \quad (9)$$

$$f^i = \sum_{j=1}^N \frac{\left( x_{3j}^i - \overline{x_{3j}^i} \right)^2}{\sigma_{xj}} + \sum_{k=1}^M \frac{\left( y_{3k}^i - \overline{y_{3k}^i} \right)^2}{\sigma_{yk}}, \quad (10)$$

$$f = \sum_{i=1}^R f^i, \quad (11)$$

где  $i = 1, \dots, R, j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M, R$  — количество рассчитываемых режимов,  $N$  — размерность векторов  $x_3^i$ ,  $M$  — размерность векторов  $y_3^i$ ,  $x_3^i$  — вектор измеряемых параметров  $i$ -го режима, являющихся входными для математической

модели турбоустановки,  $x_{\text{H}}^i$  — вектор не измеряемых параметров  $i$ -го режима, являющихся входными для математической модели турбоустановки и используемых в оптимизационных расчетах,  $\theta$  — вектор коэффициентов уточняющихся в процессе идентификации математической модели турбоустановки (внутренний относительный КПД отсеков, их пропускная способность, КПД регенеративных и сетевых подогревателей и т. д.),  $x_3^i$  — вектор измеряемых параметров  $i$ -го режима, являющихся выходными для математической модели турбоустановки,  $\sigma$  — параметр, учитывающий погрешность прибора измерения,  $f$  — функция, учитывающая отклонения параметров, рассчитываемых с помощью математической модели  $\left(\overline{x_{3j}^i}, \overline{y_{3k}^i}\right)$ , от замеров, полученных на турбоустановке  $\left(x_{3j}^i, y_{3k}^i\right)$ ,  $\psi = 3$ .

Условия (8) и (9) требуют, чтобы разность между найденными в результате решения представленной оптимизационной задачи параметрами турбоустановки и их замерами не превышала трех среднеквадратичных погрешностей замера.

Данный подход позволяет решать задачу с хорошими замерами, однако их точность не всегда отвечает условиям (8) и (9). Для выделения плохих замеров в настоящей работе решалась следующая задача:

$$\min_{\psi, x_{\text{H}}^i, x_3^i, \theta} \psi \quad (12)$$

при условиях (6)–(9).

О качестве замеров можно судить по значению  $\psi$  в точке решения этой задачи.

При величине значительно больше 3 можно считать, что среди всех замеров есть плохой замер. Причем ограничения, относящиеся к плохим замерам в точке решения задачи, являются активными, т. е. равные нулю. Эти замеры должны быть отброшены.

Такой подход к решению этой задачи позволяет выявлять плохие замеры и исключать их из состава ограничений в процессе идентификации параметров математической модели.

В качестве примера рассмотрим идентификацию коэффициентов математической модели турбоустановки Т-100/120-130 и разработку ее быстродействующей модели. Упрощенная технологическая схема этой турбоустановки приведена на рис. 1.

Точки замеров, а также параметры, определяемые в соответствующих точках, представлены на рис. 1. В число регистрируемых параметров входили такие основные показатели турбоустановки, как расход, температура и давление свежего пара и питательной воды, а также давление и температура в каждом отборе и на выхлопе турбины, и ряд других параметров.

С помощью программно-вычислительного комплекса “Системы машинного построения программ для персональных компьютеров” [1, 4] была сгенерирована программа поверочного расчета турбоустановки на языке программирования Fortran.

Общее количество замеренных параметров равно 49, 10 из них являются информационно-входными для математической модели турбоустановки, 39 — информационно-выходными. Количество коэффициентов математической модели, уточняемых в процессе идентификации, — 53.

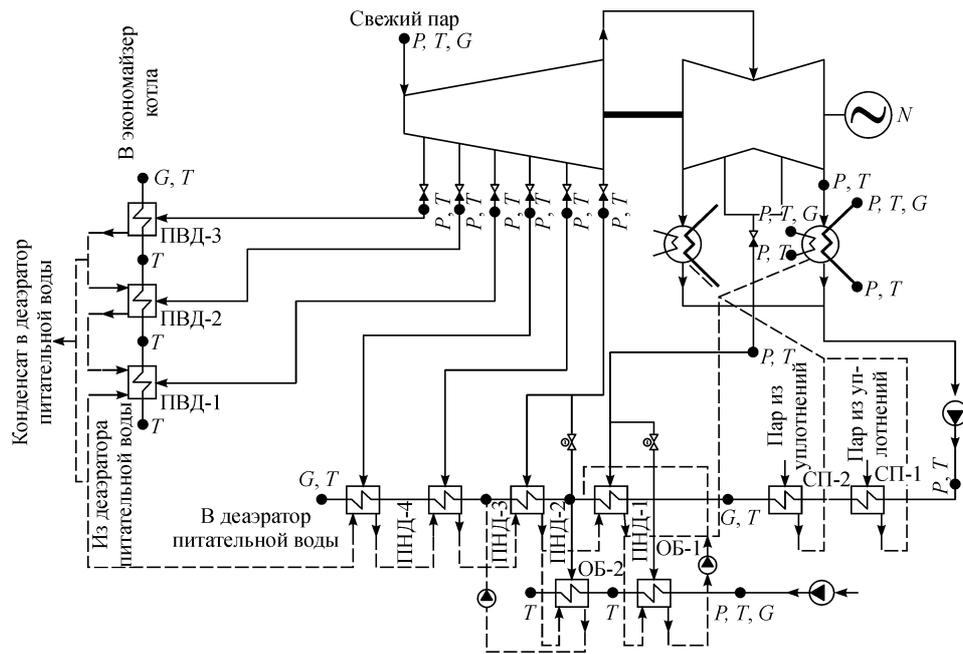


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбины Т-100/120-130.

1 — цилиндр высокого и среднего давления, 2 — цилиндр низкого давления, 3 — конденсатор, 4 — конденсатный насос, 5 — сальниковые подогреватели, 6 — подогреватели низкого давления, 7 — подогреватели высокого давления, 8 — сетевые подогреватели, 9 — сетевой насос.

Коэффициенты математической модели турбоустановки, полученные в результате идентификации, были использованы в подробной математической модели турбоустановки для расчета сетки.

Для первой части математической модели турбоустановки входными параметрами являются: расход свежего пара на турбину, давление пара перед регулирующей диафрагмой, давление пара в конденсаторе, расход сетевой воды, энтальпия сетевой воды перед первым сетевым подогревателем ОБ-1.

Выходные параметры — расход и энтальпия основного конденсата, энтальпия сетевой воды после второго сетевого подогревателя ОБ-2, энтальпия питательной воды после ПВД, расход и энтальпия конденсата на выходе из ПВД, расходы греющего пара на сетевые бойлеры, расход и энтальпия пара на входе в конденсатор, электрическая мощность турбоустановки.

Помимо основных пяти параметров выделяются еще три дополнительных: расход питательной воды через ПВД турбоустановки, энтальпия и давление свежего пара перед турбоустановкой.

Для проведения расчетов с помощью основной сетки, необходимо по заданной точке найти ближайшие к ней  $2^n$  узловых точки сетки (в данном случае  $n = 5$ , соответственно число точек — 32). Далее, для определения коэффициентов интерполяционной формулы, решаем  $m = 11$  системы уравнений вида (3).

Дополнительными параметрами в расчетах были приняты отношение расхода питательной воды через ПВД турбоустановки к расходу свежего пара, энтальпия свежего пара и давление свежего пара. Для расчета основной сетки их базовые значения были выбраны равными 1, 840.0 ккал/кг и 130.0 кгс/см<sup>2</sup>.

В качестве основных входных параметров второй части (конденсатора) быстродействующей математической модели турбоустановки принимаются: расход и энтальпия пара на входе, расход и энтальпия циркуляционной воды, расход и энтальпия воды, проходящей через теплофикационные пучки конденсатора.

В качестве выходных параметров принимаются: давление пара в конденсаторе, энтальпия циркуляционной воды на выходе и энтальпия воды на выходе из теплофикационного пучка.

Дополнительных входных параметров в этой части нет.

#### ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ

Для оценки эффективности полученной быстродействующей модели турбоустановки были проведены расчеты с использованием точной математической модели, быстродействующей модели без учета поправок на дополнительные параметры и расчеты с учетом этих поправок в 234 точках. Время, затраченное для выполнения 234 расчетов, с использованием этих моделей составило:

- быстродействующая математическая модель без поправок на значения дополнительных параметров — 1,41 с;
- быстродействующая математическая модель с поправками на значения дополнительных параметров — 1,73 с;
- точная математическая модель — 17,37 с.

Средние погрешности определения выходных параметров с учетом поправок и без их учета, по отношению к точной модели, приведены на рис. 2.

Как видно из графика, точность расчета быстродействующей математической модели турбоустановки без учета поправок на дополнительные входные параметры составляет 1,2 %. Введение поправок на дополнительные входные параметры увеличивает точность расчетов, в этом случае средняя погрешность по мощности составляет 0,5 %, что является приемлемым для технических расчетов.

На основе быстродействующих математических моделей котло- и турбоустановок была построена математическая модель крупной промышленно-отопительной ТЭЦ со следующим составом оборудования:

- турбоустановки: 2 x ПТ-60/75-130/13, 4 x Т-100/120-130, 2 x Т-100/120-130-3, 3 x ПТ-135/165-130/13;
- энергетические котлы: 6 x ТГМ-84-140, 5 x ТГМЕ-464-140;
- водогрейные котлы: 2 x ПТВМ-180, 2 x КВГМ-180, 10 x ПТВМ-100.

Упрощенная принципиальная тепловая схема ТЭЦ представлена на рис. 3.

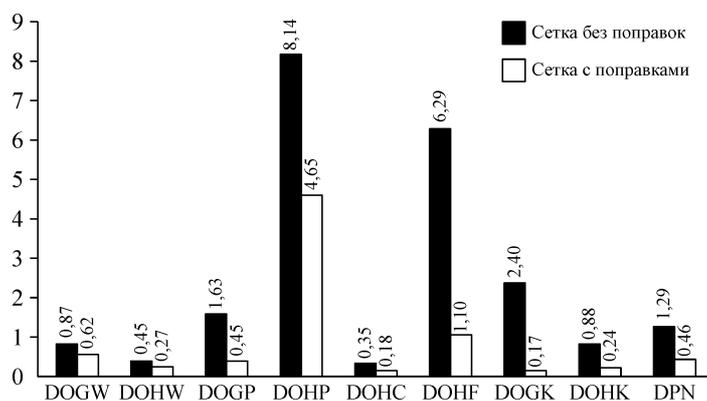


Рис. 2. Средние погрешности выходных параметров с учетом и без учета поправок на входные параметры.

DOGW — средняя погрешность расхода основного конденсата после ПНД, DONW — средняя погрешность энтальпии основного конденсата после ПНД, DOGP — средняя погрешность расхода пара на входе в конденсатор, DONP — средняя погрешность энтальпии пара на входе в конденсатор, DONC — средняя погрешность энтальпии сетевой воды на выходе, DONF — средняя погрешность энтальпии питательной воды на выходе, DOGK — средняя погрешность расхода конденсата после ПВД, DONK — средняя погрешность энтальпии конденсата после ПВД, DPN — средняя погрешность мощности турбины. Единицы измерения величин: энтальпии — ккал/кг, расхода — кг/с, мощности — МВт.

Число оптимизируемых параметров режимов работы этой ТЭЦ составило 51, а число ограничений неравенств — 162. Оптимизационная математическая модель ТЭЦ позволяет производить три вида расчета при заданных тепловых нагрузках внешних потребителей:

1. Максимизация электрической мощности ТЭЦ;
2. Минимизация электрической мощности ТЭЦ;
3. Минимизация расхода топлива котлами ТЭЦ (при заданной электрической мощности ТЭЦ).

На основе этих оптимизационных расчетов могут быть построены эквивалентные энергетические характеристики ТЭЦ, связывающие суммарную электрическую мощность с суммарным часовым расходом топлива (при различных значениях внешней тепловой нагрузки).

Для удобства проведения оптимизационных расчетов режимов работы ТЭЦ и наглядного представления результатов расчетов был разработан “Комплекс программ оптимизации режимов работы ТЭЦ”.

Данный комплекс состоит из 2-х блоков:

- 1) блок оптимизационных расчетов режимов работы ТЭЦ;
- 2) блок идентификации математических моделей турбоустановок и котлов ТЭЦ.

Блок идентификации математических моделей турбоустановок и котлов ТЭЦ производит идентификационные расчеты основного оборудования ТЭЦ на основе замеров параметров в трех режимах работы. После идентификации производятся расчеты основной и дополнительных сеток для каждого агрегата. Результаты расчетов передаются в блок оптимизационных расчетов режимов работы ТЭЦ. Этот

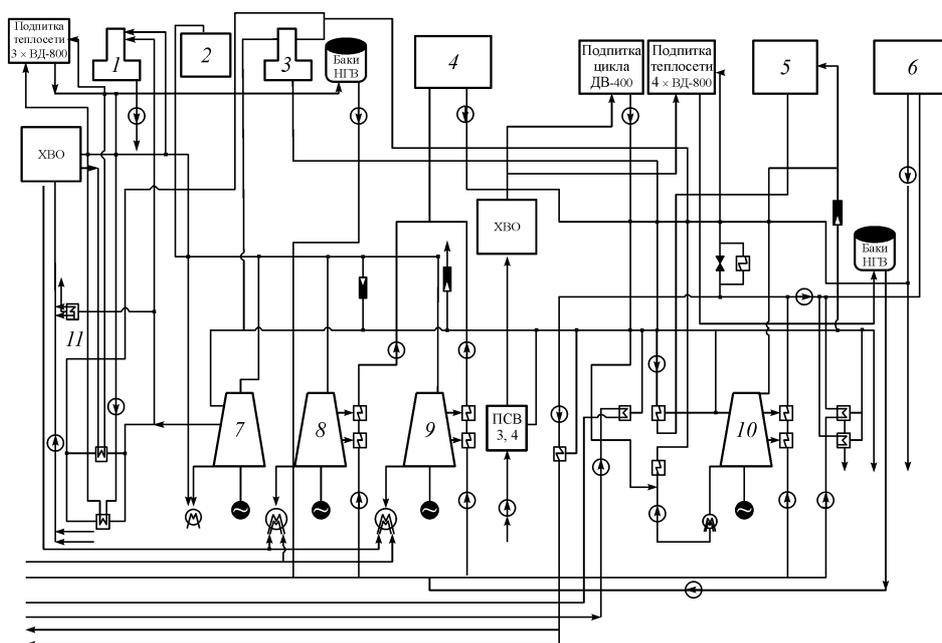
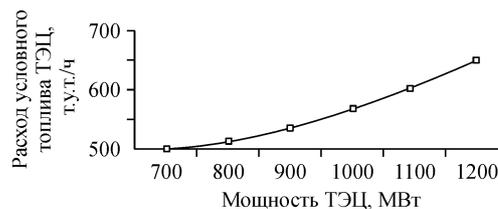


Рис. 3. Упрощенная принципиальная тепловая схема ТЭЦ.

1 — группа деаэраторов ДСА-200, 2 — группа паровых котлов ТГМ-84 (9 шт.), 3 — группа деаэраторов ДСП-500, 4 — группа пиковых водогрейных котлов ПТВМ-100 (10 шт.), 5 — группа паровых котлов ТГМЕ-464 (5 шт.), 6 — группа пиковых водогрейных котлов ПТВМ-180 (2 шт.) и КВГМ-180 (2 шт.), 7 — группа турбин ПТ-60/75-130/13 (2 шт.), 8 — группа турбин Т-100/120-130 (4 шт.), 9 — группа турбин Т-100/120-130-3 (2 шт.), 10 — группа турбин ПТ-135/160-130/13 (3 шт.), 11 — сетевые подогреватели турбин ПТ-60/75-130/13.

Рис. 4. Эквивалентная энергетическая характеристика ТЭЦ при внешней теп-ловой нагрузке котлами, равной 2030 Гкал/ч.



блок позволяет производить оптимизационные расчеты станции, в целом используя быстродействующие математические модели турбоустановок. Кроме того, имеется возможность наглядно представлять результаты расчетов как для станции, так и для отдельных агрегатов.

С помощью “Комплекса программ оптимизации режимов работы ТЭЦ” были рассчитаны энергетические характеристики ТЭЦ. На рис. 4 в качестве примера представлена эквивалентная энергетическая характеристика ТЭЦ, построенная при суммарном отпуске тепла, равном 2030 Гкал/ч.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика построения быстродействующих математических моделей паровых теплофикационных турбоустановок.
2. Разработаны идентификационные математические модели различных теплофикационных турбоустановок, позволяющие производить настройку коэффициентов математических моделей элементов турбоустановки по результатам замеров.
3. Разработаны быстродействующие математические модели турбоустановок ПТ-60/75-130/13, Т-100/120-130, ПТ-135/160-130, позволяющие производить оптимизационные расчеты для ТЭЦ в оперативном режиме ее работы.
4. Разработана математическая модель ТЭЦ с использованием быстродействующих математических моделей турбоустановок.
5. Разработан “Комплекс программ оптимизации режимов работы ТЭЦ”, позволяющий наглядно представлять результаты расчетов, а также производить оперативные изменения исходных данных.
6. Построены эквивалентные энергетические характеристики ТЭЦ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клер А.М., Деканова Н.П., Скрипкин С.К. и др. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. — Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. — 120 с.
2. Максимов А.С. Модернизация СМПП и решение с ее помощью задач адаптации математических моделей теплофикационных турбин // Тр. молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 34: Научно-техн. прогресс в энергетике. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2004. — С. 120–129.
3. Клер А.М., Деканова Н.П., Михеев А.В. Численные методы диагностики оборудования ТЭС // Теплофизика и аэромеханика. — 2000. — Т. 7, № 3. — С. 443–450.
4. Клер А.М., Деканова Н.П., Щеголева Т.П. и др. Методы оптимизации сложных энергетических установок. — Новосибирск: ВО Наука. Сиб. изд. фирма, 1993. — 116 с.

*Статья поступила в редакцию 14 декабря 2005 г.*