

УДК 621.311.22

Векторная регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры

Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, А.П. Зимин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известно аналитическое решение задачи регуляризации материальных балансов при некорректном задании априорной информации, но в этом решении не учитывается различная степень достоверности определения каждого отдельного параметра, а также требующие учета при проведении практических расчетов метрологические и технологические ограничения. В связи с этим задача учета достоверности значения каждого параметра исходной информации при корректировке материальных балансов является актуальной.

Методы и материалы: При формулировке и решении задачи корректировки априорной информации используются матричные методы составления материальных балансов и теория графов. Решение сформулированных оптимизационных задач выполнено методами статистического программирования.

Результаты: На основе матричной модели потоков в энергетических системах сложной структуры сформулирована задача векторной регуляризации материальных потоков с учетом балансовых ограничений по всем или выбранным подсистемам, в рамках которой параметр регуляризации выбирается для каждого параметра априорной информации с учетом метрологических характеристик элементов системы мониторинга, а совокупность этих параметров представлена диагональной матрицей параметров регуляризации. Получено аналитическое решение задачи без учета ограничений на допустимые значения параметров априорной информации и численное решение задачи методом статистического программирования, позволяющим учитывать отдельные ограничения или их совокупность.

Выводы: Предложенный обобщенный метод векторной регуляризации материальных потоков в энергетических системах сложной структуры учитывает различную степень достоверности определения априорных данных, технологические и метрологические ограничения и может применяться при обработке результатов испытаний энергетического оборудования и при подготовительных расчетах фактических технико-экономических показателей работы оборудования.

Ключевые слова: материальный баланс, некорректная задача, метод регуляризации, векторная регуляризация, матричная формализация, графы, матрица инцидентности, статистическое программирование.

Vector Regularization of Material Flows in Complex Power Systems

G.V. Leduhovsky, V.P. Zhukov, E.V. Barochkin, A.P. Zimin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: There is an analytic solution to the problem of material balances regularization if the definition of a priori information is incorrect, but this solution does not take into account different degrees of determination accuracy of every parameter, and metrological and technological limitations that should be known in practical calculations. Therefore, it is urgent to identify the accuracy of every parameter of the a priori information when correcting material balances.

Materials and methods: To formulate and solve the problems of correcting the a priori information the authors suggest using matrix methods of making up material balances and graph theory. The formulated optimization problems are solved by statistical programming methods.

Results: Based on the matrix model of flows in complex power systems the authors have formulated the task of vector regularization of material flows taking into account the balance limitations for all or selected sub-systems, in which the regularization parameter is chosen for each parameter of the a priori information with the metrological characteristics of the elements of the monitoring system taken into consideration; the combination of these parameters is presented as a diagonal matrix of regularization parameters. The authors obtained an analytic solution without limitations on the allowed values of a priori information, and a numerical solution using the method of statistical programming that allows taking into account specific limitations or their combination.

Conclusions: The authors suggested a generalized method of regulating material flows in complex power systems which takes into consideration various degrees of determination accuracy of a priori information, technological and metrological limitations and can be applied to processing of test results of power equipment and preliminary calculations of actual technical and economic performance of the equipment.

Key words: material balance, incorrect definition, ridge regression, method of regularization, vector regularization, matrix formalization, graphs, incidence matrix, statistical programming.

Известная постановка задачи [1] сведения материальных балансов при некорректном задании априорной информации, построенная на концепции регуляризации Тихонова (ridge regression) [2], и полученное ее аналитическое решение не позволяют учитывать различную степень достоверности определения отдельных параметров при задании априорной информации, а также существующие метрологические и технологические ограничения. Степень достоверности определения отдельных параметров может существенно отличаться в силу различий в метрологических характеристиках применяемых средств измерения или их исправности.

Эти ограничения не позволяют использовать указанное аналитическое решение в практически значимых случаях. Между тем при решении ряда прецизионных задач учет характеристик погрешности каждого отдельного средства измерения, работающего в составе некоторой системы мониторинга, оказывается необходимым: в противном случае не удастся получить решение с требуемой точностью. К таким задачам, например, относится проверка соответствия данных системы мониторинга, используемых для расчета фактических технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования ТЭС, комплексу номинальных метрологических характеристик средств измерения.

В частности, руководящими документами энергетической отрасли¹ закреплена необходимость ежесуточного контроля достоверности данных, получаемых от систем технического учета электростанции. При этом решается следующая задача: имеется совокупность результатов измерений, в частности расходов теплоносителей по тепловой схеме, а также комплекс очевидных балансовых соотношений, которым должна удовлетворять эта априорная информация. Требуется ответить на вопрос, обусловлены ли расчетные невязки балансов по контролируемым узлам тепловой схемы номинальными характеристиками погрешности системы мониторинга либо увеличенные невязки по всем или некоторым узлам являются следствием неисправности приборов или выхода их за границы номинальных метрологических характеристик. В последнем случае важно быстро локализовать источник ошибки, что является весьма сложной задачей, поскольку при выполнении подобных расчетов по среднестатистической ТЭС приходится оперировать результатами измерения расхода среды, полученными несколькими десятками или даже сотнями средств измерения.

В настоящее время рассматриваемая задача решается следующим образом: задается

некоторая максимальная величина небаланса (конечно, с определенным запасом), обычно по какому-либо одному наиболее технологически значимому узлу или контуру, и все проверки выполняются только для этого узла (контура). Между тем ясно, что такая заранее назначенная для системы мониторинга условно допустимая потеря точности негативно сказывается на достоверности последующего расчета ТЭП работы оборудования. Например, для Омской ТЭЦ-4 увеличение невязки материального баланса котлов на 1 % приводит в зимнем режиме к ошибке в определении фактического удельного расхода тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии группой турбоагрегатов на 55 кДж/(кВт·ч), что эквивалентно ошибке в определении перерасхода топлива в условном исчислении около 500 тонн за месяц (или приблизительно 1 млн рублей в месяц). При существующем подходе к оценке достоверности данных системы мониторинга показатели работы оборудования эти дополнительные затраты списываются на недостатки эксплуатации либо плохое техническое состояние оборудования.

Для решения рассматриваемой практической задачи необходима разработка расчетного инструмента, обеспечивающего возможность учета различной степени достоверности определения параметров априорной информации, а также метрологических и технологических ограничений по всем или некоторым выбранным узлам. Нами предложен метод векторной регуляризации, при котором число параметров регуляризации совпадает с числом параметров априорно заданной информации, при этом каждому априорному параметру соответствует свой параметр регуляризации, значение которого определяется с учетом индивидуальных метрологических характеристик средств измерения.

Цель данных исследований состоит в разработке метода сведения материальных балансов при некорректно заданной исходной информации с учетом достоверности априорной информации отдельно по каждому параметру и с учетом нормативных технологических ограничений на точность сведения материальных балансов по отдельным узлам или некоторой их совокупности. Для достижения цели последовательно решаются следующие задачи:

- формулировка задачи регуляризации массовых потоков, формирование структуры целевой функции регуляризации, позволяющей учитывать степень достоверности каждого параметра априорной информации, а также метрологические и технологические ограничения;
- разработка методов и алгоритмов решения задачи регуляризации и исследование параметрической чувствительности решения.

В целях обеспечения возможности сравнения результатов решения задачи при различных вариантах задания параметров регуляризации

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», утв. Министерством топлива и энергетики РФ 24.11.95, введ. в действие с 01.02.96, с изм. № 1 от 15.05.98 г.

будем рассматривать пример, анализируемый на предыдущем этапе исследования [1].

Напомним содержание задачи. Имеется энергетическая система, представляющая собой участок тепловой схемы паротурбинной ТЭС, а также результаты измерения расходов теплоносителей (пара и воды) в некоторых ее точках. Для моделирования материальных потоков в схеме произвольной структуры предложено использовать матричную математическую модель исследуемого объекта, основанную на подходах и методах теории графов [3]. Для описания структуры системы использован направленный граф $G = (X, V)$, в котором в качестве узлов (x_i) рассматриваются узлы смешения и распределения потоков, а в качестве ветвей (v_j) – трубопроводы между узлами. Для обеспечения возможности проверки и сведения баланса для всей системы внешние потоки схемы были условно заведены в первый узел.

Методика построения по технологической схеме соответствующего этой схеме графа подробно рассмотрена ранее [1]. Итоговая структура графа $G = (X, V)$ для рассматриваемой технологической схемы с указанием номеров узлов и ветвей представлена на рис. 1.

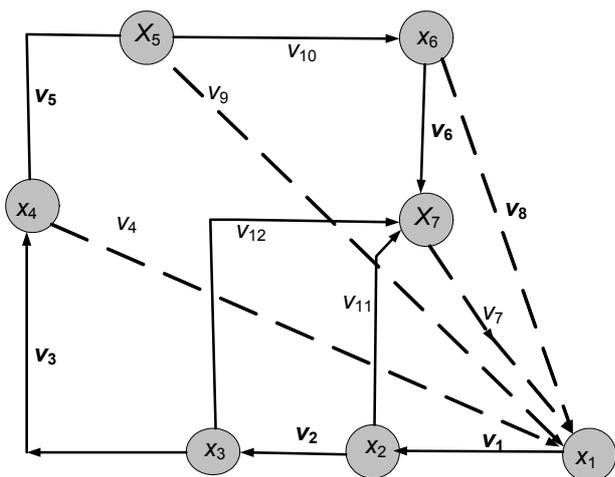


Рис. 1. Структура графа $G = (X, V)$ для рассматриваемой технологической схемы

Для модельного описания структуры системы составлена матрица инцидентности графа A размера $n \times m$ ($n = 7$ – число строк или узлов графа; $m = 12$ – число столбцов или ветвей графа):

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

Каждая строка матрицы 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 ($a_{ij} = -1$).

Произведение матрицы инцидентности A на вектор расходов по ветвям графа V дает в каждом элементе матрицы $\Delta G = AV$ небаланс массы в соответствующем узле.

Концепция регуляризации [2] позволяет исходную некорректную задачу

$$AV + \sigma = 0 \tag{1}$$

свести к задаче минимизации функции [1]:

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + \lambda |V - V_0|^2 \Rightarrow \min, \tag{2}$$

где V, V_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; σ – числовой параметр, характеризующий погрешность правой части уравнения; λ – подбираемый определенным способом параметр регуляризации.

Решение задачи (2) позволяет определить значение одного параметра регуляризации λ для оценки всей совокупности априорной информации. Аналитическое и численное решения такой задачи рассмотрены нами ранее [1].

Для решения задачи, поставленной на данном этапе исследования, то есть для обеспечения возможности учета разной степени достоверности определения каждого параметра априорной информации в отдельности, предлагается вместо скаляра λ использовать диагональную матрицу параметров регуляризации λ .

Как указано выше, исходные данные обычно определяются с некоторой погрешностью, за пределы которой результаты измерения исправным прибором выходить не могут (с некоторой доверительной вероятностью), а руководящие документы регламентируют предельно допустимую погрешность сведения балансов по отдельным узлам или подсистемам. Сделанные замечания позволяют при постановке обобщенной оптимизационной задачи (2) ввести дополнительные ограничения в следующем виде:

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + |\lambda(V - V_0)|^2 \Rightarrow \min, \tag{3}$$

$$v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}], \tag{4}$$

$$\Delta G_i \in [0; \Delta G_i^{\max}],$$

где λ – диагональная матрица малых положительных параметров регуляризации; v_i^{\min} и v_i^{\max} – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью 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.

Следует отметить, что первое слагаемое в целевой функции (3) показывает суммарную невязку балансов по всем узлам $\Delta = |AV|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного векто-

ра $\Delta V = |V - V_0|$. При скалярной регуляризации и минимизации функции $F_c(V)$ получается регуляризованное решение $V(\lambda)$, зависящее от параметра λ . При векторной регуляризации вместо скалярного параметра λ используем вектор (или диагональную матрицу) параметров регуляризации λ , число элементов которого совпадает с числом элементов в искомом векторе потоков V . Для линейной постановки задачи регуляризации известно ее аналитическое решение [1]. Для векторной регуляризации без учета ограничений (4) путем дифференцирования уравнений (3) по искомым параметрам и приравнивания производной к нулю получено аналитическое решение задачи в виде

$$V = (A^T A + \lambda^2 E)^{-1} \lambda^2 V_0, \quad (5)$$

где E – единичная матрица; верхние индексы «Т» и «-1» показывают транспонирование и обращение матрицы соответственно.

Для подтверждения правильности полученного решения (5) проведены специальные расчетные исследования, результаты которых представлены на рис. 2. Решение, полученное согласно (5), показано на рис. 2 сплошной линией. Для проверки полученного аналитического решения в регуляризованные значения элементов вектора V_i вносились случайным образом возмущения, после чего отслеживались значения целевой функции для возмущенных регуляризованных решений. Все возмущенные регуляризованные решения приводили к увеличению значения целевой функции, что свидетельствует об обоснованности и достоверности оптимального решения (5).

Аналитическое решение (5) не учитывает метрологических и технологических ограничений (4). Для решения задачи (3) с учетом ограничений (4) рассматриваются два подхода: метод итераций аналитических решений и численный метод статистического программирования.

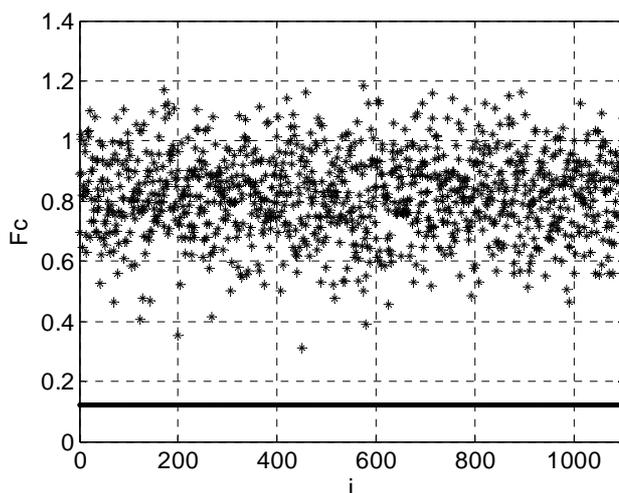


Рис. 2. Результаты численной проверки аналитического решения задачи векторной регуляризации: сплошная линия – регуляризованное значение целевой функции, полученное аналитическим методом (5); точки – результаты проверки путем внесения малых возмущений в аналитическое решение (F_c – значение целевой функции; i – номер возмущения)

Рассмотрим особенности использования этих методов на рассматриваемом нами примере (рис. 1). Исходные данные в виде исходного вектора значений расходов по ветвям графа V_0 приведены в таблице. Для обеспечения возможности выполнения последующего анализа в таблице указаны и результаты предыдущего этапа работы – аналитическое (без учета ограничений на допустимые значения параметров) и численное (с учетом этих ограничений) решения при скалярной регуляризации [1].

При использовании предлагаемого метода итераций аналитических решений за основу принимается аналитическое решение (5), получаемое первоначально при одинаковых значениях параметров регуляризации для всех параметров априорной информации.

Исходная для расчета (априорная) информация и результаты решения задачи регуляризации в скалярной и векторной ее постановке

Номер ветви графа i	Исходное значение параметра $V_{0i}, 10^{-6}, \text{ т/мес}^*$	Погрешность определения исходных значений, %	Аналитическое решение при скалярной постановке задачи $V_i, 10^{-6}, \text{ т/мес}$	Численное решение при скалярной постановке задачи $V_i, 10^{-6}, \text{ т/мес}$	Решение методом итераций аналитических решений (5) при векторной постановке задачи		Численное решение при векторной постановке задачи $V_i, 10^{-6}, \text{ т/мес}$
					$V_i, 10^{-6}, \text{ т/мес}$	$\lambda_i, \text{ ед.}$	
1	1,0157*	2,3	1,0240	1,0443	1,0221	8,62	1,0267
2	1,0596*	1,1	1,0560	1,0440	1,0559	8,62	1,0544
3	1,0571*	0,9	1,0542	1,0438	1,0562	8,62	1,0534
4	0,0127	5,2	0,0110	0,0189	0,0127	237,05	0,0127
5	1,0394*	1,2	1,0381	1,0249	1,0385	8,62	1,0338
6	0,0294*	1,8	0,0296	0,0296	0,0295	82,15	0,0296
7	0,0357*	2,2	0,0335	0,0301	0,0356	312,04	0,0359
8	0,9938*	1,1	0,9917	0,9946	0,9918	8,62	0,9900
9	0,0022	8,5	0,0017	0,0007	0,0019	32,76	0,0023
10	1,0232	2,1	1,0248	1,0242	1,0243	8,62	1,0235
11	0,0015	1,2	- 0,0046	0,0003	0,0015	1724,00	0,0015
12	0,0025	1,5	0,0114	0,0002	0,0025	43,10	0,0025

Примечание: знаком «*» отмечены измеряемые параметры

Затем для каждого значения элементов вектора \mathbf{V} находится свое минимальное значение параметра регуляризации, которое удовлетворяет метрологическим ограничениям (4) ($v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]$) по данному расходу (рис. 3). Для полученных таким образом индивидуальных значений параметра регуляризации $\lambda_{i,j}$ (где i – номер элемента; j – номер итерации, равный 1 для рассматриваемой первой итерации) проводится дополнительный расчет согласно (5) – следующая итерация. При этой и последующих итерациях параметр регуляризации для каждого значения элементов вектора \mathbf{V} находится как $\lambda_{i,j} = \lambda_{i,j-1} \lambda$, где λ – одинаковый для всех элементов вектора \mathbf{V} скаляр, значение которого изменяется в заданных пределах. Скорректированные в ходе таких итераций значения параметров v_i проверяются по условию выполнения метрологических (рис. 4) и технологических (рис. 5) ограничений. При наличии совокупности точек на графиках, удовлетворяющих всем заданным ограничениям (4) – метрологическим и технологическим, выбираются минимальные значения параметров регуляризации и соответствующее им регуляризованное решение \mathbf{V} . Оптимальные значения параметров регуляризации и расходов по ветвям технологической схемы приведены в таблице. В данном случае в качестве технологического ограничения задан допустимый небаланс массы в первом узле – не более 2 % от небаланса, рассчитанного по исходным параметрам априорной информации.

Очевидно, что если не удалось найти решение, удовлетворяющее метрологическим и технологическим ограничениям (4), 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.

Обратимся теперь к численному решению задачи в векторной постановке. Численное решение многомерной оптимизационной задачи (3) с ограничениями (4) выполняется методом статистического программирования [4, 5], который позволяет достаточно просто учесть сложный характер ограничений.

Алгоритм численного решения определяется многократной генерацией случайным образом вектора расходов \mathbf{V} вокруг априорных значений его элементов в заданном метрологическими ограничениями ($v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]$) диапазоне. Такая генерация решений автоматически приводит к выполнению метрологических ограничений. Затем сгенерированное решение проверяется на выполнение технологических ограничений ($\Delta G_i \in [0; \Delta G_i^{\max}]$) 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 (3).

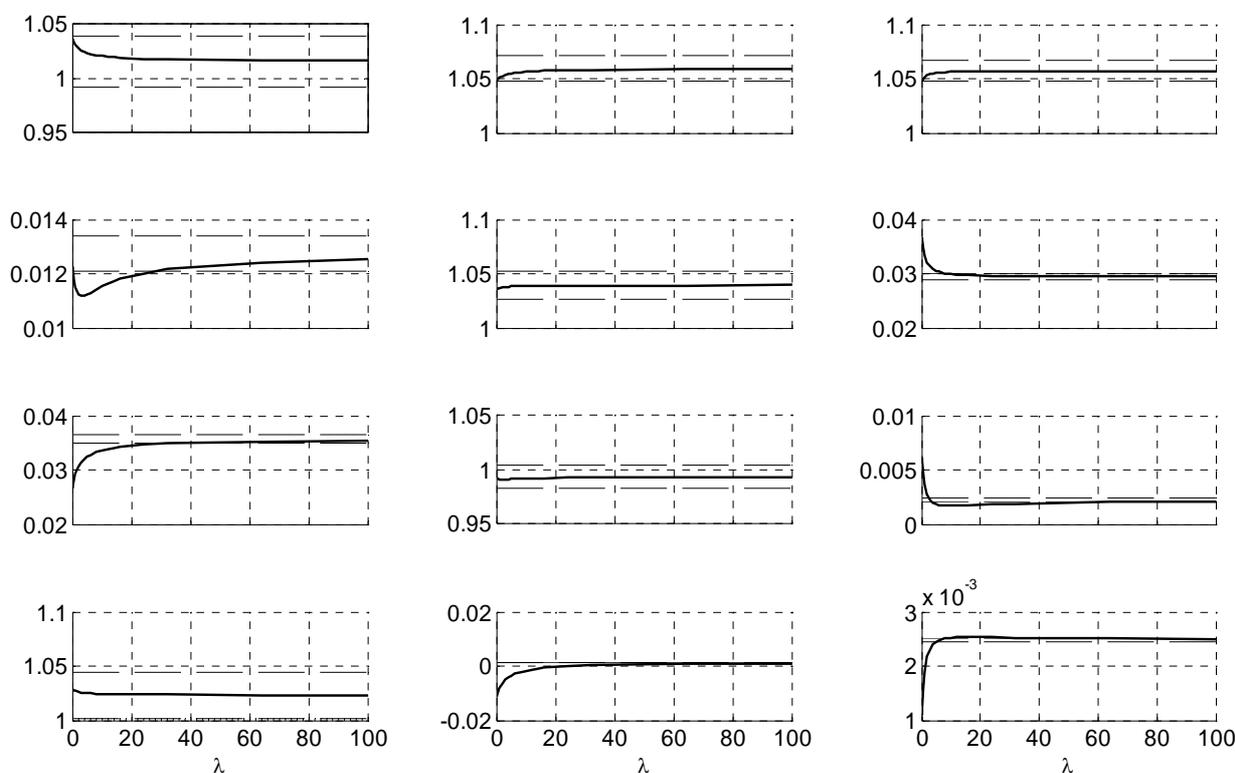


Рис. 3. Зависимости значений расходов ($V_i \cdot 10^{-6}$, т/мес.) для потоков по ветвям графа от параметра регуляризации λ (первая итерация, полученная в ходе решения задачи методом итераций аналитических решений): сплошные линии – результаты расчета; пунктирные линии – границы доверительных интервалов погрешности измерения параметров априорной информации

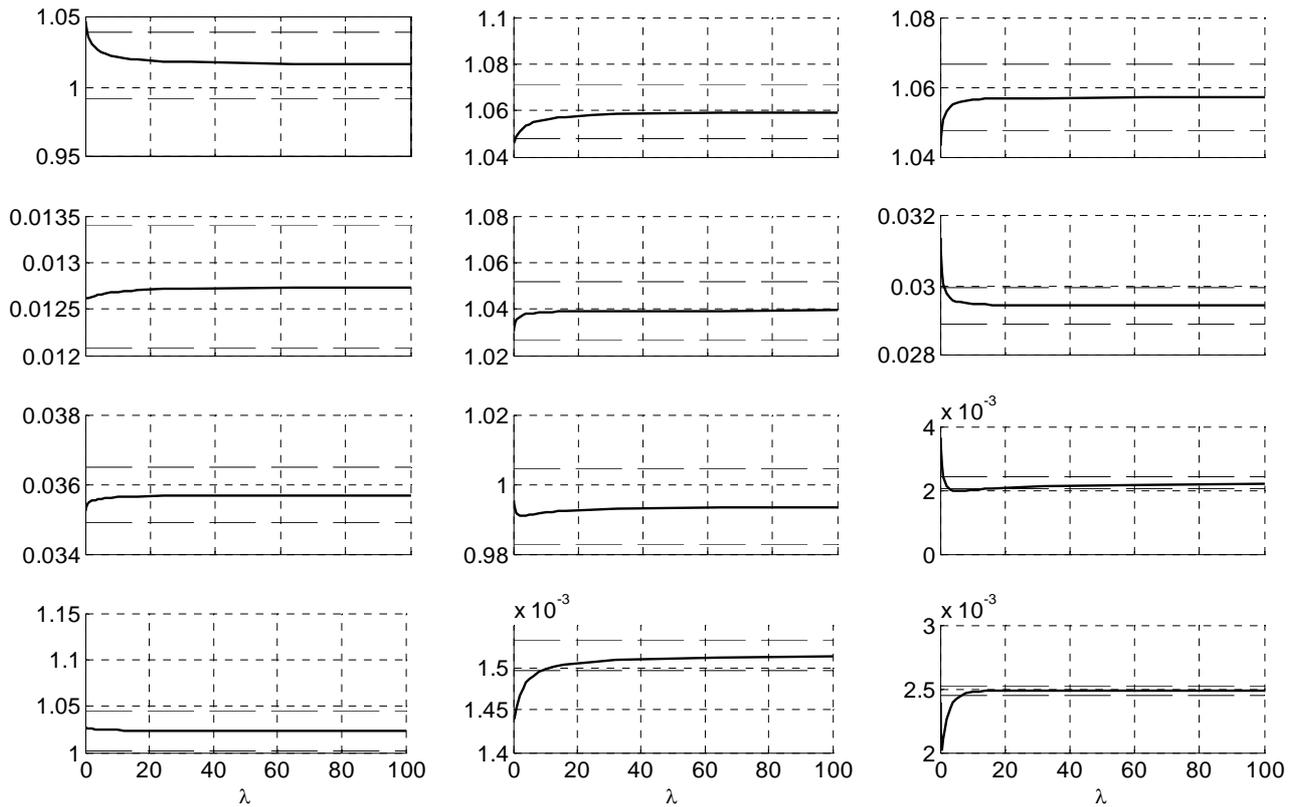


Рис. 4. Зависимость значений расходов ($V, 10^{-6}$, т/мес.) для потоков по ветвям графа от параметра регуляризации λ (заключительная итерация, полученная в ходе решения задачи методом итераций аналитических решений): обозначения см. на рис. 3

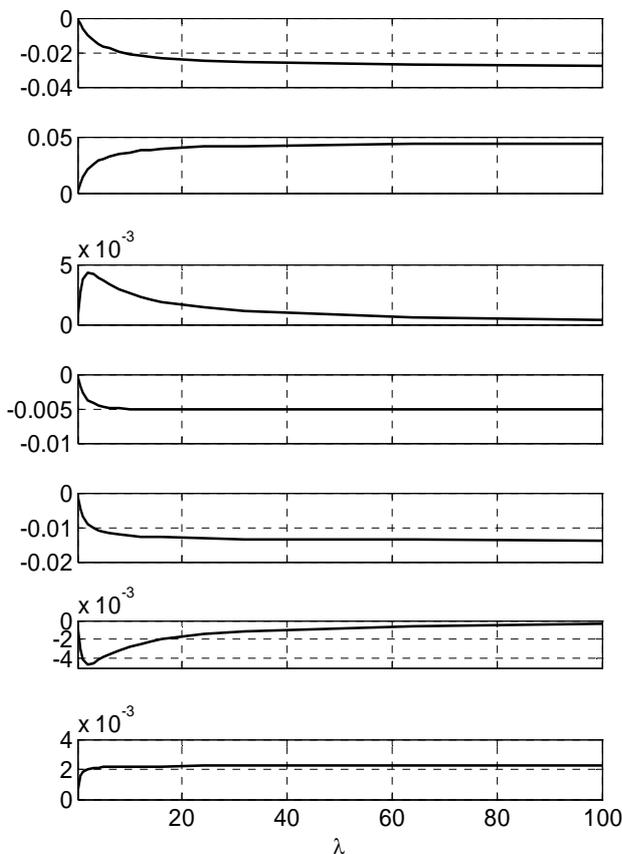


Рис. 5. Зависимость небалансов AV (10^{-6} , т/мес.) по семи узлам после векторной регуляризации от параметра регуляризации: номер графика по порядку, начиная с верхнего, соответствует номеру узла графа на рис. 1

На рис. 6 показаны результаты решения оптимизационной задачи согласно рассмотренному алгоритму. Точками показаны значения целевой функции для сгенерированных вариантов решения, удовлетворяющих заданным ограничениям. Ордината линии соответствует значению целевой функции для решения методом итераций аналитических решений. Результаты численного решения задачи регуляризации в векторной постановке приведены в таблице.

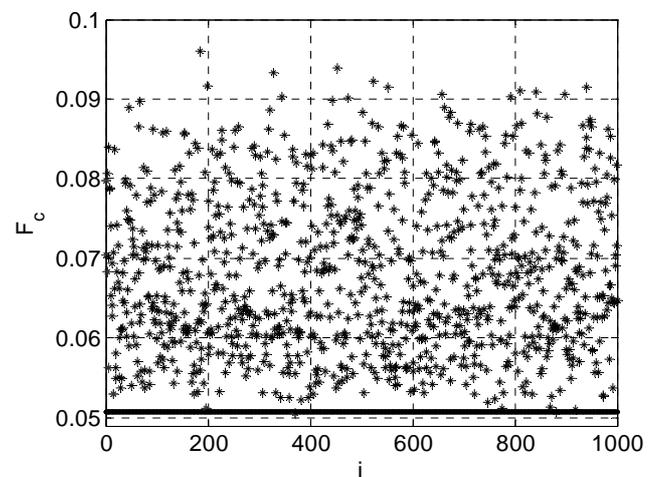


Рис. 6. Сопоставление значений целевой функции, полученных методом итераций аналитических решений (линия) и численным методом (точки) в зависимости от номера сгенерированного варианта

Заключение

Проведенный анализ различных вариантов постановки и решения задачи регуляризации материальных потоков в энергетических системах сложной структуры применительно к актуальной практической задаче анализа достоверности данных, получаемых от системы мониторинга показателей работы оборудования ТЭС, показал следующие преимущества и недостатки этих вариантов:

1. *Задача в скалярной постановке, аналитическое решение* [1]. Позволяет найти регуляризованный вектор значений расходов по моделируемой схеме, но не учитывает ограничений на допустимые значения параметров, а также ограничений по допустимым невязкам балансов массы в узлах.

2. *Задача в скалярной постановке, численное решение методом статистического программирования* [1]. Позволяет учесть при регуляризации ограничения на допустимые значения параметров и допустимые невязки балансов массы в узлах, но не учитывает различную степень достоверности определения исходных значений параметров априорной информации, т. е. различия в метрологических характеристиках работающих в составе системы мониторинга средств измерения.

3. *Задача в векторной постановке, решение методом итераций аналитических решений либо численное решение методом статистического программирования*. Позволяет получить решение задачи регуляризации с учетом как метрологических ограничений (различий в значе-

ниях номинальной погрешности средств измерения), так и технологических ограничений (предельных невязок балансов массы по всем или выбранным узлам).

Список литературы

1. **Решение** задачи регуляризации материальных потоков в сложных энергетических системах / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 5–9.
2. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
3. **Алексеев В.В.** Элементы теории множеств и теории графов. – Саров: СарФТИ, 2001. – 30 с.
4. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.
5. **Таха Х.** Введение в исследование операций – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

References

1. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P. Resheniye zadachi regulyatsii material'nykh potokov v slozhnykh energeticheskikh sistemakh [Solving Problems Of Material Flow Regularization In Complex Power Systems]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 5–9.
2. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of solving incorrect problems]. Moscow, Nauka, 1979. 285 p.
3. Alekseev, V.V. *Elementy teorii mnozhestv i teorii grafov* [Elements of set theory and graph theory]. Sarov, SarFTI, 2001. 30 p.
4. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsiipy, metodologiya* [Operations research: challenges, principles, methodology]. Moscow, Drofa, 2004. 207 p.
5. Takha Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow, Vil'yams, 2005. 901 p.

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Зимин Артём Павлович
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31