

## Оптимальное управление структурой и эксплуатационными режимами интегрированных энергетических систем<sup>1</sup>

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время в энергетике большое внимание уделяется, с одной стороны, решению задачи оптимального распределения нагрузки между агрегатами ТЭС, а с другой стороны, решению в рамках концепции «умные сети» задачи оптимального транспортирования энергии от поставщика к потребителю. При этом задачи оптимальной генерации и оптимального транспорта энергии рассматриваются отдельно, хотя процессы генерации и передачи энергии тесно связаны друг с другом. Совместный анализ генерации и транспорта позволит получить от оптимизации дополнительный эффект, который не может быть реализован при отдельном рассмотрении этих процессов. Таким образом, совместный анализ генерации и передачи энергии в целях минимизации суммарных затрат энергетических ресурсов при заданном энергетическом обеспечении потребителей является актуальной исследовательской задачей.

**Материалы и методы:** Построение моделей энергетического оборудования выполнено на основе энергетических характеристик. Формулировка и решение оптимизационной задачи базируются на подходах и методах математического программирования.

**Результаты:** Сформулирована задача оптимальной генерации и транспорта энергии в связанных тепловых и электрических сетях в целях обеспечения минимальных затрат энергетических ресурсов при заданном энергопотреблении. Приведено решение оптимизационной задачи, в ходе которого найдены оптимальные нагрузки генерирующих агрегатов и оптимальные транспортные потоки энергии в системе.

**Выводы:** Предложенный подход позволяет обеспечить заданное энергоснабжение потребителей при минимальных ресурсных затратах, что является предпосылкой для создания интеллектуальных энергосберегающих систем, позволяющих в оперативном режиме поддерживать заданное энергообеспечение потребителей при минимальных суммарных затратах энергетических ресурсов.

**Ключевые слова:** оптимизация, энергетические характеристики, энергосбережение, распределение нагрузки, транспортные потоки, статистическое программирование, «умные сети», оптимальная генерация, интегрированные энергетические системы.

## Optimal control of the structure and operating conditions of integrated power systems

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

### Abstract

**Background:** At present, a lot of attention is paid to the optimal load distribution between the thermal power plant units, on the one hand, and, within the concept of «smart grids», to the optimal transportation of energy from the supplier to consumers, on the other hand. And the problems of optimal generation and optimal transport of energy are considered separately, although energy generation and transmission processes are closely related to each other. A joint analysis of the generation and transport will allow getting an additional effect from optimization that cannot be achieved by separate consideration of these processes. Thus, the joint analysis of the generation and transmission of energy in order to minimize the total costs of energy resources at a given energy supply of consumers is a current research priority.

**Materials and methods:** The power equipment models were constructed based on the energy characteristics of the units, while the formulation of and solution to the optimization problem is based on the approaches and mathematical programming techniques.

**Results:** The paper formulates a problem of optimal energy generation and transport in inter-related thermal and electric networks in order to obtain the minimum energy costs for the given power consumption. It also describes a solution to the optimization problem, in which the optimal load of generating units and optimal transport of energy flows in the system are found.

**Conclusions:** The proposed approach ensures energy supply to consumers at the minimum resource cost. This solution is a prerequisite for the creation of intelligent energy-saving systems, that allow online maintenance of the given energy supply with the minimum total cost of energy resources.

**Key words:** optimization, energy performance, energy saving, load balancing, traffic flows, statistical programming, smart grids, optimal generation, integrated power systems.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 15-08-01684).

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется вопросам оптимального распределения нагрузки между работающими агрегатами на ТЭЦ [1–4], которое позволяет при минимальных затратах энергетических ресурсов обеспечить заданную генерацию различных видов энергии у производителя (рис. 1,а). Другим важным аспектом в экономии энергетических ресурсов является технология, получившая в литературе название Smart Grid [5, 6]. В рамках этой технологии основное внимание уделяется оптимальному транспортированию энергии от поставщика к потребителю, при этом основной упор делается на минимизацию транспортных потерь энергии (рис. 1,б). Указанные задачи: оптимальная генерация энергии и оптимальная передача энергии, – рассматриваются, как правило, независимо друг от друга. Хотя очевидно, что процессы генерации и передачи энергии в энергетических системах тесно связаны друг с другом. Известно, что оптимальная генерация энергии на большом расстоянии от потребителя может свести на нет выгоду при ее передаче. Совместный анализ генерации и транспорта энергии позволит получить дополнительный эффект от оптимизации, который не может быть выявлен при раздельном анализе этих процессов. Эффект от оптимизации может быть увеличен при совместном анализе сразу двух видов энергии: тепловой и электрической, характерных для комбинированной выработки энергии на ТЭЦ.

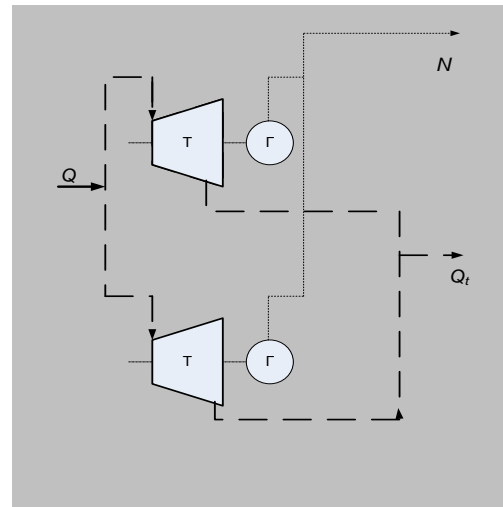
Целью исследования является минимизация затрат энергетических ресурсов за счет оптимальной генерации и передачи тепловой и электрической энергии в интегрированных энергетических системах при заданных параметрах энергообеспечения потребителей.

Объектом исследования, схематично представленным на рис. 1, является интегрированная энергетическая система, которая включает генерирующие и транспортирующие подсистемы для тепловой и электрической энергии. Для сопоставления расчетная схема к задаче оптимальной генерации тепловой и электрической энергии на ТЭЦ [3] приведена на рис. 1,а, расчетная схема к задаче оптимальной передачи тепловой и электрической энергии в интегрированной системе [6] показана на рис. 1,б.

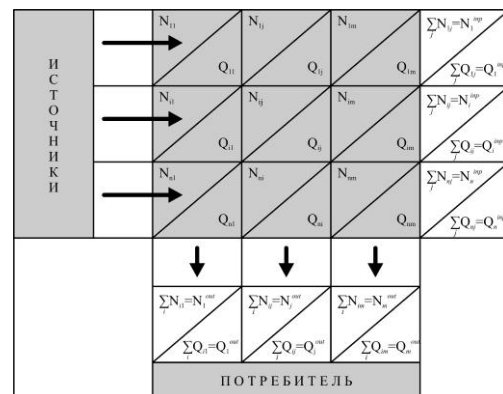
Предметом исследования является задача оптимальной генерации и транспорта тепловой и электрической энергии в интегрированной энергетической системе в целях минимизации суммарных затрат энергетических ресурсов.

Оптимизационная задача в нашем случае формулируется следующим образом. При заданных тепловой и электрической нагрузках конечных потребителей определить оптимальную генерацию каждого производителя и оптимальные транспортные потоки от каждого поставщика каждому потребителю, которые обеспечивают ми-

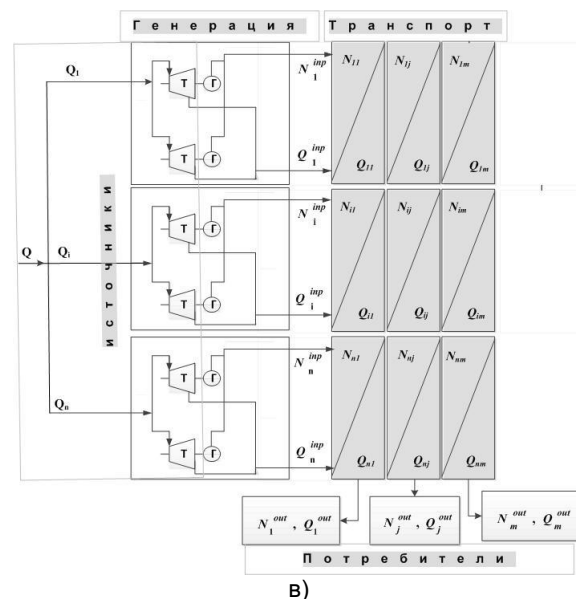
нимальные суммарные затраты энергетических ресурсов.



а)



б)



в)

Рис. 1. Расчетные схемы к задачам: а – оптимальной генерации тепловой и электрической энергии на ТЭЦ; б – оптимального транспорта тепловой и электрической энергии; в – оптимальной генерации и транспорта энергии

Для математической формализации постановки задачи введем ряд обозначений. Считаем, что тепловая и электрическая энергия вырабатывается  $n$  различными поставщиками, в качестве которых в нашем случае рассматриваются тепловые электрические станции или котельные. Сгенерированная энергия передается  $m$  потребителям, в качестве которых рассматриваются жилые дома, промышленные предприятия или некоторая их совокупность. Обеспечить тепловой и электрической энергией конечных потребителей ( $Q_j^{out}$ ,  $N_j^{out}$ ) необходимо с минимальным расходом первичных энергоресурсов, т. е. в качестве целевой функции оптимизации рассматривается минимальный расход энергоресурсов. В качестве параметров оптимизации выбираются потоки тепловой  $Q_{ij}$  и электрической  $N_{ij}$  энергии от  $i$ -го производителя  $j$ -му потребителю энергии.

Выражение для определения целевой функции оптимизации представляется через сумму входных энергетических потоков в каждый элемент системы согласно расчетной схеме рис. 1, в. Вычисление целевой функции производится с учетом ограничений на заданное обеспечение энергией всех потребителей:

$$F_c = Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \Rightarrow \min_{Q_{ij}, N_{ij}} \quad (1)$$

$$\sum_i N_{ij} = N_j^{out}, \quad \sum_i Q_{ij} = Q_j^{out}, \quad (2)$$

где  $F_c$ ,  $Q$  – целевая функция оптимизации и суммарный поток энергетических ресурсов в систему;  $Q_i$  – поток энергетических ресурсов в  $i$ -й элемент системы,  $i = 1, \dots, n$ .

Для получения решения оптимизационной задачи (1) целевая функция выражается через параметры оптимизации. Для этого расчетное выражение для потока энергетических ресурсов для каждого производителя записывается через его энергетические характеристики<sup>2</sup> [7] с учетом расчетной схемы рис. 1, в в следующем виде:

$$Q_i = N_i^{inp} \cdot q_{ti}(Q_i^{inp}, N_i^{inp}) + Q_i^{inp}, \quad (3)$$

где  $q_{ti}$  – удельный расход тепловой энергии brutto на выработку электроэнергии, который определяется по энергетическим характеристикам агрегата [5, 6] или некоторой их совокупности [3].

Следует отметить, что до потребителя доходит не вся энергия, которая генерируется у производителя: часть энергии теряется в виде потерь при транспортировке. Для учета потерь энергии при ее передаче вводится матрица транспортных потерь тепловой и электрической энергии:

$$\Delta^q = \alpha^q \begin{pmatrix} \delta_{11}^q & \delta_{1j}^q & \delta_{1m}^q \\ \delta_{i1}^q & \delta_{ij}^q & \delta_{im}^q \\ \delta_{m1}^q & \delta_{nj}^q & \delta_{nm}^q \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\Delta^N = \alpha^N \begin{pmatrix} \delta_{11}^N & \delta_{1j}^N & \delta_{1m}^N \\ \delta_{i1}^N & \delta_{ij}^N & \delta_{im}^N \\ \delta_{m1}^N & \delta_{nj}^N & \delta_{nm}^N \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\delta_{ij}^q$ ,  $\delta_{ij}^N$  – доля тепловой и электрической энергии, которая теряется при транспортировке от  $i$ -го производителя  $j$ -му потребителю;  $\alpha^q$ ,  $\alpha^N$  – коэффициенты.

Выработка энергии у производителей должна превосходить потребности потребителя на величину указанных потерь:

$$N_i^{inp} = \sum_j^m N_{ij}(1 + \alpha^N \delta_{ij}^N), \quad (6)$$

$$Q_i^{inp} = \sum_j^m Q_{ij}(1 + \alpha^q \delta_{ij}^q),$$

где  $N_i^{inp}$  – электрическая нагрузка, генерируемая  $i$ -м производителем;  $Q_i^{inp}$  – тепловая нагрузка, генерируемая  $i$ -м производителем.

Для решения сформулированной оптимизационной задачи (1)–(6) используется метод статистического программирования [8–10], который хорошо себя зарекомендовал при решении многомерных задач. Преимущество этого метода – простота его компьютерной реализации, недостаток – отсутствие уверенности в том, что найденное решение является глобальным экстремумом целевой функции.

Разработанный для решения сформулированной оптимизационной задачи алгоритм включает следующие операции:

1. Ввод исходных данных: задание матриц тепловой и электрической энергий, которые необходимо поставить потребителям, и матриц транспортных потерь энергии при ее передаче от производителей до потребителей.

2. Генерация случайным образом двух матриц ( $Q_{ij}$  и  $N_{ij}$  размера  $n \times m$ ) транспортных потоков для тепловой и электрической энергий.

3. Нормировка значений элементов каждого столбца полученных матриц путем деления на сумму элементов этого столбца и умножения на значение нагрузки, соответствующей этому столбцу (потребителю энергии).

4. Определение согласно (6) энергетических нагрузок каждого производителя энергии.

5. Определение согласно (3) расхода первичных энергетических ресурсов для каждого производителя энергии.

6. Определение согласно (1) значения целевой функции оптимизации. Если найденное значение оказывается меньше выбранного минимального значения, то минимальное значение и оптимальные параметры обновляются.

7. Операции согласно п. 2–6 повторяются заданное число раз или до достижения требуемого значения целевой функции.

<sup>2</sup> Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: РД 34.09.155-93. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993. – 43 с.

Порядок представления исходных данных и результаты расчетного анализа рассмотрим на следующем примере. В рассматриваемом случае общее число поставщиков тепловой и электрической энергии выбирается равным двум ( $n = 2$ ), число потребителей энергии – также равным двум ( $m = 2$ ). Тепловая нагрузка для двух потребителей задается матрицей-строкой  $\mathbf{Q}^{\text{out}} = [79 \ 108]$  МВт, а электрическая нагрузка – матрицей-строкой  $\mathbf{N}^{\text{out}} = [38 \ 40]$  МВт. Матрицы транспортных потерь в сетях для тепловой и электрической энергии выбраны следующим образом:

$$\Delta^q = \alpha^q \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.1 \end{pmatrix}, \quad \Delta^N = \alpha^N \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.1 \end{pmatrix}.$$

Для исследования влияния потерь на результаты решения оптимизационной задачи вводятся масштабирующие скалярные коэффициенты  $\alpha^q$  и  $\alpha^N$ , на которые умножаются указанные матрицы потерь. Все элементы матрицы потерь при варьировании коэффициентов изменяются пропорционально их значениям.

Следует отметить, что выбор определенных значений коэффициентов потерь позволяет получить соответствующие частные случаи постановки оптимизационной задачи:

а) Если значения коэффициентов выбираются равными нулю ( $\alpha^N = \alpha^q = 0$ ), то условия передачи энергии перестают влиять на результаты. Общая постановка задачи оптимальной генерации и транспорта соответствует при этом задаче оптимальной генерации энергии.

б) Если выбираются постоянные значения для удельного расхода тепловой энергии на выработку электрической энергии ( $q_{Ti} = \text{const}$ ), то условия генерации энергии перестают влиять на результаты решения. Общая постановка задачи при этом соответствует задаче оптимального транспорта энергии.

в) Если значения коэффициентов потерь отличны от нуля, а значения для удельного расхода тепловой энергии варьируются ( $\alpha^N \neq 0$ ,  $\alpha^q \neq 0$  и  $q_{mi} = f(Q_i^{\text{inp}}, N_i^{\text{inp}})$ ), то решается задача совместной оптимизации генерации и транспорта энергии. Таким образом, представленная задача обладает большей общностью по сравнению с известными оптимизационными задачами, которые являются ее частными случаями.

Результаты решения сформулированной задачи приведены на рис. 2 в виде графиков зависимостей относительных значений целевой функции от коэффициента потерь тепловой энергии при разных значениях коэффициента потерь электрической энергии. Каждая точка графика соответствует решению оптимизационной задачи, т. е. для них известны оптимальные распределения тепловых и электрических нагрузок между производителями и оптимальные транспортные потоки между производителями и потребителями энергии. Для удобства анализа результатов значения целевой функции отнесе-

ны к оптимальному значению целевой функции для случая отсутствия транспортных потерь.

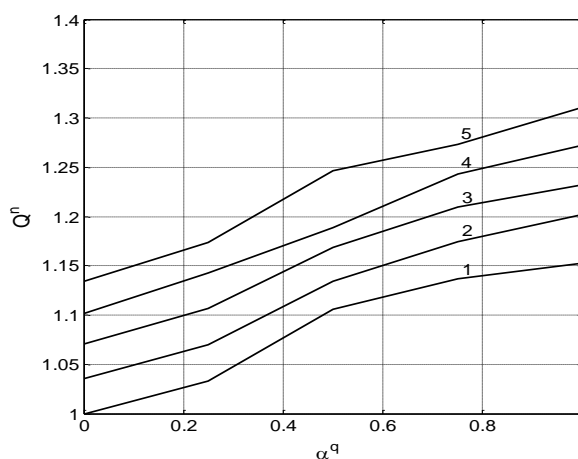


Рис. 2. Зависимость относительных значений целевой функции от коэффициента транспортных потерь тепловой энергии при разных значениях коэффициента транспортных потерь электрической энергии: 1 –  $\alpha^N = 0$ ; 2 – 0,25; 3 – 0,5; 4 – 0,75; 5 – 1

Проведенный анализ показал, что при возрастании коэффициента потерь в сетях тепловой и электрической энергии возрастают значения целевой функции, что является достаточно очевидным результатом расчетов. Ценность представленных результатов заключается в том, что они позволяют оценить чувствительность влияния транспортных потерь на увеличение затрат первичных энергетических ресурсов при оптимальном режиме работы интегрированной системы.

Графики зависимостей расхода первичных энергетических ресурсов до и после оптимизации представлены на рис. 3. Сопоставление результатов приводится при одинаковых суммарных нагрузках у потребителей. Вдоль оси абсцисс на графике откладываются значения относительной нагрузки первого потребителя по отношению к суммарной нагрузке всех потребителей. Анализ полученных результатов показывает, что решение задачи совместной оптимизации генерации и транспорта энергии в исследованных условиях позволяет снизить потребление энергии на 4–5 %, что следует признать существенной экономией энергетических ресурсов.

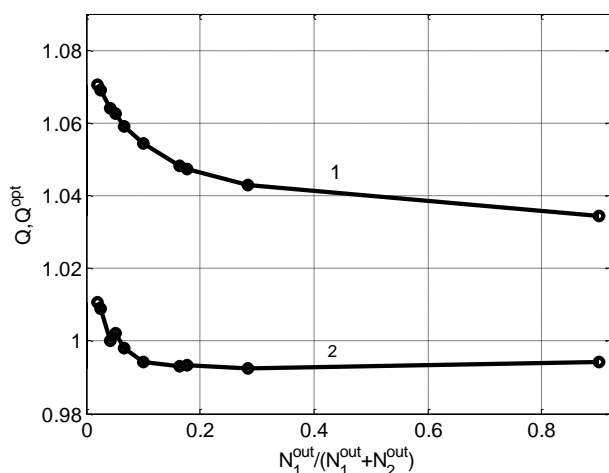


Рис. 3. Зависимости расхода первичных энергетических ресурсов до (1) и после (2) оптимизации генерации и транспорта энергии от относительной нагрузки первого потребителя

Таким образом, предложенный подход позволяет обеспечить заданные параметры энергоснабжения потребителей при минимальных ресурсных затратах, что является предпосылкой для создания интеллектуальных энергосберегающих систем, позволяющих в оперативном режиме поддерживать оптимальное обеспечение потребителей при минимальных суммарных затратах энергетических ресурсов. Данные результаты могут также использоваться при формировании обоснованных заявок оптового рынка электрической энергии (мощности).

#### Список литературы

1. Качан А.Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС. – Минск: Высш. шк., 1985. – 176 с.
2. Аминов Р.З. Векторная оптимизация режимов работы электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 304 с.
3. Оптимальная стратегия генерации электрической энергии на ТЭС / Д.А. Уланов, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 1. – С. 14–16.
4. Андрущенко А.И., Змачинский А.В., Понятов В.А. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС. – М.: Высш. шк., 1974. – 276 с.
5. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

Жуков Владимир Павлович,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45,  
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Осипов Дмитрий Андреевич,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры прикладной математики,  
e-mail: dima-link@mail.ru

Уланов Денис Александрович,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45.

6. Оптимальная выработка и передача энергии в тепловых и электрических сетях / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Д.А. Уланов, Г.В. Ледуховский, А.А. Зубанов // Теплоэнергетика. – 2011. – № 8. – С. 8–12.

7. Акименкова В.М., Гришфельд В.Я. Определение аналитических выражений для тепловых характеристик теплофикационных турбин методом планирования эксперимента // Теплоэнергетика. – 1970. – № 11. – С. 48–51.

8. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 208 с.

9. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

10. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

#### References

1. Kachan, A.D. *Optimizatsiya rezhimov i povyshenie effektivnosti raboty paroturbinnnykh ustanovok TES* [Optimization of regimes and improving the efficiency of the steam turbines at TP plants]. Minsk, Vysshaya shkola, 1985. 176 p.
2. Aminov, R.Z. *Vektornaya optimizatsiya rezhimov raboty elektrostantsiy* [Vector optimization of operating modes of power stations]. Moscow, Energoatomizdat, 1994. 304 p.
3. Ulanov, D.A., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V. *Optimal'naya strategiya generatsii elektricheskoy energii na TES* [The optimal strategy for the generation of electricity at thermal power stations]. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 1, pp.14–16.
4. Andryushchenko, A.I., Zmachinskiy, A.V., Ponyatov, V.A. *Optimizatsiya teplovykh tsiklov i protsessov TES* [Optimization of thermal cycles and thermal power plant processes]. Moscow, Vysshaya shkola, 1974. 276 p.
5. Kobets, B.B., Volkova, I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii SMART GRID* [Innovative development of the electric power industry on the basis of the SMART GRID concept]. Moscow, IATs Energiya, 2010. 208 p.
6. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Ulanov, D.A., Ledukhovskiy, G.V., Zubanov, A.A. *Optimal'naya vyrabotka i peredacha energii v teplovykh i elektricheskikh setyakh* [Optimal production and transfer of energy in thermal and electrical networks]. *Teploenergetika*, 2011, no. 8, pp. 8–12.
7. Akimenkova, V.M., Grishfel'd, V.Ya. *Opredelenie analiticheskikh vyrazheniy dlya teplovykh kharakteristik teplofikatsionnykh turbin metodom planirovaniya eksperimenta* [Determination of analytical expressions for the thermal characteristics of cogeneration turbines by the method of experimental design]. *Teploenergetika*, 1970, no. 11, pp. 48–51.
8. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: objectives, principles, methodology]. Moscow, Drofa, 2004. 208 p.
9. Karmanov, V.G. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical programming]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p.
10. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow, Nauka, 1981. 488 p.

*Ледуховский Григорий Васильевич*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: lgv83@yandex.ru

*Барочкин Евгений Витальевич*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,  
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru