

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Анастасия Сергеевна Зиновьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, ректор, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Сергей Ильич Шувалов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Векторная постановка задачи совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известна скалярная постановка задачи регуляризации материальных потоков применительно к газотурбинным установкам, позволяющая учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений. При этом отсутствует возможность учета индивидуальных нормируемых метрологических характеристик средств измерения, используемых для получения исходных значений контролируемых параметров.

Материалы и методы. Задача сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки формулируется в векторной постановке в рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач. Для решения задачи используются аналитический метод, метод итераций аналитических решений, а также метод статистического программирования.

Результаты. Получены аналитические и численные решения сформулированной задачи, в том числе учитывающие ограничения на область допустимых значений параметров, обусловленные нормируемыми метрологиче-

скими характеристиками средств измерения. Показано влияние применяемой методики сведения балансов на результаты расчета показателей тепловой экономичности газотурбинных установок.

Выводы. Для практического применения в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности газотурбинных установок рекомендуется использовать вариант векторной постановки задачи сведения балансов при ее решении методом итераций аналитических решений либо методом статистического программирования. Разработанная методика позволяет определять обоснованные фактические значения показателей тепловой экономичности оборудования при совпадении в пределах допустимой погрешности значений КПД брутто газотурбинной установки, рассчитываемых по прямому и обратному балансам.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, материальный баланс, энергетический баланс, невязка балансов, метод регуляризации, векторная регуляризация

Anastasia Sergeevna Zinovieva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Rector, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Evgeny Vitalievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Vector statement of simultaneous equations method of material and energy balances when calculating actual indicators of thermal efficiency of gas turbine plants

Abstract

Background. A scalar formulation of the problem of regularization of material flows in respect to gas turbine units is known. It allows you to consider the maximum permissible overall imbalance of mass and energy, as well as the maximum deviation of parameter values adjusted according to the results of balancing of their initial values. At the same time, there is no possibility to consider the individual standardized metrological characteristics of the measuring instruments used to obtain the initial values of the controlled parameters.

Materials and methods. The problem of simultaneous equations of the material and energy balances of a gas turbine unit is formulated in a vector value within the framework of Tikhonov's regularization concept when solving ill-posed problems. To solve the problem, the authors have used the analytical method, the method of iteration of analytical solutions, as well as the method of statistical programming.

Results. Analytical and numerical solutions of the stated problem are obtained. They, among other things, consider restrictions on the range of permissible parameter values which are determined by the standardized metrological characteristics of measuring instruments. The impact of the applied method of balancing procedure on the results of calculation of the thermal efficiency indicators of gas turbine plants is shown.

Conclusions. To apply thermal efficiency indicators of gas turbine units in the systems of automated monitoring, it is recommended to use a vector formulation of the problem of simultaneous equations when solving it by the method of iterations of analytical solutions or by the method of statistical programming. The developed methodology makes it possible to determine reasonable actual values of the indicators of equipment thermal efficiency under condition of the coincidence of the permissible error of the gross efficiency values of a gas turbine plant, calculated according to direct heat and indirect heat balances.

Key words: thermal power plant, gas turbine unit, thermal efficiency of equipment, material balance, energy balance, imbalance, regularization method, vector regularization

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.005-011

Введение. Показатели тепловой экономичности оборудования действующих тепловых электрических станций (ТЭС) определяются в соответствии с нормативными документами энергетической отрасли¹. При этом выделяются два уровня технической отчетности: первичная и вторичная отчетность. В рамках первичной технической отчетности в ежесуточном режиме осуществляется сбор и обработка результатов измерения контролируемых параметров, а также выполняется контроль сходимости балансов массы и энергии по отдельным агрегатам и технологическим системам². При обнаружении невязки балансов, превосходящей некоторые установленные пределы, принимаются соответствующие меры по нормализации работы системы мониторинга показателей работы оборудования. В рамках вторичной технической отчетности ежемесячно выполняется сведение материальных и энергетических балансов, а также рассчитываются фактические и номинальные значения показателей тепловой экономичности оборудования.

Применительно к газотурбинным установкам (ГТУ) нормативными документами не определены методики сведения материального и энергетического балансов. Расчет показателей тепловой экономичности при отсутствии сведения балансов, в свою очередь, может приводить к ошибочным выводам. Так, ранее нами на примере ГТУ типа GTX-100 одной из ТЭС выявлено [1], что ошибка значения КПД брутто ГТУ, получаемая при отсутствии сведения балансов, составила в среднем 4,8 % с отклонениями до 15 % в отдельных режимах. При этом условия работы электростанций на рынке электроэнергии и мощности, а также общие требования к оценке уровня тепловой экономичности оборудования диктуют необходимость расчета соответствующих показателей с точностью до десятых долей процента [2–7]. Это подтверждает актуальность разработки методики совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ по результатам измерения контролируемых параметров.

Материальный и энергетический балансы ГТУ по результатам измерения контролируемых при эксплуатации параметров записываются в следующем виде:

$$B_{\text{КС}}^{\text{И}} + G_{1\text{К}}^{\text{И}} - G_{2\text{Т}}^{\text{И}} = \Delta G; \quad (1)$$

$$Q_{\text{КС}}^{\text{И}} + Q_{1\text{К}}^{\text{И}} - Q_{2\text{Т}}^{\text{И}} - Q_5 - Q_{\text{ЭМ}} - N_{\text{ГТУ}}^{\text{И}} = \Delta E, \quad (2)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{К}}$ и $G_{2\text{Т}}$ – расходы топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и продуктов сгорания на выходе из турбины соответственно, кг/с; ΔG – невязка материального баланса, кг/с; $Q_{\text{КС}}$, $Q_{1\text{К}}$ и $Q_{2\text{Т}}$ – подведенные тепловые мощности к камере сгорания, с потоком воздуха к компрессору ГТУ и мощностью потока продуктов сгорания на выходе из ГТУ соответственно, МВт; Q_5 и $Q_{\text{ЭМ}}$ – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь ГТУ соответственно, МВт (определяются по результатам экспертной оценки [1]); $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт; ΔE – невязка энергетического баланса, МВт; индекс «и» указывает на измеренное значение показателя (результат прямого или косвенного измерения).

Ряд слагаемых уравнений (1) и (2) связаны между собой:

$$Q_{\text{КС}}^{\text{И}} = B_{\text{КС}}^{\text{И}} (h_{\text{топл}}^{\text{И}} + Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}); \quad (3)$$

$$Q_{1\text{К}}^{\text{И}} = G_{1\text{К}}^{\text{И}} h_{1\text{К}}^{\text{И}}; \quad (4)$$

$$Q_{2\text{Т}}^{\text{И}} = G_{2\text{Т}}^{\text{И}} h_{2\text{Т}}^{\text{И}}, \quad (5)$$

где $h_{\text{топл}}^{\text{И}}$, $h_{1\text{К}}^{\text{И}}$, $h_{2\text{Т}}^{\text{И}}$ – энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной соответственно (определяются по измеренным значениям параметров теплоносителей), МДж/кг; $Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ (принимается по данным коммерческого учета), МДж/кг.

Методы исследования. В рамках предстоящего этапа работы нами предложена методика совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ [1], основанная на концепции регуляризации Тихонова [8–12] и положительных результатах ее применения при сведении балансов по энергетическим установкам традиционного паросилового цикла [13]. Задача, сформулированная нами [1] в скалярной постановке, позволяет сводить рассматриваемые балансы, но не учитывает индивидуальную степень достоверности каждого параметра априорной (исходной) информации: отсутствует возможность использования заранее известной информации об исправности средств измерения, а также индивидуальных метрологических характеристиках измерительных каналов.

Преодолеть указанные недостатки ранее разработанной методики [1] позволяет переход к векторной постановке задачи сведения балансов:

$$F(\mathbf{Y}; \boldsymbol{\lambda}) = \|\mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{B}\|^2 + \|\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)\|^2 \Rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Y}_0$, как и при скалярной постановке задачи [1], представляют собой искомое регуляризованное решение и его априорную оценку; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ – известные операторы модели системы; $\boldsymbol{\lambda}$ – диагональная матрица параметров регуляризации, где число параметров регуляризации

¹ РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разработ. АО «Фирма ОРГРЭС».

² СО 153-34.09.110. Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разработ. ОРГРЭС.

совпадает с количеством входных параметров модели.

В рассматриваемом случае для ГТУ аналогично формулировке задачи в скалярной постановке [1] и с учетом (1)–(5) имеем:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{\text{топл}}^n + Q_{\text{н}}^p & h_{1\text{к}}^n & -h_{2\text{т}}^n & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{Y} = (B_{\text{кк}} \quad G_{1\text{к}} \quad G_{2\text{т}} \quad N_{\text{ГТУ}})^T; \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = 0, \quad (9)$$

где $\eta_{5\text{т}}$ определяется из равенства $Q_5 + Q_{\text{эм}} + N_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{\eta_{5\text{т}}}$ и характеризует тепло-

вые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электрохимические потери ГТУ; индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы.

Аналитическое решение задачи получено нами ранее [13] путем дифференцирования (6) по искомым параметрам и приравнивания производной нулю:

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{E})^{-1} \lambda^2 \mathbf{Y}_0, \quad (10)$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица; индекс «-1» указывает на обращение матрицы.

Полученное аналитическое решение может использоваться при оценке достоверности численного решения задачи (6) для тестовых примеров с учетом метрологических ограничений, позволяющих учесть индивидуальные метрологические характеристики средств измерения контролируемых параметров:

$$Y_i \in [Y_i^{\min}; Y_i^{\max}], \quad (11)$$

где $Y_i^{\min}$ и $Y_i^{\max}$ – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения (или экспертной оценки).

Численное решение задачи (6) с ограничениями (11) выполняется методом статистического программирования [14, 15] путем многократной генерации случайным образом вектора $\mathbf{Y}$ вокруг

априорных значений его элементов $\mathbf{Y}_0$ в пределах ограничений (11). Полученные варианты решения сравниваются по значению целевой функции F ; оптимальному решению соответствует вариант, в котором значение целевой функции минимально.

Результаты исследования. Апробация разработанных методик проведена на примере фактического режима работы ГТУ типа GTX-100, рассмотренном нами ранее в рамках скалярной постановки задачи [1].

В табл. 1 приведены сравнительные данные по решениям оптимизационной задачи, полученным при ее скалярной постановке (вариант С) [1] и векторной постановке в соответствии с (6). В последнем случае рассматриваются три варианта решения:

– вариант В-1 – аналитическое решение в соответствии с (10) при равных значениях λ^* ненулевых элементов диагональной матрицы параметров регуляризации λ ;

– вариант В-2 – решение, полученное методом итераций аналитических решений [13];

– вариант В-3 – численное решение методом статистического программирования [14, 15].

Метод итераций аналитических решений, разработанный нами в рамках предшествующих этапов исследования применительно к паротурбинным ТЭС [13], состоит в следующем. Первоначально находится аналитическое решение (10) при равных для всех Y_i значениях ненулевых элементов диагональной матрицы параметров регуляризации λ (т. е. решение по варианту В-1). Далее для каждого Y_i определяются такое минимальное значение соответствующего λ_i , которое удовлетворяет ограничениям (11). Проиллюстрируем это для рассматриваемого режима на примере расхода топлива и расхода воздуха на компрессор ГТУ (рис. 1). В данном случае для рассматриваемой первой итерации минимальные значения λ_i , удовлетворяющие (11), равны: 0,663 – по расходу топлива; 1,69 – по расходу воздуха.

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчетов для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения оптимизационной задачи*

Обозначение, единица измерения	Априорные значения Y_{0i}	Метрологические ограничения $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$	Регуляризованные значения Y_i			
			вариант С [1] ($\lambda = 0,95$)	векторная постановка		
				вариант В-1 ($\lambda_i = \lambda^* = 1,04$)	вариант В-2 / значение λ_i	вариант В-3
$B_{\text{кк}}$, кг/с	1,790	[1,772; 1,808]	1,810	1,805	1,807 / 0,245	1,807
$G_{1\text{к}}$, кг/с	101,46	[100,44; 102,47]	100,19	100,25	100,45 / 0,645	100,46
$G_{2\text{т}}$, кг/с	99,54	[97,05; 102,03]	100,79	100,74	100,94 / 0,564	100,91
$N_{\text{ГТУ}}$, МВт	29,23	[28,94; 29,52]	29,20	29,20	29,21 / 0,775	29,18
ΔG , кг/с	3,7100	–	1,2047	1,3125	1,2470	1,3555
ΔE , МВт	–0,0786	–	–0,0241	–0,0262	–0,0250	0,0029
$F(\lambda)$	13,7703	–	4,6201	4,6940	4,6220	4,7176

* Примечание: серым фоном отмечены ячейки, значения в которых находятся вне установленных метрологических ограничений $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$.

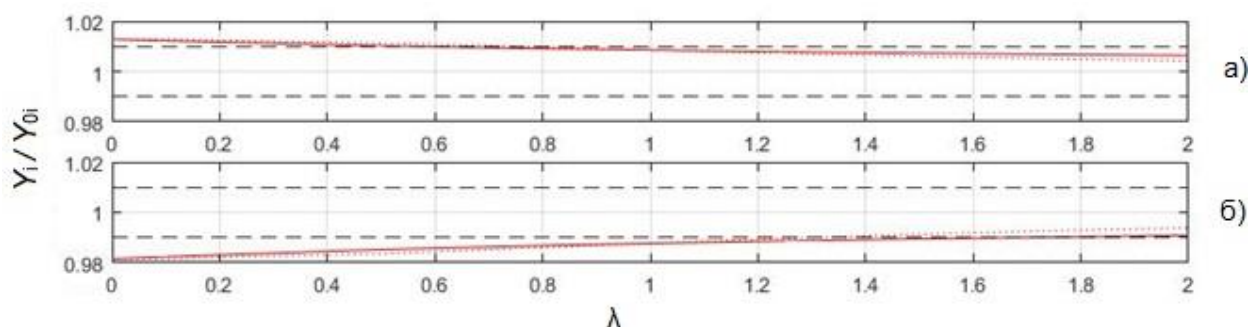


Рис. 1. Относительные изменения Y_i / Y_{0i} при изменении параметра регуляризации λ : а – по расходу топлива в камеру сгорания; б – по расходу воздуха на входе в компрессор; пунктирными линиями обозначены ограничения, соответствующие (11)

Для полученных таким образом индивидуальных значений параметра регуляризации λ_{ij} (где i – номер элемента, j – номер итерации) выполняется следующая итерация – расчет согласно (10). При этой и последующих итерациях $\lambda_{ij} = \lambda_{ij-1}\lambda$, где λ – одинаковый для всех элементов вектора Y скаляр, значение которого варьируется в заданных пределах. Расчеты повторяются таким образом до тех пор, пока изменение значения целевой функции (6) в двух последних итерациях не станет меньше заранее заданной величины.

На рис. 2 представлены результаты аналитического решения задачи при скалярной и векторной постановках (для вариантов С и В-1) в виде зависимости целевой функции оптимизации F (6) и ее слагаемых от параметра регуляризации λ .

Анализ полученных данных показывает, что оптимальное значение параметра регуляризации при векторной постановке незначи-

тельно сдвигается вправо по оси λ относительно результатов расчета для скалярной постановки задачи. При этом оба варианта позволяют определить минимум целевой функции, соответствующий решению задачи. Недостатком аналитического решения в обоих случаях является несоответствие полученных результатов метрологическим ограничениям (11) по одному или нескольким параметрам.

Этого недостатка лишены варианты решения задачи В-2 и В-3. При этом применение метода итераций аналитических решений требует исследования параметрической чувствительности решения на каждой итерации (см. рис. 1), но при этом меньшего количества итераций: из практики проведения расчетов – не более 15–20 итераций. Численное решение методом статистического программирования проще с точки зрения алгоритмизации и программной реализации, но требует большего количества итераций.

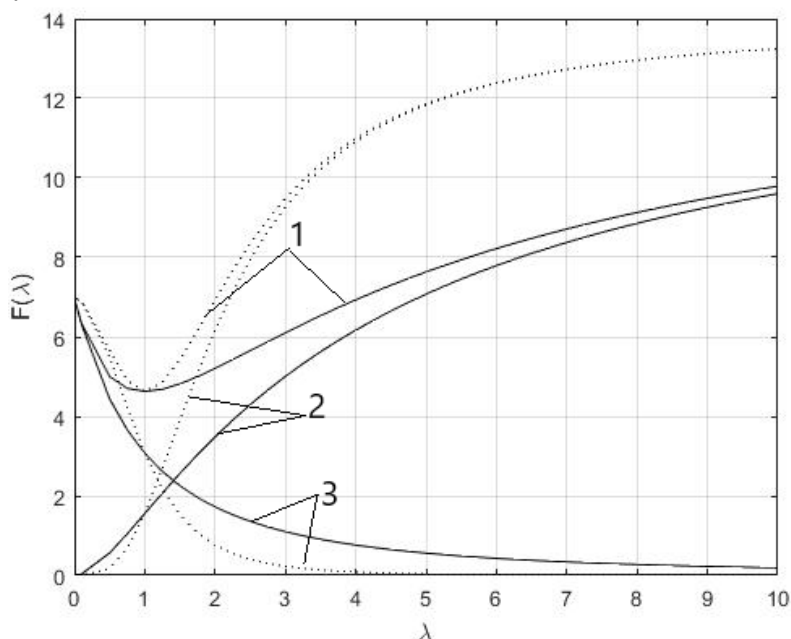


Рис. 2. Зависимость целевой функции оптимизации $F(\lambda)$ и ее слагаемых от параметра регуляризации λ : 1 – целевая функция оптимизации; 2 – первое слагаемое целевой функции оптимизации (сумма квадратов небалансов по массе и энергии); 3 – второе слагаемое целевой функции оптимизации (квадрат модуля вектора отклонений $\sum (Y - Y_0)^2$; пунктирные линии – скалярная постановка задачи (вариант С); сплошные линии – векторная постановка задачи (вариант В-1)

Для иллюстрации решения задачи численным методом на рис. 3 приведены значения целевой функции (6) по вариантам решения. На данном и аналогичных примерах выявлено, что для нахождения оптимального решения достаточно ограничиться числом сгенерированных вариантов вектора Y 10^4 – 10^5 .

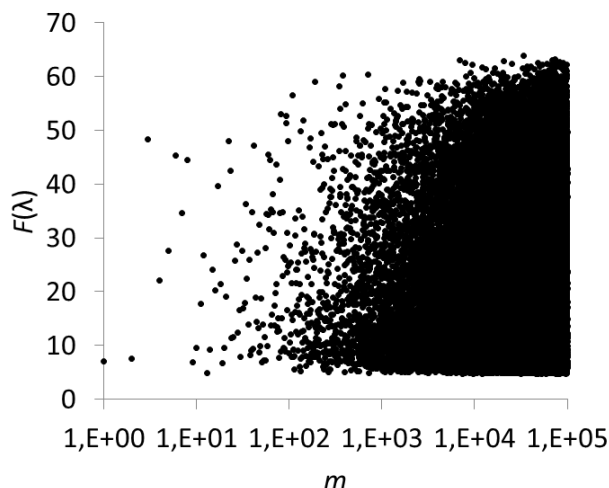


Рис. 3. Значения целевой функции оптимизации $F(\lambda)$ по вариантам решения m

Однако с приемлемой для практических случаев точностью решение может быть найдено уже при числе сгенерированных вариантов менее 10^3 . Это означает, что и численный метод решения задачи может быть использован в системах автоматизированного контроля показателей тепловой экономичности оборудования без существенной нагрузки на вычислительные ресурсы. В завершение рассмотрим влияние метода решения задачи сведения балансов на результаты расчета основного показателя тепловой экономичности ГТУ – КПД брутто (табл. 2). С учетом данных, представленных в табл. 1, а также прочих необходимых для расчета показателей [1] рассчитаны значения КПД брутто ГТУ [3, 4]:

– по прямому балансу

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(пр)}} = \frac{100 \cdot N_{\text{ГТУ}}}{Q_{\text{КС}}}; \quad (12)$$

– по обратному балансу

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(обр)}} = \frac{100 \cdot (Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}})}{Q_{\text{КС}}}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(пр)}}$ и $\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(обр)}}$ – КПД брутто ГТУ по прямому и обратному балансам соответственно, %.

Таблица 2. Результаты расчетов КПД брутто ГТУ для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения оптимизационной задачи

Показатель, единица измерения	Значения расчетов				
	без сведения балансов	по варианту С	по варианту В-1	по варианту В-2	по варианту В-3
$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(пр)}}, \%$	32,24	31,85	31,94	31,92	31,88
$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(обр)}}, \%$	32,15	32,08	31,93	31,87	31,89
Модуль отклонения, % (отн.)	0,27	0,72	0,05	0,15	0,03

Полученные данные позволяют заключить, что процедура сведения балансов оказывает существенное влияние на результаты расчета фактических значений показателей тепловой экономичности оборудования. Так, КПД брутто по прямому балансу в варианте В-3 отличается от значения, полученного без сведения балансов, на 1,1 относительных процента. При этом собственно резерв тепловой экономичности оборудования (экономия или перерасход топлива) обычно исчисляется десятками долями процента [3]. Кроме этого, можно видеть, что отклонения значений КПД брутто по прямому и обратному балансам в вариантах В-2 и В-3, удовлетворяющих метрологическим ограничениям (11), оказываются на порядок меньшими, чем в варианте без сведения балансов. Это дополнительно подтверждает обоснованность применения разработанной методики.

Выводы. Предложенный вариант векторной постановки задачи сведения балансов ГТУ и ее решение методом итераций аналитических решений либо численным методом ста-

тистического программирования позволяют учесть допустимые диапазоны изменения контролируемых параметров, обусловленные нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Указанные варианты постановки и решения задачи могут быть рекомендованы для практического применения в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности ГТУ как на этапе сведения балансов по измеренным значениям показателей, так и для текущего контроля корректности работы систем мониторинга по критерию баланса аддитивных характеристик.

Применение разработанной методики сведения балансов позволяет получить обоснованные значения показателей тепловой экономичности, что подтверждается совпадением в пределах допустимой погрешности значений КПД брутто ГТУ, рассчитываемых по прямому и обратному балансам.

Список литературы

1. **Методика** совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / А.С. Зиновьева, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 5–10.
2. **Программный** комплекс «ТЭС-Эксперт»: опыт оптимизации режимов работы оборудования ТЭЦ / Е.В. Барочкин, А.А. Поспелов, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 3–6.
3. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.
4. **Горшков А.С.** Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
5. **Arakelyan E.K., Minasyan S.A., Agababyan G.E.** Methodical principles of multicriterial optimization of daily operating conditions of power equipment at thermal power stations // *Thermal Engineering*. – 2006. – Vol. 53, No. 10. – С. 767–771.
6. **Optimal** generation and transmission of energy in heat and electric networks / V.P. Zhukov, E.V. Barochkin, D.A. Ulanov, et al. // *Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 58, No. 8. – С. 629–633.
7. **Урин В.Д., Кутлер П.П.** Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
8. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
9. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems / *Technometrics*. – 1970. – No. 12. – P. 55–67.
10. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications / *Amer. J. Math. Management Sci.* – 1981. – No. 1. – P. 5–83.
11. **Тверской Ю.С.** Методологические аспекты машинной аппроксимации частотных характеристик с оценкой меры адекватности моделей объектов управления // *Теплоэнергетика*. – 1990. – № 11. – С. 34–39.
12. **Тверской Ю.С.** Автоматизация пылеугольных котлов электростанций. – СПб.: Лань, 2018. – 472 с.
13. **Алгоритмы** сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 8. – С. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.
14. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

15. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

References

1. Zinov'eva, A.S., Gorshenin, S.D., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 5–10.
2. Barochkin, E.V., Pospelov, A.A., Zhukov, V.P., Andreev, A.A., Ledukhovskiy, G.V., Borisov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 4, pp. 3–6.
3. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.
4. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.
5. Arakelyan, E.K., Minasyan, S.A., Agababyan, G.E. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 10, pp. 767–771.
6. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Ulanov, D.A., Ledukhovskiy, G.V., Zubanov, A.A. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, no. 8, pp. 629–633.
7. Urin, V.D., Kutler, P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhimov elektrostantsiy i energosistem* [Energy characteristics for optimizing the regimes of power plants and power systems]. Moscow: Energiya, 1974. 136 p.
8. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979. 285 p.
9. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. *Technometrics*, 1970, no. 12, pp. 55–67.
10. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications. *Amer. J. Math. Management Sci.*, 1981, no. 1, pp. 5–83.
11. Tverskoy, Yu.S. *Teploenergetika*, 1990, no. 11, pp. 34–39.
12. Tverskoy, Yu.S. *Avtomatizatsiya pyleugol'nykh kotlov elektrostantsiy* [Automation of pulverized coal boilers of power plants]. Saint-Petersburg: Lan', 2018. 472 p.
13. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.
14. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: challenges, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.
15. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.