



А. А. Меленцов



М. А. Меленцов

EDN: IKEYDI

УДК 621.311

О технических и организационных подходах к обеспечению точности расчётной теплотехнической модели ТЭС

МЕЛЕНЦОВ А. А.; a.melentsov@servicemodel.ru

МЕЛЕНЦОВ М. А.; m.melentsov@servicemodel.ru

ООО «Сервис-модель»

620144, г. Екатеринбург, ул. Фрунзе, 96, оф. 201

В настоящее время обеспечение точных расчётов экономичности ТЭС при планировании и оптимизации энергетических режимов остаётся острой проблемой теплоэнергетической отрасли. Качество оптимизации энергетических режимов ключевым образом зависит от точности расчётной теплотехнической модели ТЭС. Данная статья посвящена описанию возможных технических и организационных подходов к построению и уточнению расчётной теплотехнической модели ТЭС.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимизация, норматив, уточнение, поправка, модель, энергетические характеристики, режим.

Сегодня острой проблемой в масштабах теплоэнергетической отрасли является обеспечение точных расчётов экономичности ТЭС при планировании и оптимизации энергетических режимов. В статье [1] показано, что качество последней ключевым образом зависит от точности расчётной теплотехнической модели ТЭС. Рассмотрим возможные технические и организационные подходы к построению и уточнению расчётной теплотехнической модели.

Термины и сокращения

В статье использованы следующие термины и понятия (некоторые понятия не являются общепринятыми).

• **Выходные параметры** — нагрузки агрегатов (нагрузки котлоагрегатов и электрические и тепловые нагрузки турбоагрегатов), а также давления в регулируемых отборах турбоагрегатов.

• **Исходные параметры** — параметры, напрямую не зависящие от энергетического режима агрегата, но оказывающие на него влияние. Пример исходных параметров: температура, давление и влажность наружного воздуха являются исходными для газовой турбины.

• **Модельный расход ресурсов** — расчётное значение, оценивающее фактический расход ресурсов на основе исходных и выходных параметров.

• **Первичные параметры** — параметры (ТЭП), по которым проводятся измерения в процессе испытаний оборудования.

• **Поправка к энергетической характеристике на отклонения значения параметра от номинального значения**

(Поправка) — закон влияния исходного параметра на расход энергоресурса агрегата.

• **Расчётная теплотехническая модель ТЭС (расчётная модель)** — совокупность графиков и формул, позволяющая выполнять расчёт нормативных и фактических ТЭП и решать другие связанные с ним технологические задачи.

• **ТЭП** — технико-экономические показатели.

• **Уточнение расчётной модели** — корректировка расчётной модели в целях обеспечения достоверного модельного расхода энергоресурсов для всех режимов ТЭС. Обычно выполняется посредством расчёта уточняющих поправок.

• **Уточняющая поправка** — изменение энергетической характеристики или поправки, возникающее при уточнении расчётной модели.

• **ЭХ** — энергетические характеристики.

Моделирование расхода энергоресурсов агрегата в зависимости от его режима

Одна из целей построения расчётной теплотехнической модели ТЭС — обеспечить достоверный расчёт расходов энергоресурсов по заданным исходным и выходным параметрам энергетического режима. Добиться точного расчёта расходов энергоресурсов ТЭС можно только тогда, когда смоделированы точные расчёты расхода энергоресурсов каждого агрегата в зависимости от его режимов.

Какие имеются принципиальные подходы к моделированию расхода

энергоресурсов агрегата в зависимости от его режима?

Типовым в электроэнергетике является подход к моделированию расходов энергоресурсов в зависимости от режимов агрегатов на основе результатов испытаний энергетического оборудования. Данный подход — единственно возможный в случае отсутствия полной и достоверной информации, описывающей исходные и выходные параметры энергетических режимов агрегата. Результаты испытаний принято оформлять в виде набора ЭХ оборудования.

Если обеспечен сбор полной и достоверной информации по исходным и выходным параметрам, описывающим энергетический режим агрегата, то зависимость расхода энергоресурсов от режима работы агрегата может быть смоделирована без проведения испытаний на основе архивной информации об энергетических режимах агрегата.

Основные принципы проведения испытаний для построения зависимости затрачиваемых энергоресурсов от режима агрегата

При проведении испытаний для построения ЭХ фиксируются исходные параметры, влияющие на режим агрегата. Далее выходные нагрузки агрегата варьируются во всех рабочих диапазонах с заданным шагом. Для турбоагрегатов с регулируемым отборами также следует варьировать давления в регулируемых отборах. Для каждого набора выходных нагрузок режим стабилизируется, затем измеряется расход затрачиваемых энергоресурсов.

Изменение значений исходных параметров, зафиксированных при построении ЭХ, влечёт изменение расхода энергоресурсов для агрегата. Большинство параметров влияют на расход энергоресурсов независимо друг от друга. Это влияние описывается поправками к ЭХ на отклонения значений параметров от номинальных. Поправки определяются либо теоретически на основе физических зависимостей, либо для этого могут проводиться испытания, при которых фиксируется одинаковый режим или набор режимов и измеряется расход энергоресурсов при различных значениях исходного параметра.

В результате испытаний энергетического оборудования формируется расчётная теплотехническая модель ТЭС. Перед технологами встаёт задача оценки точности сформированной расчётной модели, которая заключается в оценке точности модельных расходов энергоресурсов, основной из которых — расход топлива.

Оценка точности модельного расхода топлива должна выполняться посредством расчёта величины s — среднеквадратического отклонения по-

грешности нормативного расхода B_n (рассчитанного на основании модели) по отношению к фактическому расходу B_ϕ .

$$\Delta B = B_\phi - B_n$$

$$M = \frac{\sum \Delta B_i}{n},$$

$$s^2 = \frac{\sum (\Delta B_i - M)^2}{n - 1},$$

где n — число тестовых режимов.

Получение оценки подробно описано в [1].

Основные принципы построения зависимости затрачиваемых энергоресурсов от режима агрегата на основе архивной информации

Общие положения

При моделировании расходов энергоресурсов агрегата на основе архива полной исходной информации о его энергетических режимах за прошлые периоды важно учитывать фактор влияния всех исходных данных на расход энергоресурсов. В расчётной модели можно строить расход энергоресурса (топливо на котлоагрегат, тепло на турбоагрегат) как функцию многих переменных – всех исходных и выходных параметров, оказывающих влияние на расход энергоресурса. Практическая реализация такого подхода сопряжена со значительным количеством технических сложностей:

- высокая вычислительная сложность (степенная зависимость от нескольких независимых переменных);
- сложность выделения из всей архивной информации только тех данных, которые описывают стабилизированные режимы (исключение из рассмотрения данных, описывающих переходные режимы при быстром и значительном изменении нагрузок агрегата);
- группировка режимов по качественно различным состояниям (например, теплофикационный и конденсационный режимы турбоагрегата).

Гораздо более практичным представляется процесс построения актуальной зависимости затрачиваемых энергоресурсов от энергетического режима посредством последовательного итерационного уточнения базовых ЭХ и поправок на основании архивной информации. В качестве базовых рассматриваются действующие ЭХ и поправки. В случае отсутствия действующих ЭХ берутся заводские ЭХ оборудования.

Уточнение ЭХ агрегата

Уточнение ЭХ агрегата на основании архивных данных проводится на основе расхождений между значениями нормативных и фактических ТЭП. В процессе эксплуатации энергетического оборудования неизбежно наступает деградация его характеристик, которая математически описывается линейными уточняющими поправками:

$$X_\phi = X_n(P) + AP + b,$$

где X_n — вектор нормативных ТЭП, задаваемых зависимостями от выходных параметров агрегата; P — вектор выходных параметров агрегата; X_ϕ — вектор фактических ТЭП, приведённых с учётом поправок к номинальным значениям исходных параметров; A — матрица линейных коэффициентов уточняющих поправок; b — вектор постоянных коэффициентов уточняющих поправок. Значения A и b рассчитываются по методу наименьших квадратов [2] на основании архивных данных.

Разберём процесс расчёта уточняющих поправок по шагам.

Шаг 1. Определение набора параметров, которые следует уточнять для заданного агрегата. Важно определять и рассчитывать уточняющие поправки только для первичных параметров. Первичными назовём параметры, по которым проводятся измерения в процессе испытаний оборудования. В ЭХ оборудования включаются также графики, которые строятся не на основании исходных измерений, а на основании графиков изменения первичных параметров. Эти графики должны пересчитываться после применения уточняющих поправок к графикам первичных параметров.

Шаг 2. Формирование набора фактических энергетических режимов агрегата, на основании которых будет проводиться расчёт уточняющих поправок. При выборе архивных данных для рас-

чёта уточняющих поправок особое внимание следует уделять предварительному контролю данных, чтобы весь массив данных был достоверным и описывал принципиально одинаковый режим работы агрегата. Например, если в архиве часть данных описывает одноступенчатый режим работы турбоагрегата, а часть — двухступенчатый, то необходимо разделить эти данные и проводить расчёт уточняющих поправок отдельно для каждого режима.

При обработке архивных данных также следует учитывать факт значительных отклонений нормативных ТЭП от фактических при переходных нестационарных режимах. Нестационарные режимы следует исключить из рассмотрения. Самым простым способом учесть этот фактор при обработке данных является первичная фильтрация данных по уровню отклонений. Перед применением метода наименьших квадратов должен отбрасываться заданный процент измерений, доставляющих наибольшие отклонения. Применение более «интеллектуальных» фильтров, исключающих данные по нестационарным режимам, улучшает результат расчёта уточняющих поправок.

Шаг 3. На выбранном наборе энергетических режимов проводится оценка точности модельного расхода ресурсов s . Исходя из значения s , принимается решение о целесообразности уточнения и дальнейших шагов.

Шаг 4. Для выбранного набора энергетических режимов на основании ЭХ рассчитывается вектор уточняемых нормативных ТЭП $X_n(P)$. P — вектор выходных параметров, измеренный для каждого режима.

Шаг 5. Для выбранного набора энергетических режимов рассчитывается вектор фактических ТЭП X_ϕ , приведённых с учётом поправок к номинальным значениям исходных параметров,

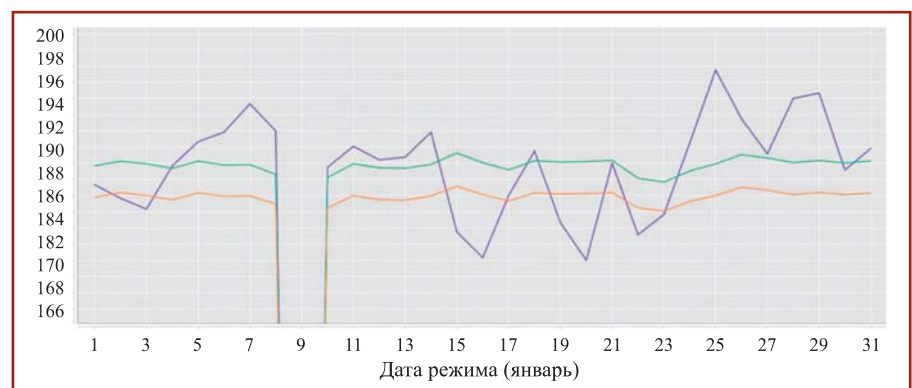


Рис. 1. Уточнение нормативного значения температуры уходящих газов котлоагрегата: — фактическая температура уходящих газов; — нормативная температура уходящих газов; — уточнённая нормативная температура уходящих газов

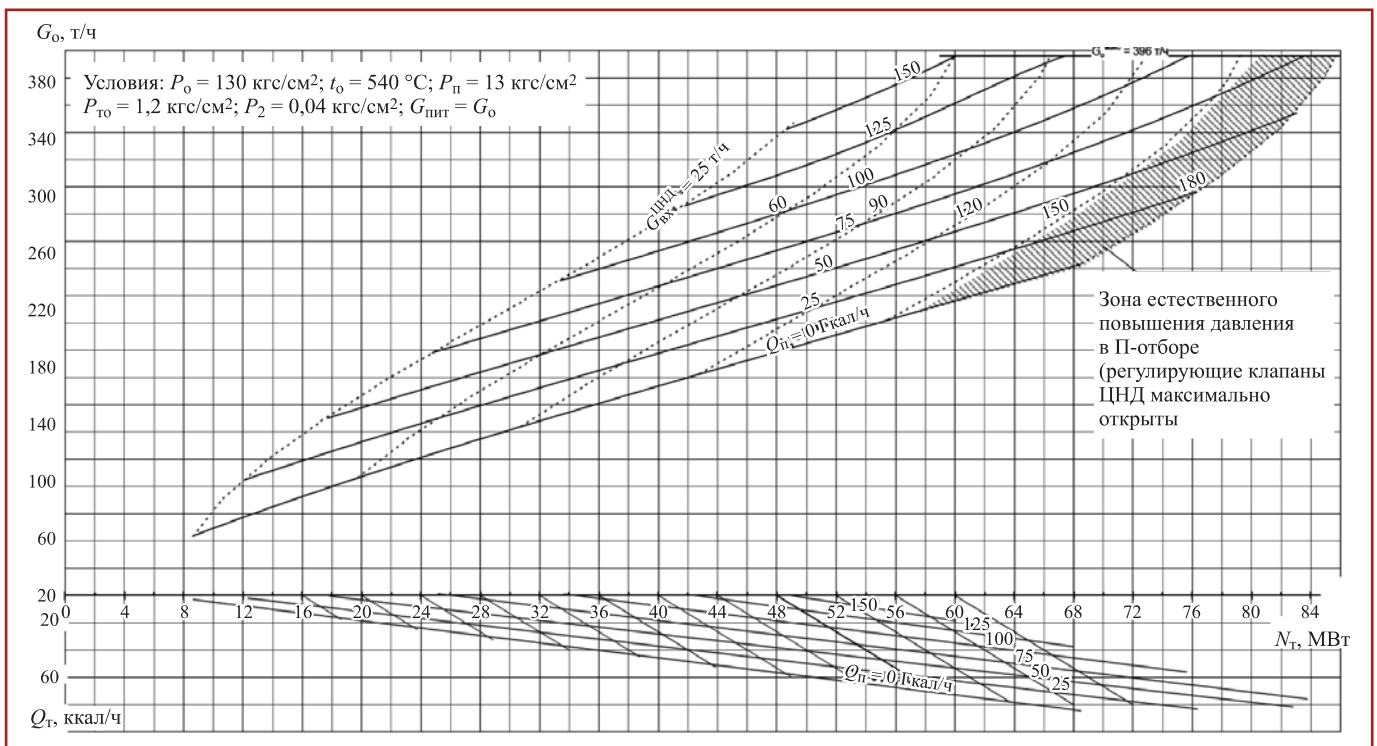


Рис. 2. Диаграмма режимов ПТ-65/75-130/13

т. е. на основании измеренных исходных параметров для каждого режима рассчитываются поправки на приведение ТЭП к номинальным значениям исходных параметров, при которых проводились испытания. Измеренные фактические значения уточняются ТЭП корректируются с учётом поправок.

Шаг 6. По методу наименьших квадратов рассчитываются A — матрица линейных коэффициентов уточняющих поправок и b — вектор постоянных коэффициентов уточняющих поправок.

Шаг 7. Проводится оценка точности модельного расхода ресурсов s при расчёте нормативных ТЭП с найденными уточняющими поправками. В случае неудовлетворительной точности принимается решение об уточнении поправок на отклонение исходных параметров от номинальных значений при построении ЭХ. Фиксируются значения уточнённых нормативных ТЭП, при этом в роли уточняемых ТЭП выступают поправки. Далее возвращаемся к шагу 3. При уменьшении значения s уточнение ЭХ и поправок можно выполнять итерационно (при одном и том же наборе режимов) до тех пор, пока наблюдается уменьшение s , свидетельствующее о приближении модельных затрат к фактическим.

На графике (рис. 1) представлен результат уточнения нормативного расчёта температуры уходящих газов котлоагрегата на основе данных за месяц.

Особенности уточнения ЭХ котлоагрегатов

Расчёт КПД для энергетического котла выполняется по формуле, приведённой в [3]:

$$\text{КПД} = 100 - q_2 - q_4 - q_5 - q_6$$

где q_2 — потери тепла с уходящими газами; q_3 — потери тепла от химической неполноты сгорания топлива; q_4 — потери тепла с механическим недожогом; q_5 — потери тепла в окружающую среду; q_6 — потери тепла со шлаком.

Для котлов, использующих в качестве топлива природный газ, часть слагаемых будет отсутствовать.

Для расчёта q_2 применяется формула, которая описывает зависимость данного параметра от коэффициента избытка воздуха в режимном сечении и температуры уходящих газов. Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении и температура уходящих газов являются первичными параметрами при построении ЭХ котлоагрегата. Таким образом, чтобы уточнить q_2 , необходимо рассчитать уточняющие поправки для нормативных коэффициента избытка воздуха в режимном сечении и температуры уходящих газов.

Параметры q_4 , q_6 зависят от содержания горючих пылевых частиц в шлаке и уносе, зольности. В большинстве случаев их не измеряют в оперативном режиме, поэтому отсутствует возможность построения зависимости q_4 и q_6 от тепловой нагрузки котла на основе автоматизированных измерений. Зависимости для вычисления данных параметров могут быть уточнены только при испытаниях.

Нормативные потери тепла в окружающую среду q_5 задаются графиком, зависят от тепловой нагрузки котла. Состояние тепловой изоляции агрегата оказывает значимое влияние на эти потери. Для расчёта уточняющей поправки фактические потери тепла в окружающую среду могут быть рассчитаны через фактический КПД:

$$\text{КПД}_ф = 100 \frac{Q_{бр}}{7B_ф}$$

где $Q_{бр}$ — тепло брутто, произведённое котлом; $B_ф$ — фактический расход условного топлива на котёл:

$$q_{5ф} = 100 - q_{2ф} - q_{4ф} - q_{6ф} - \text{КПД}_ф$$

Особенности уточнения ЭХ турбоагрегатов

Для турбоагрегатов первичным параметром, определяющим расход энергоресурсов на турбоагрегат, является расход свежего пара на турбину G_0 (диаграмма режимов турбины, рис. 2).

Удельный расход тепла на производство электроэнергии q_r (рис. 3) определяется расчётным графиком, который строится на основании диаграммы режимов и зависимости конденсационного диапазона от тепловых нагрузок турбоагрегата, поэтому уточнять необходимо именно расход свежего пара на турбину (диаграмму режимов).

В процессе старения турбины происходит уменьшение вырабатываемой электрической мощности при фиксированных расходах пара на турбину и в отборы, т. е. необходимо уточнять зависимости конденсационного диапазона турбоагрегата от его тепловых нагрузок.

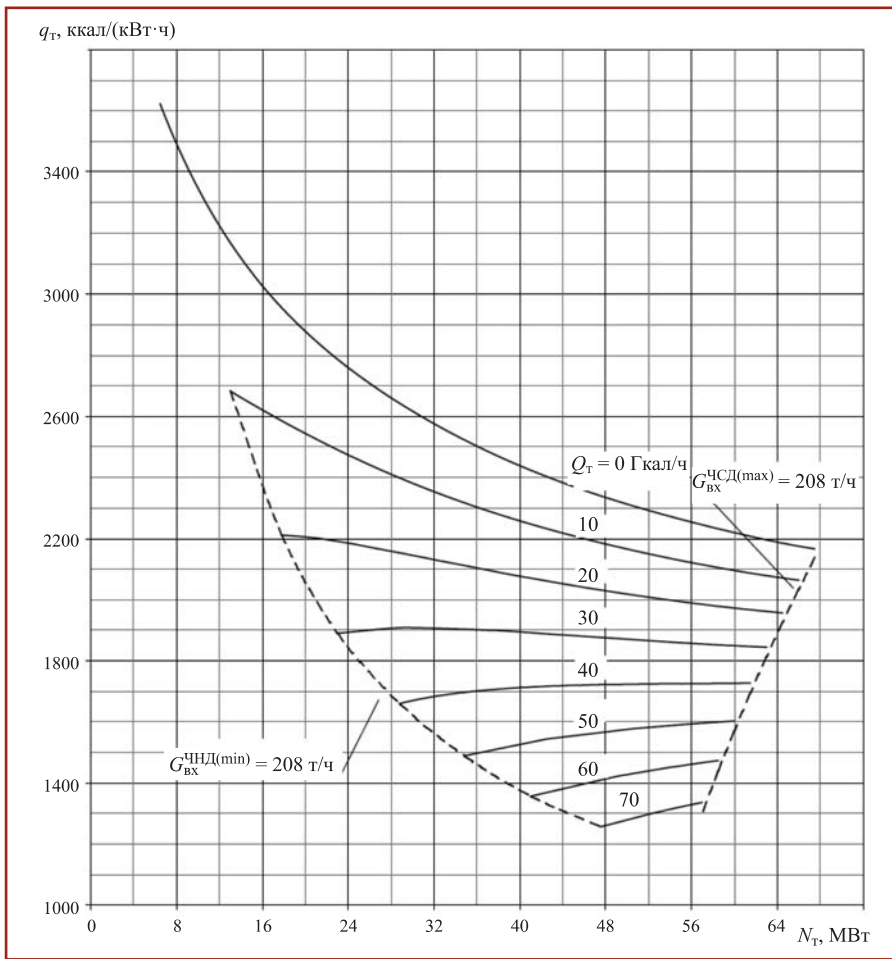


Рис. 3. Удельный расход тепла brutto при $Q_t = 0$ Гкал/ч

Первичными при построении ЭХ являются параметры:

$$N_{\text{мин}} = f(Q_t, p_t);$$

$$N_{\text{макс}} = g(Q_t, p_t),$$

где $N_{\text{мин}}$ — минимальная конденсационная электрическая мощность; $N_{\text{макс}}$ — максимальная конденсационная электрическая мощность; Q_t — расходы тепла в отборы; p_t — давление в регулируемом отборе.

Обычно в состав ЭХ зависимости, описывающие параметры $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{макс}}$ в явном виде не входят. Их можно построить на основании графика удельного расхода тепла на производство электроэнергии. Чтобы рассчитать уточняющую поправку для $N_{\text{мин}}$, необходимо подготовить выборку из архива энергетических режимов при работе с прикрытой диафрагмой. Для расчёта уточнения $N_{\text{макс}}$ — выборку режимов при работе с полностью распахнутой диафрагмой.

График удельного расхода тепла на производство электроэнергии q_t должен быть заново перестроен после уточнения зависимостей для расхода свежего пара и пределов конденсационного диапазона.

Автоматизация уточнения ЭХ

На основе изложенных в статье подходов разработан программный инструментарий для автоматизированного уточнения ЭХ. Данный инструментарий в качестве входящей информации использует архивные данные по расчёту фактических ТЭП.

При наличии инструментария автоматизированного уточнения модели технолог получает возможность проводить расчёт уточняющих поправок на основе выбранного ряда (набора) энергетических режимов. Для решения различных задач целесообразно выполнять уточнение на разных рядах режимов, создавая при этом различные наборы уточняющих поправок. Например, для планирования на несколько предстоящих суток логично рассчитывать уточняющие поправки на основе часовых режимов за прошедший месяц, а для годового планирования — на основе суточных режимов за прошлый год. Правильный выбор набора режимов (временного периода) для расчёта уточняющих поправок, с учётом замечаний по пункту Шаг 2, существенным образом влияет на точность решения задач планирования.

Данная статья является обобщением практического опыта авторов, накоп-

ленного в процессе расчёта уточняющих поправок к ЭХ с использованием ПО «Метамодель» (включено в единый реестр программного обеспечения — Реестровая запись № 5742 от 20.09.2019).

Анализ причин неточности расчётов экономичности ТЭС и предложения по изменению ситуации

Причины неудовлетворительной точности расчётов экономичности ТЭС

В предыдущих разделах рассмотрены технические моменты, позволяющие обеспечивать необходимую точность при расчёте экономичности ТЭС.

Необходимо отметить, что в современной практике удовлетворительная точность при расчёте экономичности ТЭС во многих случаях не обеспечивается, т. е. для многих ТЭС модельный расчёт расходуемых энергоресурсов не совпадает с фактическим, расхождение может превышать несколько, иногда более 10 %. По мнению авторов, речь идёт не о единичных случаях нарушения точности расчётов, а о массовом явлении, имеющем место в отечественной тепловой генерации. Основные причины неудовлетворительной точности расчётов экономичности ТЭС следующие.

- В силу зависимости премий и бонусов руководства отдельных генерирующих компаний и их филиалов (ТЭС) от результатов расчёта ТЭП, персонал ТЭС «подгоняет» результаты расчётов нормативных ТЭП к фактическим путём искажения исходных данных, используемых при расчёте нормативных ТЭП.
- При проведении тарифной кампании расчёты нормативных ТЭП искажаются для обоснования тарифов при защите. Задача — подтвердить заранее установленный, определённый удельный расход топлива на тепло, чтобы обосновать тариф.
- Исходные данные, используемые для расчёта ТЭП, искажаются для сокрытия фактов ограниченной работоспособности или неудовлетворительного состояния оборудования.
- Наблюдаются ситуации, когда ЭХ не соответствуют фактическому состоянию оборудования сразу после проведения испытаний оборудования. Причины:
 - недостаточный контроль результатов испытаний оборудования со стороны персонала ТЭС. Специалистами ПТО по результатам выполнения испытаний оборудованию не проводится оценка точности нормативного (модельного) расхода топлива посредством сопоставления фактических ТЭП с нормативными, либо такая оценка проводится ненадлежащим образом. Персонал ПТО не мотивирован на обеспечение точности нормативных характеристик оборудования;

- экономия средств на проведении испытаний может приводить к формальному характеру процедуры испытаний оборудования. В некоторых случаях процесс сводится к переносу в новую нормативно-техническую документацию результатов предыдущих (устаревших) испытаний оборудования.

В результате, экономика многих ТЭС при планировании рассчитывается недостаточно точно, энергетические компании вводят в заблуждение сами себя и теряют реальное представление об экономичности и состоянии станций.

Организационные предложения

Эффективным шагом по исправлению ситуации представляется централизованное внедрение на ТЭС и в исполнительном аппарате генерирующих компаний автоматизированной системы, обеспечивающей:

- достоверный расчёт нормативных и фактических ТЭП с часовой дискретностью, что позволит исключить манипулирование данными, приводящее к искажению нормативных удельных расходов топлива на тепловую и электрическую энергию;

- возможность контроля качества нормативных характеристик оборудования;

- ведение расчёта уточняющих поправок к нормативным характеристикам оборудования на основании архивных данных об энергетических режимах работы оборудования;

- построение актуальных характеристик относительного прироста затрат станций — данные характеристики являются наиболее точным инструментом оценки себестоимости объёмов элек-

троэнергии, производимых в конденсационном диапазоне ТЭС (более подробная информация о ХОП приведена в [4]);

- обеспечение универсальной отечественной среды для хранения алгоритмов расчёта ТЭП электростанций.

Выводы

Резюмируя изложенный материал, отметим следующее.

1. Для моделирования расхода энергоресурсов агрегата в зависимости от его режима имеются два подхода:

а — на основе результатов испытаний энергетического оборудования. Данный подход является единственно возможным в случае отсутствия полной информации, описывающей исходные и выходные параметры энергетических режимов агрегата;

б — если обеспечен сбор полной и достоверной информации по исходным и выходным параметрам, описывающим энергетический режим агрегата, то зависимость расхода энергоресурсов от режима работы агрегата может быть смоделирована без проведения испытаний на основе архивной информации об энергетических режимах агрегата.

2. По результатам проведения испытаний оборудования технологи в обязательном порядке должны проводить оценку качества нормативных характеристик оборудования путём сравнения модельного расхода топлива с фактическим для различных энергетических режимов.

3. В статье приведены подходы к расчёту на основании архивных данных уточняющих поправок к норматив-

ным характеристикам генерирующего оборудования для котло- и турбоагрегатов.

4. На многих ТЭС наблюдаются проблемы с обеспечением точности расчёта нормативных ТЭП.

5. Авторы предлагают решить перечисленные проблемы посредством внедрения ПО, обеспечивающего достоверный расчёт нормативных и фактических ТЭП с часовой дискретностью, контроль качества испытаний оборудования и регулярный расчёт уточняющих поправок к нормативным характеристикам оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меленцов М. А., Меленцов А. А. О методах подтверждения экономического эффекта оптимизации энергетических режимов тепловых электростанций // Энергетик. 2023. № 8. С. 25 – 29.

2. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений (математическая теория). 2-е изд. — М., 1962.

3. РД 34.08.552–95. Методические указания по составлению отчёта электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. — М.: СПО ОРГРЭС, 1995.

4. Меленцов М. А., Меленцов А. А. Характеристика относительных приростов затрат — ключевой инструмент для эффективной работы на рынке электроэнергии и мощности // Энергетик. 2024. № 4. С. 32 – 37.

Вышли в свет

журналы «Библиотека электротехника» — приложение к журналу «Энергетик»
Вып. 12 (300) 2023 г., Вып. 2 – 3 (302 – 303) и Вып. 4 (304) 2024 г.

ГАРИЕВСКИЙ М. В., ЛАЗАРЕВ Г. Б., ХРУСТАЛЕВ В. А.

МАНЕВРЕННОСТЬ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Части 1 – 3

Обоснована необходимость повышения маневренности, приемистости, эксплуатационной живучести и безопасности работы АЭС с ВВЭР. Приведены результаты разработок и исследований наиболее значимых аспектов системного влияния частотно-регулируемых приводов главных циркуляционных насосов на маневренность энергоблоков АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами и реакторами на быстрых нейтронах.

Предназначена для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов по специальностям энергетика, ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы.

По вопросам приобретения обращаться в редакцию
к Давыденко Елене Иосифовне +7 495 234-74-21

