

УДК 621.165

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*М.В. СВЕЧКО
(Оршанская ТЭЦ);
канд. техн. наук В.Е. ПИТОЛИН
(Новополоцкая ТЭЦ)*

При построении прикладной расчетной модели какого-либо сложного технологического процесса, например, для целей оценки экономической эффективности принятия тех или иных технических решений (в частности, для экономии расхода топлива) часто требуется создавать расчетные модели объектов, входящих в состав общей модели технологического процесса. Сложные энергетические объекты, к которым относятся энергетические котлы, паровые, газовые турбины, турбогенераторы, многоступенчатые центробежные насосы и вентиляторы, обычно определяются набором нормативных многофакторных энергетических характеристик, представленных в графической форме. Нормативные энергетические характеристики получаются в результате расчетов на этапе проектирования с последующим уточнением во время испытаний опытных образцов. При моделировании на ПЭВМ этих объектов используется метод сплайн-аппроксимации их нормативных энергетических характеристик. В результате получаются достаточно простые и удобные в использовании объекты – модули прикладных программ.

Введение. Создание расчетной модели объекта, явления или процесса для их представления в ПЭВМ обычно базируется на расчетных формулах физического или эмпирического происхождения. Для сложных объектов или процессов, характеризующихся большим (более семи) количеством оптимизируемых параметров, определяющих состояние и поведение объектов, такой подход часто неприемлем, так как требует виртуальных (интерактивных) уточнений при расчетах или введения рекуррентных соотношений для расчета поправок.

Поэтому при моделировании сложных объектов (например, паровых турбин или котлов) предполагается, что используемые в составе этих объектов системы автоматического регулирования в пределах эксплуатационных характеристик не имеют гистерезиса или других неопределенностей регулирования. Такие объекты обычно описываются набором энергетических характеристик, представляемых в графической форме [1] с сокращенным количеством контролируемых параметров.

Для создания расчетных моделей сложных объектов обычно используется аппроксимация опытных данных полиномами второй, третьей и большей степени с погрешностью представления данных 5...30 %. Для снижения погрешностей аппроксимации графических характеристик таких объектов до 1 % и ниже, что уже вполне соответствует требуемой точности построения расчетных моделей, необходимо использовать методы сплайн-аппроксимации [2].

Основная часть. Для создания расчетных моделей использовался метод представления семейства графических характеристик объекта в виде набора кубических сплайнов. Каждый сплайн для обеспечения необходимой точности формируется при вводе координат узловых точек аппроксимируемой кривой и вычисляемого коэффициента нагрузки правого (нагружаемого) конца сплайна. «Весовая» нагрузка определяется координатами контрольной точки на первом отрезке сплайна, наименее устойчивом к так называемой «волнистости» [3].

Основная цель построения имитационных моделей тепловых электростанций – экономия топлива за счет оптимизации схем использования энергетического оборудования [4].

Имитационная модель формируется из совокупности расчетных блоков, связанных между собой. Каждый блок в свою очередь представляет собой расчетную модель отдельного энергетического объекта: питательного насоса, насоса сетевой воды, парового котла, паровой или газовой турбины, генератора электрического тока, т.е. оборудования, на которое составляются эксплуатационные нормативные энергетические характеристики. Другое оборудование тепловых электростанций: теплообменные аппараты различных типов, деаэраторы, конденсаторы, регенерационные установки, тепловые насосы, термокомпрессоры, трубопроводы, задвижки и т.д. с достаточной точностью представлены в модели простыми соотношениями входных и выходных параметров, полученными из теории термодинамики.

Рассмотрим порядок построения имитационной модели на конкретных примерах.

Центробежный питательный насос представляет собой сложную конструкцию, состоящую из 6...10 ступеней сжатия, расположенных на одном приводном валу (турбины или электродвигателя) центробежных колес, связанных последовательно (с выхода предыдущего на вход последующего) лопастными направляющими аппаратами.

Энергетическую характеристику центробежного насоса обычно представляют простой теоретической зависимостью:

$$N = \eta PG, \quad (1)$$

где N – мощность привода центробежного насоса; P – создаваемое избыточное давление (напор) насоса; G – подача (расход) теплоносителя; η – теоретический коэффициент полезного действия (КПД) центробежного насоса.

Однако на практике центробежные насосы одинаковой конструкции могут существенно (на 5...15 %) отличаться по своему КПД, так как имеют различную степень выработки ресурса, состояние проточной части и уплотнений. Поэтому для прикладных вычислений используются их реальные нормативные энергетические характеристики.

Расчетная модель питательного насоса (рис. 1) описывается двумя нормативными энергетическими характеристиками:

- 1) давлением в напорном трубопроводе питательного насоса: $P_n = P''_n(G)$;
- 2) потреблением электроэнергии приводом насоса: $N_n = N''_n(G)$, где n – порядковый номер питательного насоса в схеме тепловой электростанции.

$$N = N''(G) \text{ – электроэнергия на привод питательного насоса}$$

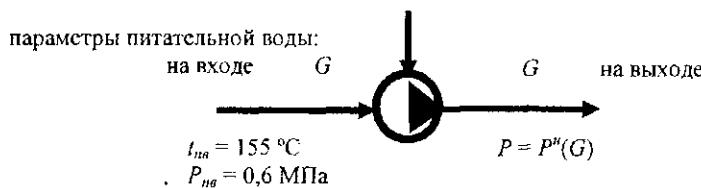


Рис. 1. Расчетная модель центробежного питательного насоса

Характеристики теплоносителя на входе в питательный насос, показанные на рисунке 1, являются нормативными и входят в состав общих нормативных характеристик: давление на входе как подпор (дополнение) к создаваемому напору, а температура учитывается при расчете энталпии теплоносителя на входе в котел – t_{na} .

Если питательные насосы работают на один общий коллектор, то их производительность, а следовательно и потребление электроэнергии определяются решением системы уравнений (2):

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = P''_1(G_1); \\ P_2 = P''_2(G_2); \\ \dots \\ P_n = P''_n(G_n); \\ P = P_1 = P_2 = \dots = P_n; \\ G = \sum_1^n G_n. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Порядок создания расчетной модели парового котла можно рассмотреть на примере котла ТГМ-84 барабанного типа [1].

Котел содержит трубчатый подогреватель питательной воды (экономайзерный участок), испаритель воды (барабан) и пароперегреватель. В топку котла через набор горелок подается топливо (газ, мазут), а также воздух, нагнетаемый дутьевыми вентиляторами.

Подача воздуха на горение топлива и отвод уходящих дымовых газов определен системой автоматического регулирования, в которой величина открытия заслонок дутьевых вентиляторов или частота вращения привода жестко связаны с суммарным расходом топлива в топку котла для обеспечения режима оптимального горения (полного сгорания топлива за определенное время). В свою очередь расход топлива системой автоматического регулирования жестко связан с величиной подачи питательной воды в котел и обеспечивает температуру перегретого пара в заданных пределах (545 ± 5 °C).

Степень открытия питательного клапана для подачи питательной воды в котел определена регулятором давления перегретого пара ($13 \pm 0,2$ МПа).

При построении расчетной модели работающего котла для прикладных экономических расчетов, как правило, достаточно представить котел в виде «черного ящика», обладающего набором эксплуатационных характеристик. Расчетная модель парового котла представлена на рисунке 2.

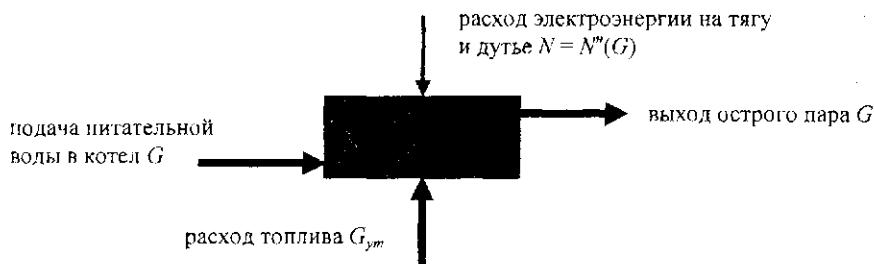


Рис. 2. Расчетная модель парового котла типа ТГМ-84

Расчетная модель котла описывается двумя нормативными энергетическими характеристиками:

1) потреблением электроэнергии на вентиляторы подачи воздуха в топки котла: $N_n = N''_n(G)$;

2) общим КПД парового котла: $\eta_n = \eta''_n(G)$, где n – порядковый номер котла в схеме тепловой электростанции.

В этой модели определены номинальные значения параметров острого пара в выходном коллекторе котла: избыточное давление P_n^{nom} , МПа; температура t_n^{nom} , °C, и соответствующая этим параметрам энталпия острого пара i_n^{nom} , кДж/кг.

Выход острого пара равен величине подачи питательной воды, так как наличие утечек определяет аварийное состояние котла, таким образом $G_{ne} = G_n = G$.

Выход острого пара для котла имеет предельные эксплуатационные ограничения G_n^{\max} и G_n^{\min} .

Работа котла на запредельных режимах возможна, но непредсказуема, так как в любой момент могут сработать системы защиты котла по превышению предельных значений контролируемых параметров, перекрыв поступление топлива.

Температура питательной воды на входе в котел, как и значение выхода острого пара, является принимаемым параметром в расчетной модели объекта и определяется характеристиками других объектов общей расчетной модели тепловой электростанции, в частности подогревателя высокого давления, входящего в состав объекта «турбогенератор».

Энталпия питательной воды рассчитывается по стандартизированному вычислительному алгоритму [5].

Расход электроэнергии на тягодутьевые вентиляторы котла определяется соответствующей нормативной характеристикой $N''_n(G_n)$ и учитывается в общем балансе расхода электроэнергии на собственные нужды тепловой электростанции.

Индивидуальные особенности котла, влияющие на топливоиспользование, определяемые конструктивными и режимными факторами, такими, например, как присосы воздуха, степень сгорания топлива, температура уходящих газов и т.д., определяются нормативной характеристикой КПД котла $\eta''_n(G_n)$.

В модели котла рассчитывается расход условного топлива, имеющего постоянную теплотворную способность $q_{ym} = 29308$ кДж/кг [1].

Перерасчет расхода условного топлива на расход реально используемого топлива с известной теплотворной способностью осуществляется с использованием пропорционального соотношения теплотворных способностей реального и условного топлива.

Расчет расхода топлива на котел осуществляется по формуле (3), определяемой законом сохранения энергии:

$$G_{ym}(G_n) = \frac{G_n(i_n^{nom} - i_{ne})}{q_{ym} \eta''_n(G_n)}. \quad (3)$$

Создание расчетной модели турбогенератора рассмотрим на примере паровой турбины Р-50-130/13, оснащенной электрогенератором с системой внешнего возбуждения.

У турбины отсутствует конденсатор – весь отработавший пар поступает через производственный отбор в коллектор подачи пара на производственные нужды. По этой причине турбина обладает сокращенным набором нормативных энергетических характеристик.

Расчетная модель турбогенератора представлена на рисунке 3.

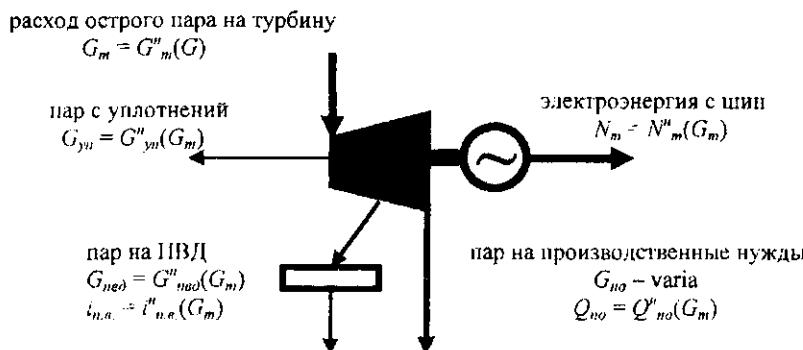


Рис. 3. Расчетная модель турбогенератора Р-50-130/13

Расчетная модель турбогенератора типа Р-50-130/13 описывается шестью нормативными энергетическими характеристиками:

- 1) нормативной характеристикой расхода свежего пара на турбину: $G_m = G''_m(G_{no})$;
- 2) нормативной характеристикой выработки электроэнергии: $N_m = N''_m(G_m)$;
- 3) нормативной характеристикой отпуска тепла с паром в производственный отбор: $Q_{no} = Q''_{no}(G_m)$;
- 4) нормативной характеристикой расхода пара на подогреватель высокого давления: $G_{ne0} = G''_{ne0}(G_m)$;
- 5) нормативной характеристикой подогрева питательной воды в ПВД: $i_{n,a} = i''_{n,a}(G_m)$;
- 6) нормативной характеристикой расхода пара на уплотнения: $G_{yn} = G''_{yn}(G_m)$.

Турбина оснащена подогревателем высокого давления (ПВД) для подогрева питательной воды отборным паром из различных ступеней турбины. Подогреватель может отключаться. По этой причине турбина имеет две группы нормативных энергетических характеристик: с работающим и отключенными ПВД.

Алгоритм расчетной модели турбогенератора содержит ветвление по признаку использования ПВД.

Пар из ПВД и уплотнений поступает на деаэрационную установку и возвращается в цикл в виде конденсата.

Отпуск пара потребителям G_{no} из производственного отбора турбины является задающей величиной и может изменяться в пределах $G_{no\ min}$ и $G_{no\ max}$. Этот параметр определяет количество вырабатываемой электроэнергии и общий расход топлива на выработку электроэнергии.

Турбогенераторы других типов, например ПГ-50-130/7, оснащенные эжекторами и конденсаторами отработавшего пара, имеют более сложные схемы представления нормативных энергетических характеристик и алгоритмы их вычисления, но принципиально не отличаются от уже рассмотренного типа объектов.

Работа электростанции в системе электроснабжения часто требует изменения количества вырабатываемой электроэнергии как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. При этом изменение отпуска пара потребителям обычно не допускается. Для обеспечения регулирования выработки электроэнергии в определенных пределах без изменения количества отпускаемого пара потребителям применяются редукционные охлаждающие устройства (РОУ), позволяющие компенсировать уменьшение расхода пара в производственном отборе при снижении выработки электроэнергии за счет редуцирования острого пара и впрыска питательной воды для ускорения процесса снижения температуры пара до нормативных параметров. Расчетная модель такого устройства показана на рисунке 4.

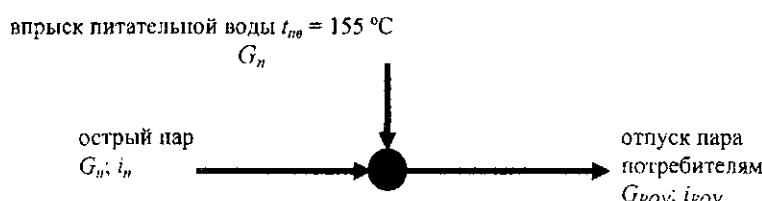


Рис. 4. Расчетная модель редукционного отборного устройства

Нормативные характеристики для данного типа устройства не задаются.

Отпуск пара потребителям определяется как требуемый дополнительный отпуск (регулируемый параметр) G_{POY} , а расход острого пара G_n и питательной воды G_{ne} вычисляется решением системы уравнений баланса тепловой энергии и массы, определяющих для данного устройства условия смешивания потоков пара и воды с различными теплофизическими характеристиками (4):

$$\begin{cases} i_n G_n + i_{ne} G_{ne} = i_{POY} G_{POY}; \\ G_n + G_{ne} = G_{POY}. \end{cases} \quad (4)$$

Построение расчетных моделей теплообменных аппаратов, часто встречающихся в общей тепловой схеме электростанции, не вызывает затруднений. Входные и выходные параметры теплоносителя для этих моделей также определяются уравнениями теплового и материального (при наличии смешивания потоков) баланса (4).

Построение общей имитационной модели тепловой электростанции на основе рассмотренных расчетных моделей отдельных энергетических объектов может встретить ряд трудностей, связанных с объединением объектов в группы, работающие на общие коллекторы. В этом случае расчет входных и выходных параметров объектов необходимо выполнять совместно, используя системы уравнений материального (2) и теплового баланса (4).

Для выполнения оптимизационных расчетов используется параметр G_{po} , который может изменяться в широком диапазоне расходов, выходя за установленные пределы. В этом случае в прикладную расчетную модель тепловой электростанции вводится программный модуль перераспределения мощности между работающими котлами и турбогенераторами согласно задаваемому алгоритму оптимизации.

Заключение. На примере многоступенчатого центробежного насоса, энергетического парового котла, паровой турбины и теплообменного аппарата со смешиванием потоков теплоносителя изложен метод создания расчетных моделей сложных энергетических объектов. Объект представляется в виде «черного ящика», обладающего набором эксплуатационных характеристик, представленных в виде графических или табличных зависимостей. Сплайн-аппроксимации этих характеристик позволяют получить эти зависимости в аналитической форме, которые затем легко встраиваются в программные модули прикладного программного обеспечения для построения расчетных оптимизационных моделей сложных систем, например тепловых электростанций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / В.Я. Рыжкин; под ред. В.Я. Гиршфельда. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
2. Шикин, Е.В. Кривые и поверхности на экране компьютера / Е.В. Шикин, А.И. Плис. – М.: «Диалог МИФИ», 1996. – 237 с.
3. Свечко, М.В. Метод сплайн-аппроксимации и интерполяции графических характеристик сложных энергетических объектов в расчетных моделях / М.В. Свечко, В.Е. Питолин // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2007. – № 3. – С. 85 – 89.
4. Свечко, М.В. О возможности экономии топлива на тепловых электростанциях за счет оптимизации схем использования энергетического оборудования / М.В. Свечко, В.Е. Питолин // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ). – 2008. – № 2. – С. 70 – 74.
5. Государственная система обеспечения единства измерений. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя: МИ 2412-97. – М.: Госстандарт России, 1997. – 14 с.

Поступила 26.02.2008