

УДК 621.311

Экономия топлива на ТЭС за счет применения метода согласования энергобалансов*

П.А. ЦИННИКОВ, Г.В. НОЗДРЕНКО, А.В. САФРОНОВ

Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

Расчет технико-экономических показателей (ТЭП) является одной из основных задач эксплуатации ТЭЦ. В конечном счете, на основе ТЭП ведут тарифную политику и строят долгосрочные перспективы развития. Поэтому расчет ТЭП – актуальная задача для ТЭС. Однако определение ТЭП возможно лишь с некоторой точностью. Эта точность зависит от методических погрешностей алгоритма расчета, погрешностей измерительной техники и методики измерений. Рациональный алгоритм расчета ТЭП позволяет снизить влияние первой группы погрешностей на точность конечного результата. Но даже при полном исключении погрешности этой группы фактическая погрешность вычисления ТЭП в рабочем диапазоне изменения параметров при использовании серийно выпускаемых приборов находится в пределах $0,3 \div 0,6$ % для КПД парогенератора, $2,3 \div 3,0$ % для показателей турбины и энергоблока в целом. Эти погрешности при измерениях параметров ведут к несходимости балансовых уравнений, и для реально функционирующих ТЭС величина этого дебаланса может достигать $10 \div 20$ % в зависимости от состава, состояния и степени автоматизации технологических процессов. Погрешность расчета ТЭП при использовании информационно-вычислительных систем может быть снижена в результате ряда мероприятий. Одно из таких мероприятий – это повышение точности информации за счет применения метода согласования балансов, в рамках которого обеспечивается уточнение наиболее значимых для определения ТЭП показателей, следствием является экономия топлива.

Ключевые слова: несходимость, энергобаланс, ТЭС, согласование балансов, расходно-термодинамические и технические параметры, ТЭП, экономия, перерасход, топливо.

ВВЕДЕНИЕ

Суть методики согласования балансов в следующем. Несходимость балансовых уравнений (из-за неточности измерений и вычислений):

$$H_k(v_1, \dots, v_n, x_1, \dots, x_u) = -\omega_k, \quad (1)$$

где v_n – неизмеряемые (рассчитанные) величины; x_u – измеряемые величины; ω_k – несходимость k -го балансового уравнения.

Введение в балансовое уравнение поправок к каждому члену позволяет получить согласованное балансовое уравнение:

$$H_k(v_1 + \delta_1, \dots, v_n + \delta_n, x_1 + \varepsilon_1, \dots, x_u + \varepsilon_u) = 0, \quad (2)$$

где δ и ε – соответствующие поправки к вычисленной и измеренной величинам.

Нахождение поправок основано на линеаризации уравнений (2) путем разложения в ряд Тейлора и использования дополнительных условий, вытекающих из представлений о наиболее вероятном распределении погрешностей как минимуме взаимной суммы квадратов поправок:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H_k}{\partial v_i} \right) \delta_i + \sum_{j=1}^u \left(\frac{\partial H_k}{\partial x_j} \right) \varepsilon_j = \omega_k, \quad (k = 1, \dots, r), \quad (3)$$

* Статья получена 1 сентября 2013 г.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial v_i} \right) \lambda = 0, \quad (i = 1, \dots, n), \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_j}{m_j^2} = \sum_{k=1}^r \left(\frac{\partial H_k}{\partial x_j} \right) \lambda_k, \quad (j = 1, \dots, u), \quad (5)$$

где λ_k – неопределенные множители Лагранжа, выполняющие роль коэффициентов пропорциональности; m_j – абсолютное значение среднеквадратической погрешности (с учетом методической составляющей) измеренной величины.

Для энергоблока ТЭС при отпуске потребителю электрической и тепловой энергии задаются: электрической мощностью и температурой окружающего воздуха [1]. Затем рассчитываются температурный и тепловой графики нагрузки при качественном регулировании отпуска тепла и заданном коэффициенте теплофикации и определяются температуры прямой, обратной сетевой воды и давление пара в Т-отборе. Для известных (на данном шаге расчета) начальных и конечных параметров пара, параметров промперегрева, питательной воды, Т-отборов рассчитывается тепловая схема энергоблока. В качестве независимых параметров $x_i \in X$ рассматриваются измеряемые параметры (начальные и конечные параметры пара, параметры промперегрева, питательной воды, коэффициент теплофикации, параметры топлива). К функционально зависимым параметрам $y_i \in Y$ относятся расходы рабочих сред, передаваемые тепловые и энергетические потоки. В такой постановке множества независимых X и зависимых Y параметров определяют многомерное вещественное пространство R^n , размерность которого n обусловлена количеством оптимизируемых переменных. Условия протекания процессов, системные и физико-технические ограничения представлены в виде неравенств – равенств:

$$\begin{aligned} F(X, Y) &< 0, \\ X^* &\leq X \leq X^{**}, \end{aligned} \quad (6)$$

где X^* , X^{**} – наименьшие и наибольшие значения (определяемые погрешностями измерения параметров с учетом методических погрешностей); F – нелинейные вектор-функции несходимости балансов (функции энергетического, расходного и эксергетического балансов):

$$\sum_{k \in V(i)} (\eta \cdot M^x \cdot h)_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta \cdot M^y \cdot h)_{ij} < 0; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in V(i)} M_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} M_{ij}^y < 0; \quad (8)$$

$$\sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y \cdot \eta_i^{-1} < 0. \quad (9)$$

Здесь M , h – расход и энтальпия энергоносителя; η – коэффициент, учитывающий соответствующие потери энергии (или эксергии).

Система уравнений балансов в элементах оборудования устанавливает такое соотношение между термодинамическими и расходными параметрами, которое обеспечивает получение заданной стационарной нагрузки энергоблока. Для каждого расчетного варианта тепловой схемы энергоблока выполняются с совместной увязкой: тепловые и балансовые расчеты котла, турбины, регенеративных и сетевых подогревателей, конденсатора, технических систем; расчет мощности собственных нужд; определение расходов топлива.

В соответствии с содержанием расчетов полная система операторов, кроме вышеперечисленных, включает процедуры: определения термодинамических параметров воды и водяного пара, перебора вариантов параметров, изменение типа и схемы энергоблока, режимных условий. Расчет тепловой схемы производится итерационно по отношению к расходу топлива на энергоблок.

В целом разработанная расчетная схема представляет собой совокупность математических моделей элементов (групп элементов) реально функционирующего энергоблока со связями. Каждой технологической связи между элементами (группами элементов) энергоблока соответствует информационная связь между моделями. Расчетная схема энергоблока построена с учетом её агрегирования и с использованием метода декомпозиции (уменьшения размерности схемы). При этом группы одинаковых, параллельно работающих и равномерно нагруженных элементов технологической схемы энергоблока (тягодутьевые и насосные установки, и др.) заменены на один элемент в расчетной схеме. В соответствии с методом декомпозиции в технологической схеме энергоблока выделено несколько функционирующих частей (подсистем), связи между которыми немногочисленны. Для каждой функционирующей части построена своя математическая модель. Модель функционирующей части и является тем элементом в полной модели энергоблока, который не подлежит дальнейшему делению. Разработанные математические модели обеспечивают достаточно точное описание реальных процессов как в рамках функционирующих частей, так и по информационным связям. Модели включают зависимости между входными и выходными расходно-термодинамическими параметрами, а также зависимости между этими параметрами и эксергетическими характеристиками элементов, проверку параметров по всем видам ограничений, проверку допустимости расчетных значений (неотрицательность расходов, энергетических и материальных потоков и т. д.). Все модели функционирующих частей согласованы между собой по входным параметрам (параметрам информационных связей).

Функцией цели при согласовании балансов является интегральный эксергетический КПД энергоблока [2]:

$$\eta_e = \frac{\eta_{4N}N + \eta_{6T}E}{N + E}, \quad (10)$$

где эксергетические КПД по отпуску:

– электроэнергии N:

$$\eta_{4N} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N; \quad (11)$$

– теплоэксергии E:

$$\eta_{6T} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N; \quad (12)$$

$\eta_1, \dots, \eta_6$ – эксергетические КПД функционирующих частей энергоблока; ε_S – структурный коэффициент эксергетических связей, учитывающий взаимосвязи между функционирующими частями энергоблока, а также внешние системные связи:

$$\varepsilon_S = F_{01}^{-1} \cdot \left[1 - \eta_1^{-1} \sum \prod F_{ij} \eta_i^{-1} \right], \quad (13)$$

где F_{ij} – относительные эксергии.

Такой подход использовался авторами ранее [6–10]. Эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате

$$\varepsilon_N = \left(\eta_2 \eta_3 \sum_{i=2,3} i_4 \eta_i^{-1} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Оптимизатор представлен как

$$\left\{ \min_{x \in R^n} [\eta_e(x)]^{-1} \left[\bar{\varphi}_u(\omega) = 0, u \in U \right] \right\}, \quad (15)$$

где $\bar{\varphi}_u(\omega)$ – вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений; U – множество логико-числовых операторов; $\omega = (x, G, R^n, L, H)$ – информационная структура; L – множество логических управляющих параметров; G – множество внешних связей и исходных данных; H – несходимость балансов энергоблока; x – измеряемые параметры. Минимум функции (15) находится методом случайного направленного поиска с учетом ограничений (6) [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для примера в таблице приведены результаты согласования энергобалансов энергоблока ст. № 1 НТЭЦ–5 для одного из январских режимов работы.

Энергоблок ст. № 1 НТЭЦ-5

Наименование параметров, размерность	Значение (до согласования)	Значение (после согласования)
Расход пара на турбину, кг/с	186,4	164,5
Начальное давление пара, МПа	12,5	12,43
Начальная температура пара, °С	543	545
Температура питательной воды, °С	248	248
Расход пара промпрегрева, кг/с	155,5	157,8
Коэффициент теплофикации	0,48	0,51
Мощность на клеммах генератора, МВт	175,8	176,7
Низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг	21,16	21,07
Расход технологического пара, кг/с	0	0
Давление технологического пара, МПа	0	0
Температура уходящих из котла газов, °С	159	161
Количество кислорода в уходящих газах, %	3,2	3,3
Влага топлива (по рабочей массе), %	14	14
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора, °С	25,6	25,1
Расход топлива, кг/с	22,82	23,25
Химическая энергия топлива, МВт	489,8	482,7
Полезно используемая теплоэнергия, МВт	532,6	478,0
КПД котла по обратному балансу	0,958	0,958
Несходимость энергобаланса по котлу, %	-13,5	-3,3
Отпуск теплоэнергии на теплофикацию, МВт	261	261
Выработка электроэнергии, МВт, на паре:		
теплофикационного отбора	123,2	124,2
регенеративных отборов	29,8	29,8
конденсационного потока	58,4	26,1
Несходимость энергобаланса по турбине, %	+20,2	+1,9
Интегральный эксергетический КПД энергоблока	0,37	0,38

Из этих данных видно, что согласование энергобалансов позволяет существенно уточнить расходно-термодинамические и технические параметры функционирующего энергоблока. Например, до согласования сумма выработки электроэнергии на паре теплофикационного,

регенеративного и конденсационного отборов равнялась 211,4 МВт. Эти цифры были получены в результате расчета по данным предоставленным станцией, хотя в то же время заявлена мощность в 175,8 МВт. Несходимость по энергоблоку в этом случае составляет 20,2 %. После согласования балансов удается снизить эту цифру до значения в 1,9 %.

Если в рамках предложенной модели выделить группы показателей, отвечающих за информационное обеспечение котлоагрегата (σ_K) и турбины (σ_T), то можно видеть, что несходимость балансов по «котлу» составляют 4–5 %, а по «турбине» – 0,5–3 % (рис. 1). При этом меньшее значение соответствует энергоблокам ТЭЦ вне зависимости от ее структуры (блочная или с поперечными связями).

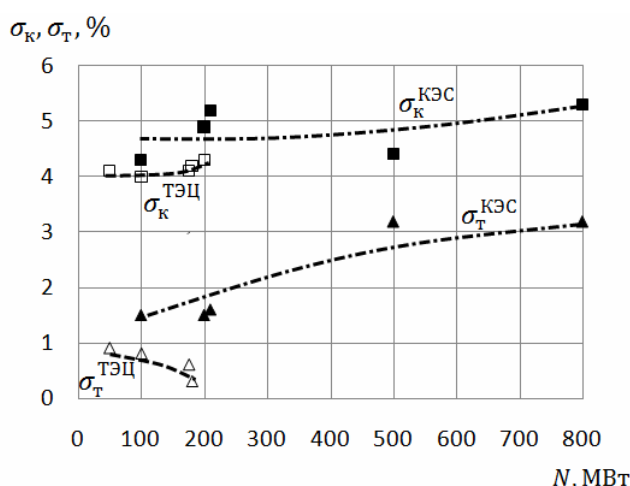


Рис. 1. Несходимость балансовых уравнений с разделением показателей информационного обеспечения на две группы «котел» (σ_K) и «турбина» (σ_T) в зависимости от установленной мощности энергоблока

В свою очередь, уточнение параметров функционирования обуславливает экономию топлива на ТЭС, которая для широкого спектра энергоблоков разных типов показана на рис. 2 в относительных координатах.

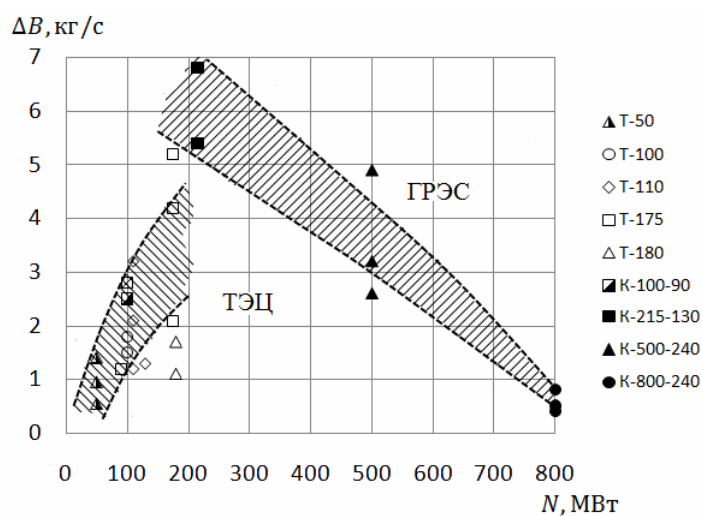


Рис. 2. Экономия топлива на энергоблоках ТЭС

Экономия топлива может достигать 10–15 % (рис. 3) для блоков небольших единичных мощностей (до 100 МВт). На этом рисунке показан фактически неиспользованный в реальном процессе расход топлива, но учтенный показаниями приборов ТЭС и зарегистрированный службами ПТО.

Другими словами, энергоблоки ТЭС работают в целом лучше, чем принято считать.

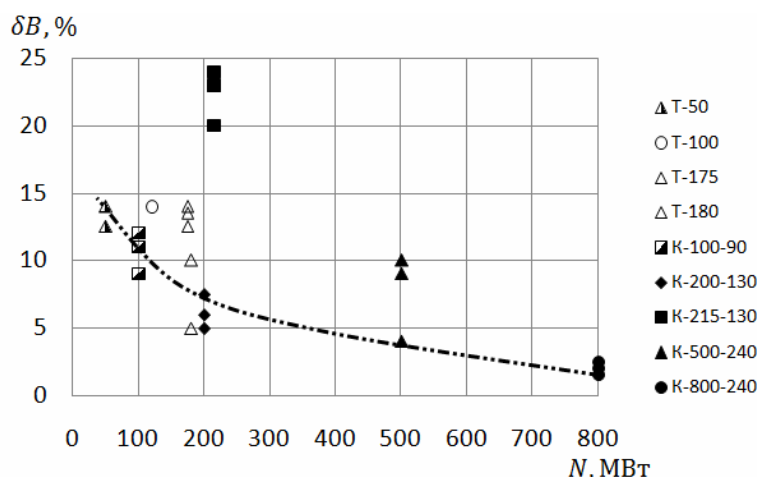


Рис. 3. Относительная экономия топлива на энергоблоках ТЭС

Важно отметить, что небольшая относительная экономия топлива для мощных блоков (0,5–2 % для блоков 800 МВт, рис. 3) при высокой установленной мощности обеспечивают годовую экономию топлива до 36 тысяч тонн в год.

ВЫВОДЫ

Разработана на основе оптимизационно-энергетической методологии методика согласования энергобалансов энергоблоков ТЭС. Показано, что согласование энергобалансов позволяет существенно уточнить расходно-термодинамические и технические параметры и уменьшить несходимость энергобалансов функционирующего энергоблока.

Несходимость балансовых уравнений энергоблоков на ТЭС в широком диапазоне мощностей и с разделением параметров информационного обеспечения на группы «котел» и «турбина» составляют 4–5 % и 0,5–3 % соответственно.

Относительная экономия топлива, в условиях применения метода согласования балансов, может достигать 10–15 % для блоков небольших единичных мощностей. Для мощных блоков (500–800 МВт) она составляет 0,5–2 %, что при высокой установленной мощности обеспечивает годовую экономию топлива до 36 тысяч тонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Щинников П.А. Согласование материальных и энергетических балансов / П.А. Щинников и др. // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25). – Ч. 1. – С. 212–216.
- [2] Щинников П.А. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: монография / П.А. Щинников и др. – Новосибирск: НГТУ, 2005. – 527 с.
- [3] Овчинников Ю.В. Применение методики согласования балансов для уточнения исходной информации применительно к ТЭС / Ю.В. Овчинников, Г.В. Ноздренко, И.М. Алтухов // Управление режимами и развитием электроэнергетических систем в условиях АСУ – межвузовский сборник трудов под редакцией В.К. Щербакова. – Новосибирск, 1980. – С. 45–53.
- [4] Зыкова Н.Г. Схемно-параметрическая оптимизация котлов ТЭС с кольцевой топкой / Н.Г. Зыкова и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10. – № 3. – С. 477–483.

- [5] **Щинников П.А.** Критерий эффективности при эксергетической оптимизации функционирования энергопреобразования / П.А. Щинников // Доклады ТУСУРа. – № 1 (25). – Ч. 1. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. – С. 208–211.
- [6] **Щинников П.А.** Повышение технико-экономической эффективности ТЭЦ путем перехода на новые режимы работы с внутриквартальными теплонасосными установками / П.А. Щинников и др. // Теплофизика и аэромеханика, 2000. – Т. 7. – № 4. – С. 581–590.
- [7] **Щинников П.А.** Мультиэнергоблок с комплексной переработкой твердого топлива / П.А. Щинников // Энергетика. Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ, 2001. – № 3. – С. 83–89.
- [8] **Щинников П.А.** Энергосберегающая парогазовая технология реконструкции пылеугольной ТЭЦ / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, А.А. Ловцов // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – Т. 9. – № 3. – С. 445–449.
- [9] **Щинников П.А.** Научно-методические основы исследования энергоблоков ТЭС / П.А. Щинников // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 13(18). – С. 161–168.
- [10] **Накоряков В.Е.** Комплексные технико-экономические исследования ПГУ с поточными газификаторами / В.Е. Накоряков и др. // Известия РАН. Энергетика. – 2010. – № 4. – С. 184–193.

REFERENCES

- [1] Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Serant F.A., Tomilov V.G., Safronov A.V. Soglasovanie material'nykh i energeticheskikh balansov [Harmonization of material and energy balances]. Doklady TUSURa, 2012, no. 1(25), pp. 212–216.
- [2] Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Tomilov V.G., Ovchinnikov I.V., Lovcov A.A., Kovalenko P.I., Zikova N.G., Vihman O.A., Borodihin I.V. Kompleksnye issledovaniia TES s novymi tekhnologiyami [Complex investigations of TPP with new technologies]. Novosibirsk, 2005, 527 p.
- [3] Ovchinnikov I.V., Nozdrenko G.V., Altukhov I.M. Primenenie metodiki soglasovaniia balansov dlia utochneniia iskhodnoi informatsii primenitel'no k TES [Application of the method to clarify the matching balance point information for the TPP]. Upravlenie rezhimami i razvitiem elektroenergeticheskikh sistem v usloviakh ASU, 1980, pp. 45–53.
- [4] Shchinnikov P.A., Zikova N.G., Nozdrenko G.V., Serant F.A. Skhemno-parametricheskaia optimizatsiia kotlov TES s kol'tsevoi topkoi [Scheme-parametric optimization TPP boilers circular furnace]. Teplofizika i aeromekhanika, 2003, no. 3, pp. 477–483.
- [5] Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Serant F.A., Tomilov V.G., Safronov A.V., Zikov S. V. Kriterii effektivnosti pri eksергетической optimizatsii funktsionirovaniia energopreobrazovaniia [Exergetic efficiency criterion in improving the functioning of energy conversion]. Doklady TUSURa, 2012, no. 1(25), pp. 208–211.
- [6] Shchinnikov P.A. Povyshenie tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti TETs putem perekhoda na novye rezhimy raboty s vnutrikvartal'nymi teplonasosnymi ustanovkami [Increase of technical and economic efficiency of CHP by the transition to new modes of intra with heat pumps] // Teplofizika i aeromekhanika, 2000, no. 4, pp. 581–590.
- [7] Shchinnikov P.A. Mult'iennergoblok s kompleksnoi pererabotkoi tverdogo topliva [Multienergoblok with complex processing of solid fuels]. Energetika. Izvestiia VUZov i energeticheskikh ob"edinenii SNG, 2001, no. 3, pp. 83–89.
- [8] Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Lovtsov A.A. Energoberegaiushchaia parogazovaia tekhnologiya rekonstruktsii pileugol'noi TETs [Catchers gas technology for pulverized coal CHP reconstruction]. Teplofizika i aeromekhanika, 2002, no. 3, pp. 445–449.
- [9] Shchinnikov P.A. Nauchno-metodicheskie osnovy issledovaniia energoblokov TES [Scientific and methodological basis of the research of power units]. Nauchnyi vestnik NGTU, 2004, no. 13(18), pp. 161–168.
- [10] Nakoriakov V.E. Kompleksnye tekhniko-ekonomicheskoe issledovaniia PGU s potochnymi gazifikatorami [Complete feasibility studies with flow gasifiers PSU] // Izvestiia RAN. Energetika, 2010, no. 4, pp. 184–193.

Щинников Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН, заведующий кафедрой тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – экология и теплоэнергетика. Имеет более 150 публикаций, в том числе 6 монографий. E-mail: tes.power@gmail.com

Ноздренко Геннадий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета, академик РАЕН, академик МЭА, заслуженный деятель науки РФ. Основное направление научных исследований – системные исследования в энергетике и эксергетический анализ. Имеет более 200 публикаций, в том числе 6 монографий. E-mail: tes.power@gmail.com

Сафронов Антон Валерьевич, ассистент кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматизация теплоэнергетических процессов. Имеет более 15 публикаций. E-mail: a.v.safronov@ngs.ru

P.A. Shchinnikov, G.V. Nozdrenko, A.V. Safronov

Fuel economy on Thermal Power Plant (TPP) at the expense of application of balance matching method

Calculation of the technical and economic indicators (TEI) is one of the main objectives of operation of combined heat and power plant. Eventually, on the basis of TEI conduct tariff policy and build long-term prospects of development. Therefore TEI calculation – an actual task for thermal power plant. However, definition of TEI is possible

only with some accuracy. This accuracy depends on methodical errors of algorithm of calculation, errors of measuring equipment and a measurement technique. The rational algorithm of calculation of TEI allows to reduce influence of the first group of errors on the accuracy of the end result. But even at a complete elimination of an error of this group the actual error of calculation of TEI in the working range of change of parameters when using serially released devices is in limits 0,3÷0,6 of % for steam generator efficiency, 2,3÷3,0 of % for turbine and power unit indicators as a whole. These errors at measurements of parameters conduct to not convergence of the balance equations, and for really functioning thermal power plants the size of it can reach 10÷20 of % depending on structure, a state and extent of automation of technological processes.

The error of calculation of TEI when using information systems can be lowered as a result of a number of actions. One of such actions is an increase of accuracy of information due to application of a method of coordination of balances within which specification of the most significant for definition of TEI of indicators is provided, the economy of fuel is a consequence.

Key words: divergence, energy balance, TPP, reconciliation of balances, consumables, thermodynamic and specifications, TEI, savings overrun, fuel.