

УДК 621.3.01.403

ISSN 0040-3636

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:

- Сравнительная экологическая оценка установок нетрадиционной энергетики
- Экспериментальное определение размеров капель водяного потока, уносимых высокотемпературными газами
- Оптимальное распределение нагрузки между источниками тепла на основе модели Курно

8

2015

ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»

Автоматизация и тепловой контроль в энергетике

Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов
при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС
на основе метода регуляризации некорректных задач

Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В., Зимин А.П., Разинков А.А.

72

Сдано в набор 16.03.2015 г.	Подписано к печати 18.06.2015 г.	Дата выхода в свет 31.08.2015 г.	Формат 60 × 88 ¹ / ₈
Офсетная печать	Усл. печ. л. 10.0	Усл. кр.-отт. 6.3 тыс.	Уч.-изд. л. 10.0
	Тираж 605 экз.	Цена свободная	Бум. л. 5.0

Учредители: Российская академия наук,
Российское научно-техническое общество энергетиков и электротехников

Издатель: МАИК "НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
Отпечатано в типографии "Люксор", 119415 Москва, просп. Вернадского, 37, корп. 1

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач

© 2015 г. Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В., Зимин А.П., Разинков А.А.

Ивановский государственный энергетический университет¹

e-mail: lgv83@yandex.ru

На основе математического аппарата регуляризации Тихонова сформулирована задача сведения материальных и энергетических балансов по данным, получаемым программно-техническими комплексами ТЭС от систем технического учета, с точностью, обусловленной метрологическими характеристиками исправных поверенных приборов. Предложена базирующаяся на теории графов матричная модель материальных и энергетических потоков в системах сложной структуры, позволяющая формализовать решение конкретной практической задачи на этапе формирования модели системы. При формулировании задачи сведения материальных и энергетических балансов учтены различная степень достоверности определения исходных значений расходов теплоносителей и их теплофизических параметров, а также технологические ограничения, выражаемые балансовыми соотношениями, по массе и энергии для отдельных узлов системы или любой их совокупности. Предложены аналитические и численные решения задачи в различных вариантах ее постановки, различающихся принятыми допущениями и учитываемыми ограничениями. Показано влияние методики сведения материальных и энергетических балансов по результатам измерения параметров потоков питательной воды и пара в тепловой схеме теплоэлектроцентрали на точность расчета удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии. Выявлено, что наиболее зависимыми при этом являются номинальные значения показателей и связанные с ними экономия или перерасход топлива. При их расчете с использованием различных методик сведения балансов возможно появление ошибки, сопоставимой с утвержденным нормативно-технической документацией по топливониспользованию резервом тепловой экономичности электростанции. По результатам работы обоснован выбор варианта постановки задачи сведения материальных и энергетических балансов и метода ее решения, реализация которых в реальных программно-технических комплексах ТЭС обеспечивает повышение объективности расчета фактических показателей тепловой экономичности оборудования.

Ключевые слова: тепловая экономичность ТЭС, система технического учета, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, метод регуляризации.

DOI: 10.1134/S0040363615080032

При определении фактических значений технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования тепловых электрических станций одним из этапов является сведение материальных и энергетических (теплового, электрического) балансов [1].

Невязка баланса может быть обусловлена не только метрологическим несовершенством приборов учета, но и их неисправностью или даже временным отсутствием. Система балансовых уравнений, составленных для некоторой технологической схемы, чаще недоопределена, что обуславливает возможность получения наиболее вероятного, но не точного решения. При этом правильность решения существенно зависит от исходного небаланса.

¹ 153003, Россия, г. Иваново, Рабфаковская ул., д. 34. ИГЭУ.

Поэтому в руководящем документе [2] зафиксировано предельное значение невязки основного материального баланса ТЭС по показаниям приборов учета на уровне 2–3%.

Наиболее существенные недостатки руководящих документов [1, 2] в области требований обеспечения качества измерения основных параметров, участвующих в расчете ТЭП, состоят в следующем:

- предписывается выполнение контроля сходимости материального баланса только по одному наиболее технологически значимому контуру (в частности, от расходомеров питательной воды котлов до расходомеров свежего пара турбоагрегатов) без учета балансов по прочим участкам тепловой схемы ТЭС;

- задается заранее завышенное максимально допустимое значение небаланса, не учитывающее различную степень достоверности определения исходных значений каждого параметра в конкретных случаях;

- сведение материальных балансов осуществляется без согласования с энергетическими балансами, что не позволяет оценить качество измерения давления и температуры потоков теплоносителей.

На практике наличие указанных недостатков приводит к существенным ошибкам при расчете ТЭП. Например, для условий Омской ТЭЦ-4 увеличение невязки материального баланса схемы главных паропроводов на 1% приводит в среднем-зимнем режиме к ошибке в определении перерасхода топлива в условном исчислении около 500 т за месяц. Невязка в 1% материального баланса системы паропроводов собственных нужд давлением 0.8–1.3 МПа эквивалентна ошибке в определении перерасхода топлива в условном исчислении более 280 т за месяц (при этом характерные значения невязок материальных балансов по измеренным показателям для паропроводов собственных нужд, как правило, на порядок превышают указанное значение 1%). При существующем подходе к оценке достоверности данных системы технического учета указанные затраты могут быть списаны на недостатки эксплуатации либо на плохое техническое состояние оборудования, а отчетные показатели тепловой экономичности ТЭС окажутся искаженными.

Таким образом, актуальной с точки зрения повышения объективности расчета ТЭП оборудования ТЭС задачей является разработка расчетных алгоритмов, обеспечивающих при сведении балансов возможность учета различной степени достоверности определения параметров исходной информации, а также метрологических и технологических ограничений по всем или некоторым выбранным узлам тепловой схемы. Разработке таких алгоритмов посвящена данная работа. При наличии некоторой совокупности результатов измерений параметров, а также комплекса очевидных балансовых соотношений, которым должны удовлетворять эти данные, требуется ответить на вопрос, обусловлены ли расчетные невязки балансов по контролируемым узлам схемы номинальными характеристиками погрешности системы мониторинга либо увеличенные невязки по всем или некоторым узлам являются следствием неисправности приборов или выхода их показаний за границы номинальных метрологических характеристик. В последнем случае важно локализовать источник ошибки.

Для решения рассматриваемой задачи целесообразно использовать метод регуляризации Тихонова [3]. Концепция регуляризации сводится в данном случае к поиску разумного компромисса

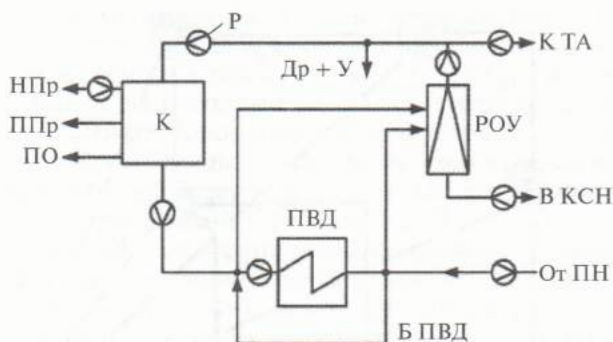


Рис. 1. Фрагмент структурной схемы энергетической системы.

ПН – питательные насосы; ПВД – группа подогревателей высокого давления; Б ПВД – байпас группы ПВД по питательной воде (“холодный стояк”); К – котел; НПр и ППр – соответственно непрерывная и периодическая продувка котла; ПО – пробоотборные точки; Др + У – дренажи и утечки; РОУ – редукционно-охладительные установки свежего пара (включая растопочные и быстродействующие); ТА – турбоагрегат; КСН – паровой коллектор собственных нужд; Р – расходомер

между минимальным значением невязки балансов по всем узлам и минимальным рассогласованием решения с исходной информацией. В соответствии с терминологией регуляризации Тихонова будем называть эту исходную информацию, включающую показания приборов учета и экспертные оценки для параметров, не обеспеченных измерениями, априорной.

Концепция регуляризации Тихонова [3] позволяет исходную некорректную задачу

$$AY + \sigma = B \quad (1)$$

свести к задаче минимизации следующей функции:

$$F_c(Y, \lambda) = |AY - B|^2 + \lambda |Y - Y_0|^2 \Rightarrow \min. \quad (2)$$

Здесь Y, Y_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; A, B – известные операторы модели системы; σ – числовой параметр, характеризующий погрешность правой части уравнения; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом. При минимизации функции $F_c(Y)$ получается регуляризованное решение $Y(\lambda)$, зависящее от параметра λ .

Для использования метода регуляризации при анализе достоверности результатов измерения расходов теплоносителей необходимо построить математическую модель исследуемого объекта, т.е. определить вид операторов A, B . Построение модели материальных потоков проиллюстрируем на примере участка тепловой схемы энергоблока с барабанным паровым котлом. Структурная схема для нее с указанием точек измерения расхода теплоносителей приведена на рис. 1.

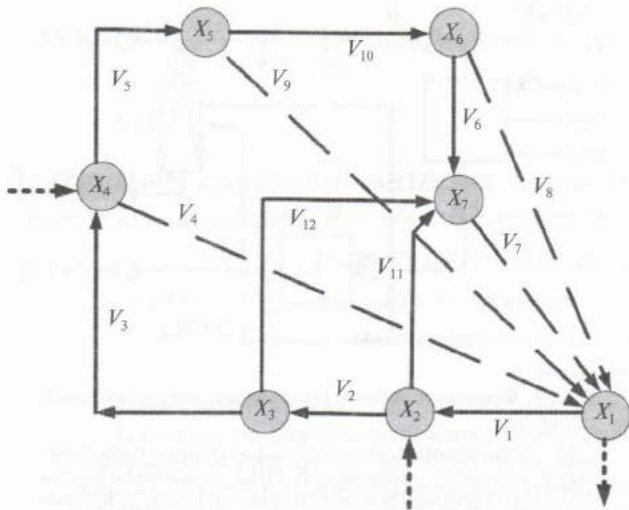


Рис. 2. Структура графа $G = (X, V)$, соответствующего технологической схеме по рис. 1.

X_1 – объединение внешних потоков системы; X_2 и X_3 – питательная вода соответственно до и после ПВД; X_4 – котел; X_5 – условная точка локализации дренажей и утечек из главных паропроводов; X_6 – отбор пара на РОУ; X_7 – РОУ. Расход: V_1 – питательной воды от ПН; V_2 – питательной воды через ПВД и Б ПВД (суммарный); V_3 – питательной воды в котел; V_4 – среды с НПр, ППр и ПО (суммарный); V_5 – пара от котла; V_6 и V_7 – пара соответственно по горячей и холодной стороне РОУ; V_8 – пара на турбину; V_9 – с дренажами и утечками из главных паропроводов; V_{10} – пара от котла за вычетом дренажей и утечек из главных паропроводов; V_{11} и V_{12} – соответственно холодной и горячей питательной воды на впрыск в РОУ

Для описания структуры системы введем направленный граф $G = (X, V)$ [4]. В качестве узлов графа (X) будем рассматривать узлы смешения и распределения потоков, а трубопроводы между узлами представим соответствующими ветвями графа (V_j). Без снижения общности подхода некоторые параллельные трубопроводы могут быть представлены в графе одной ветвью. Структура графа $G = (X, V)$ для рассматриваемого примера

представлена на рис. 2. Для обеспечения возможности проверки и сведения баланса для всей системы внешние потоки схемы условно заведены в первый узел. Внешние связи в узлах 1, 2 и 4, показанные пунктирными стрелками, потребуются позже при совместном рассмотрении материальных и энергетических балансов в системе.

Для модельного описания структуры системы используется матрица инцидентности графа, порядок построения которой проиллюстрирован табл. 1. Каждая строка таблицы относится к соответствующему узлу графа X_i , каждый столбец – к ветви графа V_j . Если начало j -й ветви графа размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы инцидентности равен единице ($a_{ij} = 1$). Если конец j -й ветви графа размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы равен минус единице ($a_{ij} = -1$).

Матрица инцидентности A размером $n \times m$ ($n = 7$ – число строк или узлов графа, $m = 12$ – число столбцов или ветвей графа), построенная указанным способом, для рассматриваемого примера имеет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Произведение матрицы инцидентности A на вектор V дает в каждом элементе матрицы AV небаланс массы в соответствующем узле. Это позволяет известную постановку некорректной задачи (1) с учетом сделанных замечаний и введенных обозначений ($B = 0, Y = V$) записать в виде

$$AV + \sigma = 0, \quad (3)$$

где в качестве оператора A использована матрица инцидентности.

Таблица 1. Построение матрицы инцидентности графа для технологической схемы по рис. 1

X	V											
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}
X_1	1	0	0	1	0	0	1	-1	-1	0	0	0
X_2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
X_3	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
X_4	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
X_5	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	0
X_6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1	0	0
X_7	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	-1	-1

Для решения задачи с учетом различной степени достоверности определения отдельных параметров априорной информации (различных метрологических характеристик средств измерения или их исправности, точности экспертных оценок) авторами предложен метод векторной регуляризации. В этом случае число параметров регуляризации совпадает с числом параметров априорной информации и вместо скаляра λ необходимо использовать диагональную матрицу параметров регуляризации λ .

С учетом сделанных замечаний формулировка оптимизационной задачи (2) принимает следующий вид:

при скалярной постановке

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + \lambda|V - V_0|^2 \Rightarrow \min; \quad (4)$$

при векторной постановке

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + |\lambda(V - V_0)|^2 \Rightarrow \min. \quad (5)$$

Первое слагаемое в целевой функции (4) или (5) показывает суммарную невязку балансов по всем узлам $\Delta = |AV|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора $\Delta V = |V - V_0|$.

При решении задачи необходимо учесть также метрологические и технологические ограничения

$$V_i \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}]; \quad (6)$$

$$\Delta G_i \in [0; \Delta G_i^{\max}], \quad (7)$$

где V_i^{\min} и V_i^{\max} — границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения (или экспертной оценки); ΔG_i^{\max} — предельно допустимый небаланс массы в узлах, обусловленный погрешностями средств измерений в пределах номинальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Аналитическое решение задачи (4) или (5) может быть получено без учета ограничений (6), (7):

при скалярной постановке (решение известно [3])

$$V = (A^T A + \lambda E)^{-1} \lambda V_0; \quad (8)$$

при векторной постановке (решение получено путем дифференцирования уравнений (5) по искомым параметрам и приравнивания производной нулю)

$$V = (A^T A + \lambda^2 E)^{-1} \lambda^2 V_0, \quad (9)$$

где E — единичная матрица; верхние индексы “T” и “-1” обозначают транспонирование и обращение матрицы соответственно.

Для численного решения оптимизационной задачи (4) или (5) с учетом ограничений (6), (7) предлагается использовать алгоритмы статистического программирования [5]. При этом выпол-

няется многократная генерация случайным образом вектора расходов V вокруг априорных значений его элементов в диапазоне, заданном метрологическими ограничениями (6). Такая генерация решений автоматически приводит к выполнению метрологических ограничений. Затем сгенерированное решение проверяется на выполнение технологических ограничений (7) в заданных узлах. При выполнении всех ограничений полученные варианты решения сравниваются по значению целевой функции, и из этих вариантов выбирается оптимальный, которому соответствует минимальное значение целевой функции (4) или (5). Если не удалось найти решение, удовлетворяющее заданным ограничениям, следует признать наличие неисправности приборов или выхода их за границы номинальных метрологических характеристик. Возникающая в этом случае задача локализации источника ошибки решается поиском узлов с максимальными небалансами массы и соответствующих им ветвей.

Анализ рассмотренных решений проведен для энергетической системы, представленной на рис. 1. Исходные для расчета данные в виде вектора значений расходов по ветвям графа V_0 , а также решения задачи в различных ее постановках приведены в табл. 2. Следует отметить, что расчетный пример базируется на данных технического учета за месяц, чтобы обеспечить возможность последующего расчета перерасхода или экономии топлива по ТЭЦ.

Выявлены следующие характеристики рассмотренных вариантов решения задачи:

- задача в скалярной постановке (4) и ее аналитическое решение (8) позволяют найти искомый вектор значений расходов по схеме, но не учитывают метрологические и технологические ограничения;

- задача в скалярной постановке (4) и ее численное решение позволяют учесть метрологические и технологические ограничения, но не учитывают различную степень достоверности определения результатов измерения отдельных параметров, т.е. различия в метрологических характеристиках работающих в составе системы мониторинга средств измерения;

- задача в векторной постановке (6) и ее численное решение позволяют получить решение с учетом метрологических и технологических ограничений, а также учесть различную степень достоверности определения результатов измерения отдельных параметров. Именно этот вариант рекомендуется для практической реализации в программно-техническом комплексе ТЭС.

Аналитические решения (8) и (9) не учитывают ограничений (6), (7) и поэтому не представляют практического интереса, однако они полезны для проверки правильности решения рассматриваемой задачи численным методом.

Таблица 2. Исходная для расчета (априорная) информация и результаты решения задачи регуляризации

Показатель	Номер ветви графа i											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Исходное значение расхода $V_{0i} \times 10^{-6}$, т/мес	1.0157*	1.0596*	1.0571*	0.0127	1.0394*	0.0294*	0.0357*	0.9938*	0.0022	1.0232	0.0015	0.0025
Погрешность определения исходных значений расхода, %	2.3	1.1	0.9	5.2	1.2	1.8	2.2	1.1	8.5	2.1	1.2	1.5
Энтальпия h_i , кДж/кг	691.9*	954.5*	960.1*	1594.9*	3488.2*	3487.5*	2991.2*	3478.4*	3488.2*	3488.2*	691.9*	954.5*
Погрешность определения исходных значений энтальпии, %	1.76	1.65	1.76	1.85	1.50	1.53	1.32	1.46	1.50	1.50	1.76	1.65
Решение задачи регуляризации материальных потоков (без учета ограничений по потокам энергии) $V_i \times 10^{-6}$, т/мес												
Аналитическое при скалярной постановке задачи (4)	1.0240	1.0560	1.0542	0.0110	1.0381	0.0296	0.0335	0.9917	0.0017	0.0248	-0.0046	0.0114
Численное при скалярной постановке задачи (4)	1.0443	1.0440	1.0438	0.0189	1.0249	0.0296	0.0301	0.9946	0.0007	1.0242	0.0003	0.0002
Численное при векторной постановке задачи (5) с учетом ограничений (6) и (7)	1.0267	1.0544	1.0534	0.0127	1.0338	0.0296	0.0359	0.9900	0.0023	1.0235	0.0015	0.0025
Решение задачи совместной регуляризации материальных и энергетических потоков												
С использованием критерия:												
аддитивного:												
$V_i \times 10^{-6}$, т/мес	1.0375	1.0514	1.0505	0.0133	1.0282	0.0293	0.0351	0.9871	0.0021	1.0225	0.0015	0.0025
$H \times 10^{-6}$, ГДж/мес	0.7074	1.0001	1.0026	0.0213	3.5366	0.1016	0.1056	3.4542	0.0072	3.5204	0.0011	0.0024
мультипликативного												
$V_i \times 10^{-6}$, т/мес	1.0365	1.0558	1.0528	0.0129	1.0271	0.0291	0.0356	1.0026	0.0022	1.0354	0.0015	0.0024
$H \times 10^{-6}$, ГДж/мес	0.7251	1.0029	1.0055	0.0209	3.6294	0.1026	0.1066	3.5229	0.0077	3.6333	0.0010	0.0023
Примечания: 1. Знаком * отмечены измеряемые параметры. 2. Для вариантов постановки задачи с учетом технологических ограничений в качестве такового принята максимальная невязка материального баланса для узла 1, равная 2%, что соответствует [2].												

Полученные результаты обеспечивают решение поставленной задачи проверки соответствия данных системы мониторинга расходов теплоносителя номинальным метрологическим характеристикам используемых средств измерения, что удовлетворяет требованиям нормативных документов [1, 2]. Однако рассматриваемая постановка задачи не позволяет обеспечить согласование материальных и энергетических балансов в системе.

В соответствии с требованиями нормативных документов [1, 2] энергетические балансы сводятся непосредственно при определении фактических ТЭП работы оборудования. При этом значения расходов теплоносителей принимаются по результатам сведения материальных балансов (а это сведение выполняется без учета ограничений, накладываемых балансами энергии), значения давления и температуры потоков – по данным фактических измерений, а сходимости энергетических балансов обеспечивается корректировкой собственно значений энергетической мощности потоков теплоносителя. При таком подходе тепловые (энергетические) нагрузки оборудования оказываются не увязанными с расходами теплоносителя и их теплофизическими характеристиками. Поэтому для повышения достоверности определения фактических ТЭП работы оборудования к алгоритмам первичной обработки данных целесообразно предъявлять требования по обеспечению контроля сходимости не только материальных, но и энергетических балансов в системе. В связи с этим целесообразно находить решение рассмотренной задачи (4) или (5) с учетом балансовых соотношений по энергетической мощности потоков теплоносителей.

При построении энергетических балансов будем выделять два вида потоков энергии: внутренний и внешний. Потоки энергии, связанные с потоками теплоносителя внутри системы, считаются внутренними. Потоки энергии, передаваемые теплоносителям в систему извне (например, в котле или в ПВД для представленной на рис. 1 схеме), считаются для нее внешними. В рамках концепции регуляризации Тихонова исходная некорректная задача формулируется в виде

$$\mathbf{AV} + \sigma = 0, \quad \mathbf{AH} + \sigma_1 = \mathbf{B}, \quad (10)$$

где $\mathbf{H} = \mathbf{V} \times \mathbf{h}$ – вектор потоков энергии; \mathbf{h} – вектор энтальпий (точка перед знаком умножения показывает почленное умножение соответствующих элементов двух векторов); σ и σ_1 – числовые параметры, характеризующие погрешность правых частей уравнений; \mathbf{B} – матрица-столбец, учитывающая внешние для системы потоки энергии.

При решении задачи совместной регуляризации массовых и энергетических потоков необходимо минимизировать две функции цели или два критерия F_{c1} и F_{c2} , т.е. рассматривать по существу

задачу многокритериальной оптимизации (в скалярной постановке) типа

$$\left. \begin{aligned} F_{c1}(\mathbf{V}, \lambda_1) &= |\mathbf{AV}|^2 + \lambda_1 |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|^2 \Rightarrow \min; \\ F_{c2}(\mathbf{H}, \lambda_2) &= |\mathbf{AH} - \mathbf{B}|^2 + \lambda_2 |\mathbf{H} - \mathbf{H}_0|^2 \Rightarrow \min, \end{aligned} \right\} (11)$$

где \mathbf{H} , \mathbf{H}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка по потокам энергии.

Для решения многокритериальных задач известно несколько методов [5, 6], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Далее рассматриваются некоторые из них.

1. Замена нескольких критериев оптимизации одним интегральным критерием – аддитивным или мультипликативным, который получается соответственно либо сложением, либо перемножением исходных критериев с соответствующими коэффициентами их ценности. Преимуществом такого решения является относительная простота расчетов. К недостаткам следует отнести возможность получения таких решений, при которых при минимальных сумме или произведении критериев значения одного критерия будут компенсировать значения другого (поглощение одного критерия другим). Кроме того, выбор коэффициентов ценности критериев является во многом интуитивным, т.е. субъективным.

2. Другим способом решения многокритериальных задач является отыскание решения, оптимального или эффективного по Парето [7, 8]. Оптимальность по Парето или множество Парето – это множество альтернатив, у которых нет преимуществ перед другими по всем критериям одновременно. Для нашей задачи выбор оптимальных по Парето альтернатив будет означать определенный разумный компромисс между соблюдением балансов энергии и массы в выбранной энергетической системе.

Далее решается задача многокритериальной регуляризации применительно к рассмотренному ранее примеру.

Для решения этой задачи необходимо скорректировать матричную модель системы путем учета внешних потоков энергии. Итоговая структура графа $G = (\mathbf{X}, \mathbf{V})$ для рассматриваемой в примере технологической схемы представлена на рис. 2. Внешние энергетические потоки поступают в узлы X_4 (паровой котел) и X_2 (группа подогревателей высокого давления турбоустановки); отвод энергии из узла X_1 осуществляется со свежим паром на турбоагрегат.

При сведении энергетических балансов ранее рассмотренная задача дополняется следующим соотношением для энергии: $\Delta E = \mathbf{AH}$. Выражения для критериев оптимизации по массе и энергии с учетом метрологических и технологических

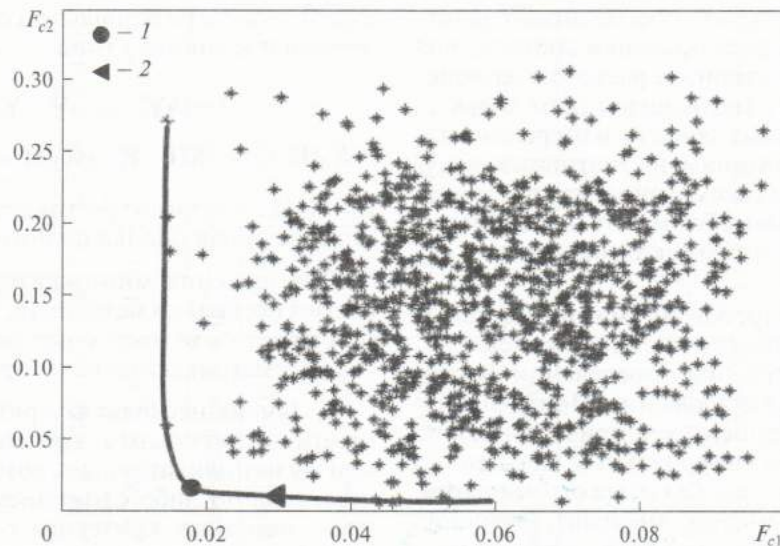


Рис. 3. Результаты численного решения задачи многокритериальной оптимизации.

F_{c1} и F_{c2} — значения критериев оптимизации согласно (12), (15); * — множество анализируемых вариантов; линия — множество Парето; 1, 2 — решения, полученные с использованием аддитивного и мультипликативного критерия соответственно

ограничений могут быть записаны (в векторной постановке) в виде

$$F_{c1}(\mathbf{V}, \lambda_1) = |\mathbf{AV}|^2 + |\lambda_1(\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)|^2 \Rightarrow \min; \quad (12)$$

$$V_i \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}]; \quad (13)$$

$$\Delta G_i \in [0; \Delta G_i^{\max}]; \quad (14)$$

$$F_{c2}(\mathbf{H}, \lambda_2) = |\mathbf{AH}|^2 + |\lambda_2(\mathbf{H} - \mathbf{H}_0)|^2 \Rightarrow \min; \quad (15)$$

$$h_i \in [h_i^{\min}; h_i^{\max}]; \quad (16)$$

$$\Delta E_i \in [0; \Delta E_i^{\max}]; \quad (17)$$

где λ_1 и λ_2 — диагональные матрицы малых положительных параметров регуляризации соответственно по массе и энергии; h_i^{\min} и h_i^{\max} — границы доверительных интервалов существования действительных значений энтальпии, обусловленные номинальными погрешностями средств измерения; ΔE_i^{\max} — предельно допустимые небалансы энергии в узлах, обусловленные погрешностями средств измерений в пределах номинальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Исходные данные в виде априорных значений расходов по ветвям графа V_i и энтальпий этих потоков h_i приведены в табл. 2, где указаны также номинальные значения пределов погрешности определения соответствующих параметров.

Решать задачу будем методом статистического программирования, описание которого дано ранее. Результаты решения при замене двух критериев оптимизации аддитивным и мультипликативным критериями приведены в табл. 2. В обоих случаях решения получены при равных коэффи-

циентах ценности критериев. Чтобы решить многокритериальную задачу с использованием множества Парето, изобразим точками в системе координат (F_{c1}, F_{c2}) все альтернативы, которые удовлетворяют заданным метрологическим ограничениям. Результаты расчетов показаны на рис. 3. Видно, что применение аддитивного и мультипликативного критериев дает решения, входящие в множество Парето.

Решение задачи с использованием множества Парето удобно, если требуется найти ответы на поставленные вопросы: обусловлены ли наблюдаемые небалансы массы и энергии в системе номинальными метрологическими характеристиками средств измерения и есть ли необходимость в нахождении регуляризованных значений расходов теплоносителя и энергии по тепловой схеме. В этом случае достаточно наложить на полученное множество решений ограничения, соответствующие технологически допустимым значениям суммарных небалансов массы и энергии. Если вертикаль и горизонталь, соответствующие этим ограничениям, пересекутся выше и/или правее линии, описывающей множество Парето, то на поставленные вопросы следует ответить положительно, в противном случае задача регуляризации решения не имеет. Необходимая локализация источника ошибки выполняется путем выбора узла с наибольшим небалансом массы и/или энергии.

Предложенное обобщение задачи регуляризации материальных и энергетических потоков обеспечивает повышение достоверности последующего расчета фактических ТЭП работы оборудования.

Таблица 3. Результаты расчета конечных ТЭП работы оборудования ТЭЦ при различных вариантах определения исходных значений расходов теплоносителей по тепловой схеме

Показатель	Без сведения баланса	Решение задачи регуляризации материальных потоков (без учета ограничений по потокам энергии)			Решение задачи совместной регуляризации материальных и энергетических потоков	
		аналитическое при скалярной постановке задачи (4)	численное при скалярной постановке задачи (4)	численное при векторной постановке задачи (5) с учетом ограничений (6) и (7)	численное с использованием аддитивного критерия	численное с использованием мультипликативного критерия
Удельный расход условного топлива на отпуск:						
электроэнергии, г ут/(кВт · ч):						
фактический	360.5	360.5	360.5	360.5	360.4	360.5
нормативный	355.1	357.8	359.8	358.9	357.3	357.4
тепловой энергии, кг ут/ГДж:						
фактический	43.80	43.80	43.80	43.80	43.83	43.80
нормативный	182.4	182.6	183.4	183.1	183.0	183.0
Перерасход топлива за период, т ут.	1054	610	117	324	570	545

Численное решение сформулированной задачи многокритериальной многопараметрической оптимизации позволяет учитывать различную степень достоверности определения результатов измерения отдельных параметров, а также технологические и метрологические ограничения по выбранным узлам или некоторой их совокупности.

В заключение анализируется влияние методики сведения материальных балансов для исследуемого примера (см. табл. 2) на итоговые показатели тепловой экономичности ТЭЦ. В табл. 3 приведены результаты расчета фактических и номинальных удельных расходов топлива по ТЭЦ за рассматриваемый месяц, а также значение резерва тепловой экономичности (выраженное в суммарном перерасходе или экономии топлива). В каждом из расчетов в полном объеме выполнены требования нормативного документа [1] по сведению теплового, топливного и электрического балансов ТЭЦ. Однако каждый раз использованы разные исходные значения основных потоков теплоносителя, полученные при сведении материального баланса соответствующим способом.

Из данных табл. 3 видно, что фактические значения удельных расходов топлива практически не зависят от применяемой методики сведения материального баланса, поскольку суммарный расход

сожженного топлива, отпуск тепловой и электрической энергии являются данными коммерческого учета, т.е. характеризуются высокой степенью достоверности. Но нормативные значения удельных расходов топлива, зависящие от фактических нагрузок каждого агрегата и, следовательно, от способа сведения балансов, изменяются в большей степени. Соответственно и итоговое значение перерасхода топлива отличается для некоторых вариантов практически на порядок. Очевидно, что наиболее представительными следует считать результаты расчетов, полученные при сведении материальных балансов в ходе решения задачи совместной регуляризации материальных и энергетических потоков.

Приведенный пример не претендует на общность выводов относительно влияния способа сведения материального баланса на значения итоговых ТЭП оборудования ТЭС, но доказывает, что это влияние может быть весьма существенным. Ошибка, вызванная некорректным сведением материального баланса или же отсутствием работы по сведению балансов, сопоставима с искомым показателем — резервом тепловой экономичности оборудования.

Список литературы

1. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. М.: ОРГРЭС, 1996.
2. СО 153-34.09.110. Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях. М.: ОРГРЭС, 1962.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
4. Алексеев В.В. Элементы теории множеств и теории графов. Саров: СарФТИ, 2001.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Дрофа, 2004.
6. Таха Х. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005.
7. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.
8. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физматлит, 2005.