

УДК 621.311

П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, Ф.А. Серант, В.Г. Томилов, А.В. Сафронов

Согласование материальных и энергетических балансов

Для функционирующей ТЭС несходимость энергобалансов может составить 10...20% из-за погрешности измерения расходно-термодинамических и технических параметров. В статье рассматривается разработанная на основе оптимизационно-энергетической методологии методика согласования энергобалансов ТЭС.

Ключевые слова: согласование балансов ТЭС, погрешность измерения.

Для функционирующей ТЭС несходимость энергобалансов может составить 10...20% из-за погрешности (в основном методической) измерения расходно-термодинамических и технических параметров. Поэтому согласование энергобалансов при расчете технико-экономических показателей и оптимизации режимов функционирования ТЭС является актуальным.

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

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

где v_n – неизмеряемые (рассчитанные) 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 измеренной и вычисленной 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:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H_k}{\partial v_i} \right) \delta_i + \sum_{j=1}^u \left(\frac{\partial H_k}{\partial x_j} \right) \varepsilon_j &= \omega_k, \quad (k=1, \dots, r), \\ \left(\frac{\partial H}{\partial v_i} \right) \lambda &= 0, \quad (i=1, \dots, n), \\ \frac{\varepsilon_j}{m_j^2} &= \sum_{k=1}^r \left(\frac{\partial H_k}{\partial x_j} \right) \lambda_k, \quad (j=1, \dots, u), \end{aligned} \quad (3)$$

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

Показана принципиальная схема энергоблока с характерными измеряемыми параметрами (рис. 1).

Для рассматриваемого типа энергоблока (или эквивалентного энергоблока – для ТЭС с поперечными связями) при электрической и тепловой мощности задаются: электрическая мощность N_r на r -м режиме работы в соответствии с электрическим графиком нагрузки; температура окружающего воздуха, для которой (при качественном регулировании отпуска тепла) рассчитывается температурный и тепловой графики нагрузки при заданном коэффициенте теплофикации и определяются температуры прямой и обратной сетевой воды, давление пара в Т-отборе на r -м режиме. 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, пара-

метры топлива). Функционально зависимые параметры – $y_i \in Y$. К этим параметрам, в частности, относятся расходы рабочих сред, передаваемые тепловые и эксергетические потоки. Многомерное вещественное пространство R^n включает множество независимых X и зависимых Y параметров.

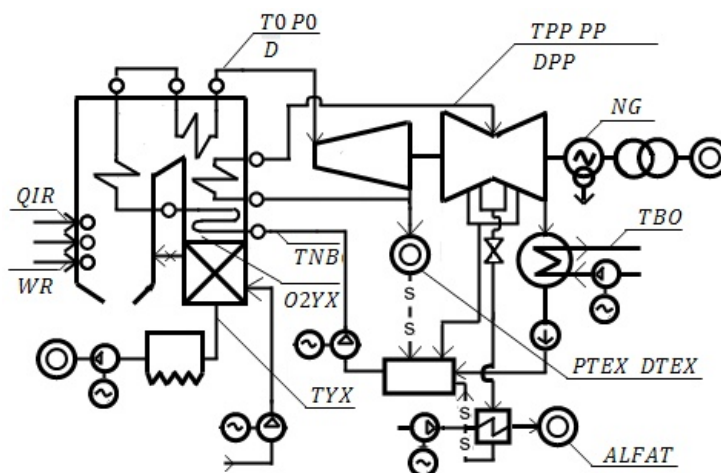


Рис. 1. Схема измерения расходно-термодинамических и технических параметров энергоблока ТЭС (обозначения параметров приведены в таблице)

Размерность пространства n обусловлена количеством оптимизируемых переменных. Условия протекания процессов, системные и физико-технические ограничения представлены в виде неравенств-равенств:

$$\begin{aligned} F(\vec{O}, Y) &< 0, \\ \mathbf{X}^* &\leq X \leq \mathbf{X}^{**}, \end{aligned} \tag{4}$$

где \mathbf{X}^* , \mathbf{X}^{**} – векторы наименьших и наибольших значений (определяемые погрешностями измерения параметров с учетом методических погрешностей); F – нелинейные вектор-функции несходимости балансов (функции энергетического, расходного и эксергетического балансов):

$$\sum_{k \in V(i)} (\eta \cdot M^x \cdot h)_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta \cdot M^y \cdot h)_{ij} < 0; \tag{5}$$

$$\sum_{k \in V(i)} M^x_{ki} - \sum_{j \in W(i)} M^y_{ij} < 0; \tag{6}$$

$$\sum_{k \in V(i)} E^x_{ki} - \sum_{j \in W(i)} E^y_{ij} \cdot \eta_i^{-1} < 0. \tag{7}$$

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, изменения 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 агрегирова-

ния 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 [1]

$$\eta_e = \frac{\eta_N \cdot N + \eta_T \cdot E_T}{N + E_T}, \quad (8)$$

где эксергетические КПД по отпуску:

– электроэнергии N :

$$\eta_{4N} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N; \quad (9)$$

– теплоэксергии E_T :

$$\eta_{6T} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N; \quad (10)$$

η_1, \dots, η_6 – эксергетические КПД функционирующих частей энергоблока; ε_S – структурный коэффициент эксергетических связей, учитывающий взаимосвязи между функционирующими частями энергоблока, а также внешние системные связи: $\varepsilon_S = F_{01}^{-1} \cdot [1 - \eta_1^{-1} \sum \prod F_{ij} \eta_i^{-1}]$; F_{ij} – относительные эксергии.

Эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате:

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

Оптимизатор представлен как:

$$\left\{ \min_{x \in R^n} [\eta_e(x)]^{-1} \left[\bar{\varphi}_u(\omega) = 0, u \in U \right] \right\}, \quad (11)$$

где $\bar{\varphi}_u(\omega)$ – вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений; U – множество логико-числовых операторов; $\omega = (x, G, R^n, L)$ – информационная структура; L – множество логических управляющих параметров; G – множество внешних связей и исходных данных; x – измеряемые параметры.

Минимум функции (11) находится методом случайного направленного поиска [1] с учетом ограничений (4).

Для примера в таблице приведены результаты согласования энергобалансов энергоблока №1 НТЭЦ-5 для одного из январских режимов работы. Обозначения измеряемых параметров в таблице соответствуют обозначениям на рис. 1.

Энергоблок №1 НТЭЦ-5

Наименование параметров, размерность	Значение (до согласования)	Значение (после согласования)
1	2	3
Расход пара на турбину, D , кг/с	186,4	164,5
Начальное давление пара, P_0 , МПа	12,5	12,43
Начальная температура пара, T_0 , °С	543	545

Продолжение таблицы

1	2	3
Температура питательной воды, TNB, °C	248	248
Расход пара промперегрева, DPP, МПа	542	541
Коэффициент теплофикации, ALFAT	0,48	0,51
Мощность на клеммах генератора, NG, МВт	175,8	176,7
Низшая рабочая теплота сгорания топлива, QIR, МДж/кг	21,16	21,07
Расход технологического пара, DTEX, кг/с	0	0
Давление технологического пара, PTEX, МПа	0	0
Температура уходящих из котла газов, TУХ, °C	159	161
Количество кислорода в уходящих газах, O2УХ, %	3,2	3,3
Влага топлива (по рабочей массе), WR, %	14	14
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора, TВО, °C	25,6	25,1
Расход топлива, В, кг/с	22,82	23,25
Химическая энергия топлива, E0, МВт	489,8	482,7
Полезно используемая теплоэнергия, Q1, МВт	532,6	478,0
КПД котла по обратному балансу	0,958	0,958
Несходимость энергобаланса котла, %	-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 турбогенератора, %	+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. С другой стороны, результаты согласования энергобалансов показывают необходимость уточнения погрешностей измерения (особенно методической составляющей) параметров для сведения несходимости энергобалансов к значению, близкому (с заданной точностью) к нулю.

Выводы

1. Для функционирующей ТЭС несходимость энергобалансов может составить 10...20% из-за погрешности измерения расходно-термодинамических и технических параметров.

2. Разработана на основе оптимизационно-эксергетической методологии методика согласования энергобалансов энергоблоков ТЭС. Показано, что согласование энергобалансов позволяет существенно уточнить расходно-термодинамические и технические параметры и уменьшить (с 13–20 до 2–3%) несходимость энергобалансов функционирующего энергоблока. С другой стороны, результаты согласования энергобалансов показывают необходимость уточнения погрешностей измерения (особенно методической составляющей) параметров для сведения несходимости энергобалансов к значению, близкому (с заданной точностью) к нулю.

Литература

1. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, В.Г. Томилов и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 528 с.

Щинников Павел Александрович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. тепловых электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: (383) 346-11-42
Эл. почта: tes.nstu@gmail.com

Ноздренко Геннадий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор каф. тепловых электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: (383-3) 46-11-42
Эл. почта: tes.nstu@gmail.com

Серант Феликс Анатольевич

Д-р техн. наук, генеральный директор ЗАО «ЗИО-КОТЭС»
Тел.: (383-3) 44-41-21
Эл. почта: info@cotes-group.info

Томилов Виталий Георгиевич

Доктор технических наук, профессор каф. тепловых электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: (383-3) 46-11-42
Эл. почта: tes.nstu@gmail.com

Сафронов Антон Валерьевич

Аспирант каф. тепловых электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: (383-3) 46-11-42
Эл. почта: tes.nstu@gmail.com

Shchinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Serant F.A., Tomilov V.G., Safronov A.V.

Matching of the material and energetic balances

For operating TPP divergence of energy balances can be 10 ... 20% due to measurement error, the expenditure of the thermodynamic and technical parameters. The article deals with the optimization based on developed methodology, exergy method of matching of energobalans TPP.

Keywords: agreement balances TPS, the measurement error.
