

УДК 621.311.22

Задача многокритериальной регуляризации потоков энергии и теплоносителя 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: lgv83@yandex.ru, zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известно решение задачи регуляризации материальных потоков при некорректном задании априорной информации, полученное с учетом различной степени достоверности определения каждого материального потока и технологических ограничений. Однако в этом решении не учитываются ограничения, накладываемые балансами потоков энергии в системе, что приводит к неточности последующего расчета технико-экономических показателей работы оборудования. В связи с этим актуальной является задача повышения достоверности последующего расчета фактических технико-экономических показателей работы оборудования путем совместного учета балансовых ограничений по массе и энергии.

Методы и материалы: В рамках концепции регуляризации потоков энергии и теплоносителя формулируется задача многокритериальной многопараметрической оптимизации. Для ее численного решения методом статистического программирования используются мультипликативный и аддитивный критерии оптимизации, а также метод множества Парето.

Результаты: На основе матричной модели материальных и энергетических потоков в энергетических системах сложной структуры сформулирована и решена задача многокритериальной регуляризации этих потоков с учетом ограничений по степени достоверности определения каждого параметра априорной информации и балансовых ограничений по всем или выбранным подсистемам.

Выводы: Предложенное обобщение задачи регуляризации материальных и энергетических потоков в энергетических системах сложной структуры позволяет учитывать различную степень достоверности определения априорных данных, технологические и метрологические ограничения применительно к обработке результатов испытаний энергетического оборудования и подготовительным расчетам при определении фактических технико-экономических показателей работы оборудования.

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

Multicriteria regularization of energy flows and heat carrier 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: lgv83@yandex.ru, zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: The problem of regularizing material flows with incorrect assignment of a priori information is normally solved by taking into account different degrees of reliability of determining material flows and technological restrictions. However, this solution ignores the restrictions imposed by balances of energy flows in the system, which leads to inaccuracy of the subsequent calculations of technical and economic parameters of the equipment.

Materials and methods: The authors formulate the problem of multi-criteria multi-parameter optimization within the concept of energy flows and heat carrier regularization. The problem numerical solution by the method of statistical programming is implemented by applying the multiplicative and additive optimization criteria and the Pareto set method.

Results: Based on the matrix model of material and energy flows in complex power systems, the authors have formulated and solved the problem of multi-criteria regularization of these flows with the reliability restrictions of defining each parameter of a priori information and balance restrictions on all or selected subsystems taken into consideration.

Conclusions: The proposed generalization of regularizing material and energy flows in the complex energy systems allows us to take into account different reliability degrees of determining a priori data, technological and metrological restrictions in processing power equipment test results and preparatory calculations when determining the actual technical and economic parameters of the equipment.

Key words: material balance, power balance, incorrect setting, method of regularization, vector regularization, matrix formulization, graphs, incidence matrix, multi-criteria optimization, Pareto set, statistical programming.

Рассматривается задача проверки соответствия данных системы мониторинга, используемых для расчета фактических технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования.

дования тепловых электрических станций (ТЭС), комплексу номинальных метрологических характеристик средств измерения. Такая задача, согласно требованиям нормативных документов, должна решаться, например, на предварительном этапе анализа показателей тепловой экономичности¹ или обработки результатов функциональных испытаний энергоустановок². По результатам решения задачи требуется ответить на вопрос, чем обусловлены расчетные невязки балансов по контролируемым узлам тепловой схемы – номинальными характеристиками погрешности средств измерения параметров, составляющих систему мониторинга, либо неисправностью приборов, выходом их показаний за границы номинальных метрологических характеристик.

На предшествующем этапе исследований [1, 2] сформулирована задача регуляризации материальных потоков в энергетической системе сложной структуры при некорректном задании априорной информации, построенная на концепции регуляризации Тихонова (ridge regression) [3], и получены ее аналитическое и численное решения, позволяющие учитывать различную степень достоверности определения отдельных параметров при задании априорной информации, а также метрологические и технологические ограничения.

Полученные результаты обеспечивают решение поставленной задачи проверки соответствия данных системы мониторинга расходов теплоносителя номинальным метрологическим характеристикам используемых средств измерения, что удовлетворяет требованиям указанных нормативных документов. Однако рассматриваемая постановка задачи – контроль только материальных балансов – не дает возможности судить о качестве измерения прочих параметров системы: давления и температуры потоков теплоносителя. Зависящая от этих параметров энтальпия теплоносителей в совокупности с соответствующими их расходами определяет потоки энергии в системе, которые так же, как материальные потоки, должны удовлетворять определенным балансовым соотношениям.

В указанных выше и других³ нормативных документах не содержится требований по контролю сходимости энергетических балансов в системе на рассматриваемом предварительном этапе практических расчетов – при оценке

достоверности данных системы мониторинга. 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 сходимость энергетических балансов обеспечивается корректировкой собственно значений энергетической мощности потоков теплоносителя. При таком подходе тепловые (энергетические) нагрузки оборудования оказываются неувязанными с расходами теплоносителя и их теплофизическими характеристиками.

Для повышения достоверности определения фактических ТЭП и составляющих резерва тепловой экономичности оборудования к алгоритмам первичной обработки данных целесообразно предъявлять требования по обеспечению контроля сходимости не только материальных, но и энергетических балансов в системе.

Целью настоящего этапа исследований является разработка метода сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах сложной структуры при некорректно заданной априорной информации с учетом степени достоверности определения каждого отдельного параметра и с учетом нормативных технологических ограничений на точность сведения материальных и энергетических балансов по отдельным узлам или некоторой их совокупности.

При построении энергетических балансов выделяются два вида потоков энергии: внутренний и внешний. Потоки, связанные с потоками вещества (теплоносителя) внутри системы, считаются внутренними. Потоки энергии, передаваемые теплоносителям в систему извне, считаются для нее внешними. Для сохранения методологии предложенного ранее подхода [1, 2] при совместном сведении материальных и энергетических балансов внешние потоки энергии учитываются в уравнении соответствующими значениями в правых частях. С учетом этого в рамках концепции регуляризации [3] исходная некорректная задача формулируется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{AV} + \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{AH} + \boldsymbol{\sigma}_1 &= \mathbf{B}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{V} – вектор материальных потоков через выделенные элементы системы; $\mathbf{H} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{h}$ – вектор потоков энергии; \mathbf{h} – вектор энтальпий (точка перед знаком умножения показывает почленное умножение соответствующих элементов двух векторов); $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\sigma}_1$ – числовые параметры, характеризующие погрешность правых частей уравнений; \mathbf{B} – матрица-столбец, учитывающая внешние для системы потоки энергии.

Задача регуляризации отдельно для потоков массы рассматривалась нами ранее и своди-

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»; утв. Министерством топлива и энергетики.

² МУ 34-70-093-84 (СО 34.30.740). Методические указания по тепловым испытаниям паровых турбин: разработ. ПО «Союзтехэнерго»; утв. ПО «Союзтехэнерго» 21.12.84; введ. в действие с 01.01.85 г.

³ СО 153-34.09.110. Руководящие указания по сведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разработ. ОРГРЭС; утв. «Союзглавэнерго»; введ. в действие с 01.01.62 г.

лась к решению оптимизационной задачи минимизации функции [1]:

$$F_c(\mathbf{V}, \lambda) = |\mathbf{AV}|^2 + \lambda |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|^2 \Rightarrow \min,$$

где \mathbf{A} – матрица, определяющая структуру моделируемой системы; \mathbf{V} , \mathbf{V}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка по массопотокам; λ – подбираемый определенным способом параметр регуляризации.

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 типа

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

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

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

При решении многокритериальных оптимизационных задач необходимо определить вектор значений целевой функции, каждой проекцией которого является значение одного из критериев $\mathbf{F}_c(F_{c1}, F_{c2})$. Для решения многокритериальных задач известен ряд методов [4, 5], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

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:

$$F_c^a = a_1 F_{c1} + a_2 F_{c2} \Rightarrow \min, \quad (3)$$

$$F_c^m = F_{c1}^{m1} F_{c2}^{m2} \Rightarrow \min, \quad (4)$$

где верхний индекс « a » соответствует интегральному аддитивному критерию; индекс « m » – мультипликативному критерию; коэффициенты a_1 и a_2 , m_1 и m_2 учитывают вклад каждого из критериев в аддитивный и мультипликативный критерии.

Преимуществом интегральной замены множества критериев одним является относительная простота расчетов и возможность сведения многокритериальной оптимизационной задачи к однокритериальной, методы решения которой хорошо изучены [4, 5]. К недостаткам следует отнести возможность поглощения одним критерием другого, то есть получения таких решений, при которых при минимальной сумме или произведении этих критериев значения отдельных критериев будут компенсировать значения других показателей. Кроме этого, 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 [6, 7]. 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.

Продемонстрируем решение задачи многокритериальной регуляризации применительно к рассмотренному ранее примеру [1, 2]. При этом решение получим перечисленными методами и сравним полученные результаты.

Рассматривается участок тепловой схемы паротурбинной установки [1, 2]. Для описания системы используется направленный граф $G = (\mathbf{X}, \mathbf{V})$, в котором в качестве узлов (x_i) рассматриваются узлы смешения и распределения потоков, а в качестве ветвей (v_j) – трубопроводы между узлами [8].

Структура системы описывалась матрицей инцидентности графа \mathbf{A} размера $n \times m$ (n – число строк или узлов графа, m – число столбцов или ветвей графа). Каждая строка матрицы \mathbf{A} 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 \mathbf{A} и вектора расходов по ветвям графа \mathbf{V} определяет в каждом элементе матрицы $\mathbf{AG} = \mathbf{AV}$ небаланс массы в соответствующем узле.

Отметим, что матричный подход, который использован при моделировании массопотоков в системе, справедлив также для любых аддитивных параметров, которые можно складывать при смешении потоков. Следовательно, при решении задачи регуляризации потоков энергии матричная модель при определенной корректировке также может быть использована. Корректировка в данном случае заключается в учете внешних для системы потоков энергии, которые подводятся, например, в энергетическом котле при сжигании топлива или отводятся от рабочего тела, например, в турбине. При сведении баланса массовых потоков система являлась замкнутой по массе. Система для потоков энергии получается открытой.

Итоговая структура графа $G = (\mathbf{X}, \mathbf{V})$ для рассматриваемой в примере технологической схемы с указанием номеров узлов и ветвей представлена на рис. 1. 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 турбину.

Матрица инцидентности графа \mathbf{A} , составленная в соответствии с приведенными выше правилами, имеет для рассматриваемого случая следующий вид:

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

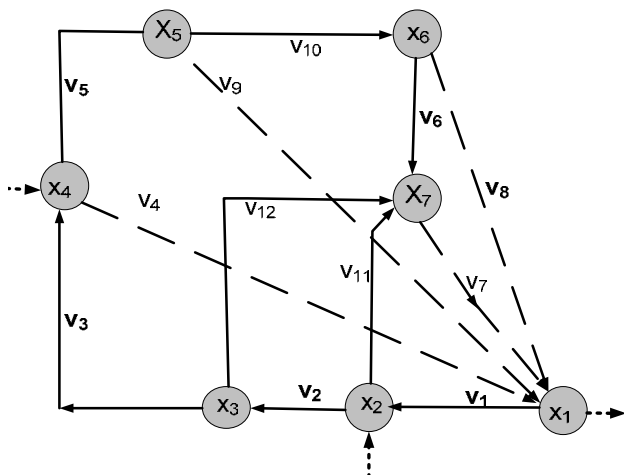


Рис. 1. Структура графа $G = (X, V)$ для рассматриваемой технологической схемы

При сведении энергетических балансов ранее рассмотренная задача дополнится следующим соотношением для энергии: $\Delta E = AN$. Выражения для критериев оптимизации по массе и энергии с учетом метрологических и технологических ограничений могут быть записаны в следующем виде:

$$F_{c1}(V, \lambda_1) = |AV|^2 + |\lambda_1(V - V_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (5)$$

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

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

$$F_{c2}(H, \lambda_2) = |AH|^2 + |\lambda_2(H - H_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (6)$$

$$h_i \in [h_i^{\min}, h_i^{\max}],$$

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

где λ_1 и λ_2 – диагональные матрицы малых положительных параметров регуляризации соответственно по массе и энергии; v_i^{\min} и v_i^{\max} , h_i^{\min} и h_i^{\max} – границы доверительных интервалов существования действительных значений параметров (расхода или энтальпии), обусловленные номинальными погрешностями средств измерения; ΔG_i^{\max} и ΔE_i^{\max} – предельно допустимые небалансы массы и 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., где указаны также номинальные значения пределов погрешности определения соответствующих параметров. Отметим, что погрешность определения энтальпии вычисляется по значениям метрологических характеристик средств измерения давления и температуры среды.

Аддитивный критерий. При одинаковых коэффициентах ценности сведения балансов по энергии и массе, т.е. при $a_1 = 1, a_2 = 1$, аддитивный критерий регуляризации (3) записывается в виде

$$F_c^a = F_{c1} + F_{c2} \Rightarrow \min. \quad (7)$$

Решение данной задачи с учетом метрологических и технологических ограничений, полученное методом статистического программирования [4, 5], приведено в таблице.

Мультипликативный критерий. При одинаковой ценности критериев по балансам массы и энергии, т.е. при $m_1 = 1, m_2 = 1$, выражение для интегрального мультипликативного критерия (4) записывается следующим образом:

$$F_c^m = F_{c1} * F_{c2} \Rightarrow \min. \quad (8)$$

Решение данной задачи также приведено в таблице.

Множество Парето. Для получения решения многокритериальной задачи с использованием множества Парето изобразим точками в системе координат (F_{c1}, F_{c2}) все альтернативы, которые удовлетворяют заданным метрологическим ограничениям.

Исходная (априорная) информация и результаты решения задачи многокритериальной регуляризации

Номер ветви графа i	Исходное значение расхода $V_{0i}, 10^{-6}, \text{т/мес}^*$	Погрешность определения исходных значений расхода, %	Энтальпия $h_i, \text{кДж/кг}$	Погрешность определения исходных значений энтальпии, %	Решение с использованием аддитивного критерия		Решение с использованием мультипликативного критерия	
					$V_i, 10^{-6}, \text{т/мес}$	$H^* 10^{-6}, \text{ГДж/мес}$	$V_i, 10^{-6}, \text{т/мес}$	$H^* 10^{-6}, \text{ГДж/мес}$
1	1,0157*	2,3	691,9*	1,76	1,0375	0,7074	1,0365	0,7251
2	1,0596*	1,1	954,5*	1,65	1,0514	1,0001	1,0558	1,0029
3	1,0571*	0,9	960,1*	1,76	1,0505	1,0026	1,0528	1,0055
4	0,0127	5,2	1594,9*	1,85	0,0133	0,0213	0,0129	0,0209
5	1,0394*	1,2	3488,2*	1,50	1,0282	3,5366	1,0271	3,6294
6	0,0294*	1,8	3487,5*	1,53	0,0293	0,1016	0,0291	0,1026
7	0,0357*	2,2	2991,2*	1,32	0,0351	0,1056	0,0356	0,1066
8	0,9938*	1,1	3478,4*	1,46	0,9871	3,4542	1,0026	3,5229
9	0,0022	8,5	3488,2*	1,50	0,0021	0,0072	0,0022	0,0077
10	1,0232	2,1	3488,2*	1,50	1,0225	3,5204	1,0354	3,6333
11	0,0015	1,2	691,9*	1,76	0,0015	0,0011	0,0015	0,0010
12	0,0025	1,5	954,5*	1,65	0,0025	0,0024	0,0024	0,0023

Примечание: * – измеряемые параметры

Задача решается путем многократной генерации случайным образом значений расходов V_i и энтальпий потоков h_i вокруг априорных значений в диапазоне, заданном метрологическими ограничениями $(v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]$ и $h_i \in [h_i^{\min}; h_i^{\max}])$.

Результаты расчетов показаны на рис. 2, где для сравнения отмечены также и результаты использования аддитивного и мультипликативного критериев. Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что использование аддитивного и мультипликативного критериев дает решения, входящие в множество Парето.

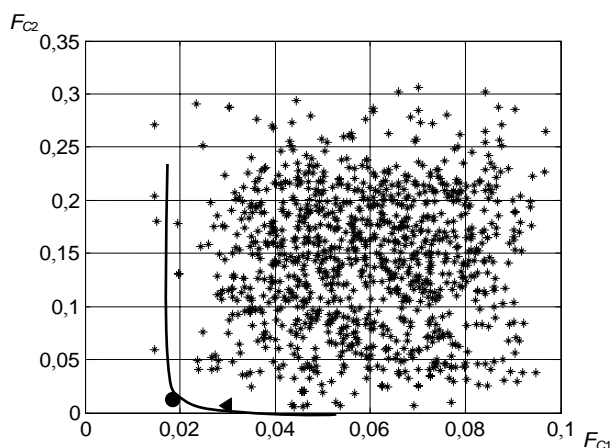


Рис. 2. Результаты численного решения задачи многокритериальной оптимизации: F_{C1} и F_{C2} – значения критериев оптимизации согласно (5), (6); * – множество анализируемых вариантов, полученных при определении множества Парето; линия – множество Парето; ● – решения, полученные с использованием аддитивного критерия; ◀ – решения, полученные с использованием мультипликативного критерия

Собственно решение поставленной практической задачи – нахождение ответа на вопрос, обусловлены ли наблюдаемые небалансы массы и энергии в системе номинальными метрологическими характеристиками средств измерения – выполняется путем наложения на полученное множество решений ограничений, соответствующих 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 поставленный вопрос следует ответить положительно; в противном случае задача регуляризации решения не имеет. Необходимая в этом случае локализация источника ошибки выполняется путем выбора узла с наибольшим небалансом массы и/или энергии.

Закключение

Предложенное обобщение задачи регуляризации материальных и энергетических потоков

на этапе первичной обработки данных системы мониторинга технологических параметров обеспечивает повышение достоверности последующего расчета фактических ТЭП работы оборудования за счет совместного сведения материальных и энергетических балансов.

Численное решение сформулированной задачи многокритериальной многопараметрической оптимизации позволяет учитывать различную степень достоверности определения априорных данных, а также технологические и метрологические ограничения по отдельным узлам или некоторой их совокупности. Показаны следующие преимущества решения задачи с использованием множества Парето:

- исключается необходимость субъективного определения коэффициентов ценности критериев оптимизации по массе и энергии, необходимых для решения задачи с использованием интегральных аддитивного или мультипликативного критериев;

- множество Парето дает обобщенную совокупность решений. Частными случаями множества Парето являются решения с использованием интегральных аддитивного или мультипликативного критериев;

- собственно поиск ответа на вопрос о причине наблюдаемых в системе расчетных небалансов массы и энергии в узлах при использовании множества Парето достаточно просто формализуется, что позволяет использовать метод в системах автоматизированного учета показателей работы оборудования.

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. Векторная регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 5–11.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 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.
6. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
7. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 176 с.
8. Алексеев В.В. Элементы теории множеств и теории графов. – Саров: СарФТИ, 2001. – 30 с.

References

1. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 5–9.
2. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 4, pp. 5–11.
3. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of solving incorrect problems]. Moscow, Nauka, 1979. 285 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.

6. Podinovskiy, V.V., Nogin, V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions to multi-criteria problems]. Moscow, Nauka, 1982. 256 p.

7. Nogin, V.D. *Prinyatie resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod* [Decision-making in multi-criteria environment: a quantitative approach]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 176 p.

8. Alekseev, V.V. *Elementy teorii mnozhestv i teorii grafov* [Elements of set theory and graph theory]. Sarov, SarFTI, 2001. 30 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.