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

Сергей Дмитриевич Горшенин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.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

Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Сведение материального и энергетического балансов по данным, получаемым от систем технического и коммерческого учета, является обязательным этапом расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. При этом для газотурбинных установок методика сведения балансов нормативными документами не регламентирована, соответствующие подходы к решению рассматриваемой задачи не проработаны. Отсутствуют данные о влиянии процедуры сведения балансов на результаты расчета фактических значений КПД брутто газотурбинных установок. В связи с этим актуальным является разработка методики совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинных установок.
Материалы и методы. Задача совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки в скалярной постановке сформулирована в рамках концепции решения некорректных задач на основе регуляризации Тихонова, позволяющей получить аналитическое решение. При проведении практических расчетов использованы данные АСУ ТП эксплуатируемой газотурбинной установки GTX-100.
Результаты. Предложена методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок. Показано влияние процедуры сведения балансов на результаты расчета фактических значений показателей тепловой экономичности газотурбинной установки. На примере газотурбинной установки GTX-100 определены предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов.
Выводы. Разработанная методика позволяет учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений, обусловленное нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

© Зиновьева А.С., Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В., Жуков В.П., 2023
Вестник ИГЭУ, 2023, вып. 1, с. 5–10.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, метод регуляризации

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

Sergei Dmitrievich Gorshenin
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

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

Method of simultaneous equations of material and energy balances when calculating actual data of thermal efficiency of gas turbine plants

Abstract

Background. Reconciliation of material and energy balances according to data received from systems of technical and commercial record keeping is a mandatory step to calculate thermal efficiency indicators of thermal power plant (TPP) equipment. At the same time, the methodology to draw the balance is not regulated by regulatory documents for gas turbine plants. Appropriate approaches to solve the issue under consideration have not been worked out. There is no data on the impact of the balancing on the results of calculating the actual values of the gross efficiency of gas turbine plants. Thus, it is relevant to develop a methodology of simultaneous equations of the material and energy balances of gas turbine plants.
Materials and methods. The problem of simultaneous equations of the material and energy balances of a gas turbine plant in a scalar value is formulated within the framework of the concept of solving ill-posed problems based on Tikhonov's regularization. The concept allows one to obtain an analytical solution. When conducting calculations, data from the automated process control system of the operated GTX-100 gas turbine plant have been used.
Results. The method of simultaneous equations of the material and energy balances when calculating the actual indicators of the thermal efficiency of gas turbine plants is proposed. The influence of the balancing procedure on the results of calculating the actual values of the thermal efficiency indicators of a gas turbine plant is shown. The authors have determined the maximum deviations of the actual gross efficiency values when adjusting the results of measuring the controlled parameters using the example of GTX-100 gas turbine plant.
Conclusions. The developed technique makes it possible to consider the maximum allowable total discrepancy between mass and energy balances, as well as the maximum deviation of the parameter values adjusted according to the balancing results, due to the standardized metrological characteristics of measuring instruments.

Key words: thermal power plant, gas turbine plant, thermal efficiency of equipment, material balance, energy balance, ill-posed problem, regularization method

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010

Введение. Этап сведения материальных и энергетических балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и технического учета показателей работы оборудования, является обязательным в соответствии с требованиями нормативных документов[1] и предшествует собственно расчету фактических (а затем и номинальных) значений показателей тепловой экономичности агрегатов и установок ТЭС. При этом в нормативных документах отсутствуют требования к сведению балансов по газотурбинным установкам (ГТУ), имеющим очевидные технологические отличия от традиционных паросиловых установок. Так, в уравнениях материального и энергетического балансов ГТУ, в отличие от паросиловых установок, фигурируют показатели не одного (воды в жидком и газообразном агрегатных состояниях), а трех теплоносителей: воздуха, топлива (природного газа) и продуктов его сгорания:

$$B_{\text{КС}} + G_{1\text{к}} - G_{2\text{т}} = 0; \quad (1)$$

$$Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}} - N_{\text{ГТУ}} = 0, \quad (2)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{к}}$ и $G_{2\text{т}}$ – расходы топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и про-

[1] РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»; СО 153-34.09.110. Руководящие указания по сведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разраб. ОРГРЭС.

дуктов сгорания на выходе из турбины соответственно, кг/с; $Q_{КС}$ – тепловая мощность, подведенная к камере сгорания, МВт; $Q_{1к}$ – тепловая мощность, подведенная с потоком воздуха к компрессору ГТУ, МВт; $Q_{2т}$ – тепловая мощность потока продуктов сгорания на выходе из ГТУ, МВт; Q_5 – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ, МВт; $Q_{эм}$ – мощность электромеханических потерь ГТУ, МВт; $N_{ГТУ}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт.

При сведении балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и технического учета, балансы (1) и (2) в общем случае не сводятся ввиду метрологического несовершенства приборов учета или их неисправности:

$$B^{и}_{КС} + G^{и}_{1к} - G^{и}_{2т} = \Delta G; \quad (3)$$

$$Q^{и}_{КС} + Q^{и}_{1к} - Q^{и}_{2т} - Q_5 - Q_{эм} - N^{и}_{ГТУ} = \Delta E, \quad (4)$$

где индекс «и» указывает на измеренное значение показателя, получаемое от систем учета как результат прямого или косвенного измерения; ΔG – невязка материального баланса, кг/с; ΔE – невязка энергетического баланса, МВт.

Составляющая Q_5 определяется по результатам экспертной оценки в ходе поверочного теплового расчета либо по показателям работы системы вентиляции укрытия ГТУ. Составляющая $Q_{эм}$ рассчитывается на основании функциональной зависимости электромеханического КПД ГТУ от ее электрической мощности, которая входит в состав комплекта энергетических характеристик ГТУ [1].

Прочие составляющие Q_i уравнения (4) связаны со слагаемыми уравнения (3) через соответствующие термодинамические функции состояния и удельные тепловые характеристики теплоносителей:

$$Q^{и}_{КС} = B^{и}_{КС}\left(h^{и}_{топл} + Q^{р}_{н}\right); \quad (5)$$

$$Q^{и}_{1к} = G^{и}_{1к}\, h^{и}_{1к}; \quad (6)$$

$$Q^{и}_{2т} = G^{и}_{2т}\, h^{и}_{2т}, \quad (7)$$

где $h^{и}_{топл}$, $h^{и}_{1к}$, $h^{и}_{2т}$ – энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной соответственно, определяемые по измеренным значениям параметров теплоносителей, МДж/кг; $Q^{р}_{н}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, принимаемая по данным коммерческого учета, МДж/кг.

Указанные энтальпии теплоносителей зависят от состава теплоносителей (смеси газов) и их параметров.

При сведении балансов (3) и (4) измеренные значения показателей должны быть скорректированы таким образом, чтобы невязки балансов ΔG, ΔE были равны нулю.

Методы исследования. Ранее нами было предложено решение задачи совместного сведения материальных и энергетических балансов применительно к оборудованию паросилового цикла [2]. В данном случае апробированный подход распространяется на другой объект – ГТУ, имеющий существенные технологические особенности. Предлагается проведение процедуры сведения балансов на основе концепции регуляризации Тихонова [3–7], которая позволяет исходную некорректную задачу (1)–(2) свести к виду

$$\mathbf{AY} + \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{B}, \quad (8)$$

а затем при скалярной постановке [3] – к задаче минимизации следующей функции:

$$F(\mathbf{Y},\lambda) = \left|\mathbf{AY} - \mathbf{B}\right|^2 + \lambda\left|\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0\right|^2 \Rightarrow \min, \quad (9)$$

где $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Y}_0$ – искомое регуляризированное решение и его априорная оценка; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ – известные операторы модели системы; $\boldsymbol{\sigma}$ – числовой параметр, характеризующий погрешность правой части уравнения; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом.

При минимизации функции $F(\mathbf{Y})$ получается регуляризированное решение $\mathbf{Y}(\lambda)$, зависящее от параметра λ. Первое слагаемое в целевой функции (9) показывает суммарную невязку балансов $\Delta = \left|\mathbf{AY}\right|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора: $\Delta\mathbf{Y} = \left|\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0\right|$.

Матричный оператор $\mathbf{A}$ и искомое регуляризированное решение $\mathbf{Y}$ с учетом (3)–(7) можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h^{и}_{топл} + Q^{р}_{н} & h^{и}_{1к} & -h^{и}_{2т} & -\dfrac{1}{\eta_{5т}} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{Y} = \left(B_{КС} \quad G_{1к} \quad G_{2т} \quad N_{ГТУ}\right)^{\mathrm{T}}, \quad (11)$$

где $\eta_{5т}$ характеризует тепловые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ и определяется из (4) согласно равенству

$$Q_5 + Q_{эм} + N_{ГТУ} = \frac{N_{ГТУ}}{\eta_{5т}};$$

индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы.

Аналитическое решение задачи (9) может быть получено при ее скалярной постановке (решение известно [3]) (при $\mathbf{B} = 0$):

$$\mathbf{Y} = \left(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A} + \lambda\mathbf{E}\right)^{-1}\lambda\mathbf{Y}_0. \quad (12)$$

Результаты исследования. В качестве исходных данных для расчета по разработанной методике использовались значения показателей работы ГТУ типа GTX-100, принятые по данным АСУ ТП ТЭС для одного из режимов (назовем его контрольным режимом), как результаты прямых или косвенных измерений (табл. 1).

Таблица 1. **Исходные данные для расчета контрольного режима**

Наименование параметра, обозначение, единица измерения	Значение
Расход топлива в камеру сгорания $B^{и}_{КС}$, кг/с	1,79
Расход воздуха на входе в компрессор $G^{и}_{1к}$, кг/с	101,46
Расход продуктов сгорания на выходе из турбины $G^{и}_{2т}$, кг/с	99,54
Электрическая мощность ГТУ $N^{и}_{ГТУ}$, МВт	29,23
Энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ $h^{и}_{топл}$, МДж/кг	0,11509
Низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива $Q^{р}_{н}$, МДж/кг	50,535
Энтальпия воздуха на входе в компрессор $h^{и}_{1к}$, МДж/кг	0,002692
Энтальпия продуктов сгорания за турбиной $h^{и}_{2т}$, МДж/кг	0,60243
Коэффициент потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь $\eta_{5т}$, ед.	0,9414

Результаты расчетов для контрольного режима представлены на рис. 1–3.

Зависимости целевой функции оптимизации (9) и ее слагаемых от параметра регуляризации λ представлены на рис. 1. Зависимость целевой функции от параметра регуляризации $F(\lambda)$ имеет четко выраженный минимум при значении параметра регуляризации $\lambda^* = 0{,}95$.

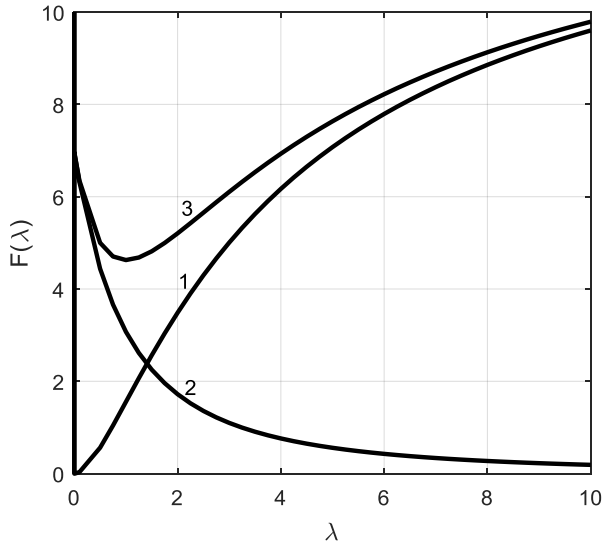

Рис. 1. Зависимость целевой функции оптимизации $F(\lambda)$ и ее слагаемых от параметра регуляризации λ: 1 – первое слагаемое целевой функции оптимизации (сумма квадратов небалансов по массе и энергии); 2 – второе слагаемое целевой функции оптимизации (квадрат модуля вектора отклонений $\sum(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)^2$; 3 – целевая функция оптимизации

Представленные на рис. 2 зависимости отношения регуляризированных и исходных значений расходов теплоносителей и электрической мощности ГТУ от параметра регуляризации λ дают возможность провести количественную оценку параметрической чувствительности модели. Здесь допустимые максимальные отклонения значений параметров регуляризации, оцененные в ±1 %, приняты на основании анализа метрологических характеристик исправных поверенных средств измерения, показания которых использованы в качестве исходных данных для расчета контрольного режима.

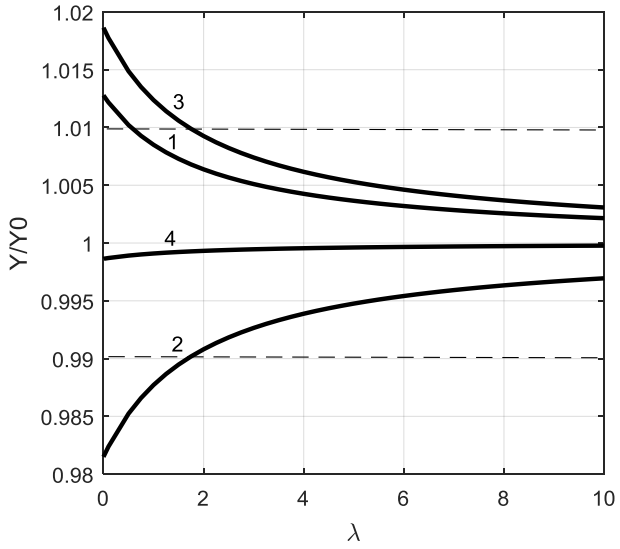

Рис. 2. Зависимости отношения регуляризированных Y и исходных Y_0 значений расходов теплоносителей и электрической мощности ГТУ от параметра регуляризации λ: 1 – по расходу топлива в камеру сгорания $B_{КС}$; 2 – по расходу воздуха на входе в компрессор $G_{1к}$; 3 – по расходу продуктов сгорания на выходе из турбины $G_{2т}$; 4 – по электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$; штриховые линии – допустимые максимальные отклонения значений параметров при регуляризации

Более детально результаты расчетов по регуляризации параметров для контрольного режима представлены в табл. 2, где приведены исходные априорные значения параметров и их значения после регуляризации при разных значениях параметра регуляризации λ.

Таблица 2. **Результаты расчета для контрольного режима**

Обозначение, единица измерения	Априорные значения $\mathbf{Y}_0$	Регуляризированные значения **Y**				
		$\lambda = 0{,}0001$	$\lambda = 0{,}1$	$\lambda^* = 0{,}95$	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$
$B_{КС}$, кг/с	1,79	1,81	1,81	1,81	1,81	1,80
$G_{1к}$, кг/с	101,46	99,58	99,67	100,19	100,21	100,53
$G_{2т}$, кг/с	99,54	101,40	101,31	100,79	100,77	100,46
$N_{ГТУ}$, МВт	29,23	29,19	29,19	29,20	29,20	29,21
ΔG, кг/с	3,7100	0,0002	0,1787	1,2047	1,2468	1,8664
ΔE, МВт	–0,0786	–0,0000	–0,0036	–0,0241	0,0249	–0,0373
$F(\lambda)$	13,7703	6,9689	6,3462	4,6201	4,6275	5,2059

На рис. 3 приведены зависимости относительных небалансов массы и энергии от параметра регуляризации λ. Здесь допустимые максимальные отклонения ±0,5 % приняты по аналогии с требованиями нормативных документов, предъявляемыми к максимально допустимому рассогласованию КПД брутто по прямому и обратному балансам для паровых котлов (поскольку аналогичные требования применительно к газотурбинным установкам нормативными документами не зафиксированы).

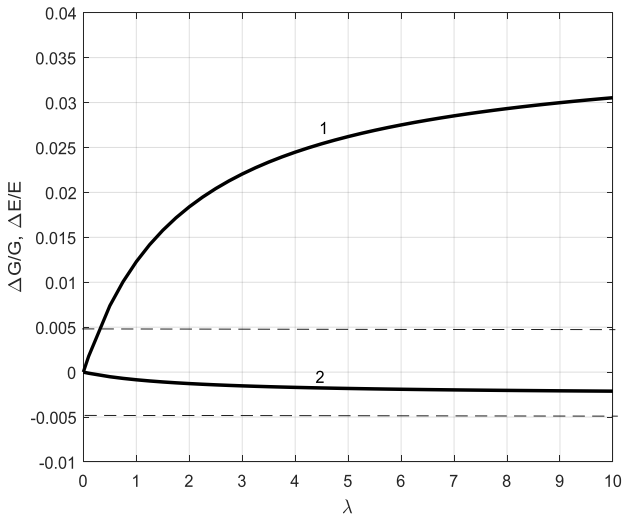

Рис. 3. Зависимости относительного небаланса массы (1) и энергии (2) от параметра регуляризации λ: штриховые линии – допустимые максимальные отклонения при сведении балансов

На примере рассматриваемой газотурбинной установки GTX-100 определены также предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов. При этом в качестве исходных данных принята выборка результатов измерения контролируемых по установке параметров за фактически отработанный месяц, а также результаты тепловых испытаний данной установки. Для каждого режима КПД брутто [1, 8] вычислялся дважды: непосредственно по результатам измерения без сведения балансов и с использованием значений параметров, скорректированных в ходе сведения балансов по разработанной методике. На рис. 4 результаты исследования представлены в виде абсолютных отклонений КПД брутто, вычисленных указанными способами.

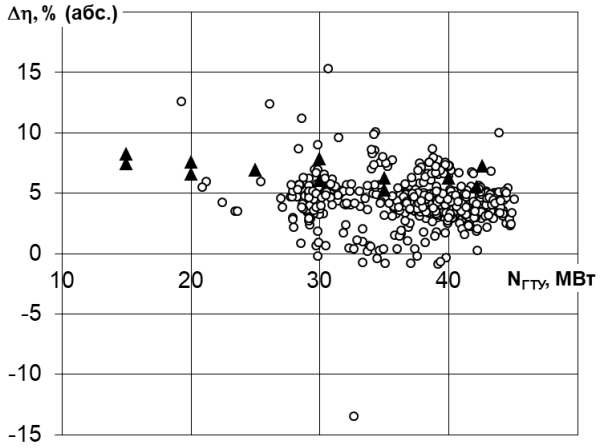

Рис. 4. Результаты расчетов КПД брутто газотурбинной установки GTX-100: $\Delta\eta$, % (абс.) – отклонение значений КПД брутто, рассчитанных двумя способами; ▲ – скорректированные результаты по данным тепловых испытаний; ○ – по данным АСУ ТП ТЭС

Выводы. Разработанная методика совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинных установок позволяет учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений, обусловленное нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Полученные результаты (рис. 2, 3) могут быть использованы также при решении задач мониторинга и диагностики технического состояния (предиктивной аналитики) оборудования. Невозможность выбора параметра регуляризации λ для одновременного выполнения ограничений по используемым при сведении балансов показателям (рис. 2, 3) свидетельствует либо о

неисправности средств измерения, либо о ненормируемых утечках энергии или массы в системе.

Полученные на примере газотурбинной установки GTX-100 предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов выявили, что ошибка значения КПД брутто, получаемая при отсутствии сведения балансов, составляет в среднем 4,8 % с отклонениями до 15 % в отдельных режимах. Такие результаты подтверждают, что для газотурбинных установок разработка обоснованных методик сведения материальных и энергетических балансов при обработке результатов измерения контролируемых параметров является актуальной. Для решения большинства задач при эксплуатации ТЭС (оптимизация режимов работы, мониторинг показателей тепловой экономичности, диагностика технического состояния оборудования и др.) требуется точность расчета, на порядок меньшая полученных значений ошибки [9–12].

В дальнейшем для более детального и точного анализа возможен выбор различных параметров регуляризации λ для разных технологических параметров с учетом реальных метрологических характеристик системы мониторинга.

Список литературы

1. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.

2. **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.

3. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

4. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems // Technometrics. – 1970. – No. 12. – P. 55–67.

5. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications // Amer. J. Math. Management Sci. – 1981. – No. 1. – P. 5–83.

6. **Тверской Ю.С.** Методологические аспекты машинной аппроксимации частотных характеристик с оценкой меры адекватности моделей объектов управления // Теплоэнергетика. – 1990. – № 11. – С. 34–39.

7. **Тверской Ю.С.** Автоматизация пылеугольных котлов электростанций. – СПб.: Лань, 2018. – 472 с.

8. **Горшков А.С.** Технико-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

9. **Урин В.Д., Кутлер П.П.** Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.

10. **Борисов А.А.** Программный комплекс для оптимального ведения режима работы теплоэлектроцентрали // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 24–27.

11. **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. – P. 767–771.

12. **Учет** эффективности отсеков проточной части турбоустановок при расчетном анализе их энергетических характеристик / К.Н. Бубнов, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 3. – С. 62–68.

References

1. 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.

2. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80.

3. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka, 1979. 285 p.

4. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. Technometrics, 1970, no. 12, pp. 55–67.

5. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications. Amer. J. Math. Management Sci., 1981, no. 1, pp. 5–83.

6. Tverskoy, Yu.S. *Teploenergetika*, 1990, no. 11, pp. 34–39.

7. Tverskoy, Yu.S. *Avtomatizatsiya pyleugol'nykh kotlov elektrostantsiy* [Automation of pulverized coal boilers of power plants: monograph]. Saint-Petersburg: Lan', 2018. 472 p.

8. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.

9. 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.

10. Borisov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 4, pp. 24–27.

11. Arakelyan, E.K., Minasyan, S.A., Agababyan, G.E. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 10, pp. 767–771.

12. Bubnov, K.N., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 62–68.