

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОСТАВОК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОРЫНКА УКРАИНЫ

ГАМБАРОВ Л. А., ШЕВЧЕНКО С. В., ЧЕРНЫШЕВА Н. П.

УДК 338.242

Гамбаров Л. А., Шевченко С. В., Чернышева Н. П. Оптимизация производства, распределения и поставок электроэнергии в условиях энергорынка Украины

В статье рассмотрены подходы к моделированию производства, распределения и поставок электроэнергии в энергосистеме Украины в условиях энергорынка. Рассматриваются особенности электроэнергии как товара и, как следствие этих особенностей, отмечается дисбаланс между поставками и потреблением электроэнергии. Обосновывается возникновение задачи согласования объемов производства и поставок с установленным уровнем спроса, подверженным динамическим изменениям, в условиях дефицита ресурсов. Учитывается, что электроэнергия поступает потребителям через промежуточные узлы – гидроаккумулирующие станции. Авторами предлагается сведение задачи нахождения оптимального плана передачи электроэнергии из пунктов производства в пункты потребления при минимизации транспортных расходов к многомерной транспортной задаче с промежуточными узлами. В статье формулируется математическая модель этой задачи, приводятся алгоритмы её решения, а также рассматривается практический пример применения предлагаемого подхода и приводится анализ полученных результатов.

Ключевые слова: энергосистема, электроэнергия, энергорынок, моделирование, модель, распределение, передача, оптимизация.

Формул: 21. **Библ.:** 11.

Гамбаров Леонид Арамович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экономической кибернетики и маркетингового менеджмента, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина)

Шевченко Сергей Васильевич – доцент, кафедра автоматизированных систем управления, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина)

Чернышева Надежда Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экономической кибернетики и маркетингового менеджмента, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина)

УДК 338.242

Гамбаров Л. А., Шевченко С. В., Чернышева Н. П. Оптимізація виробництва, розподілу та поставок електроенергії в умовах енергоринку України

У статті розглянуто підходи до моделювання виробництва, розподілу і постачання електроенергії в енергосистемі України в умовах енергоринку. Розглядаються особливості електроенергії як товару і, як наслідок цих особливостей, відзначається дисбаланс між поставками і споживанням електроенергії. Обґрунтовується виникнення задачі узгодження обсягів виробництва і поставок з установленим рівнем попиту, схильним до динамічних змін, в умовах дефіциту ресурсів. Враховується, що електроенергія надходить споживачам через проміжні вузли – гідроаккумулюючі станції. Авторами пропонується зведення задачі знаходження оптимального плану передачі електроенергії з пунктів виробництва в пункти споживання при мінімізації транспортних витрат до багатовимірної транспортної задачі з проміжними вузлами. У статті формулюється математична модель цієї задачі, наводяться алгоритми її вирішення, а також розглядається практичний приклад застосування запропонованого підходу і наводиться аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: енергосистема, електроенергія, енергоринок, моделювання, модель, розподіл, передача, оптимізація.

Формул: 21. **Бібл.:** 11.

Гамбаров Леонід Арамович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри економічної кібернетики і маркетингового менеджменту, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна)

Шевченко Сергій Васильович – доцент, кафедра автоматизованих систем управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна)

Чернышева Надія Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики і маркетингового менеджменту, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна)

UDC 338.242

Gambarov L. A., Shevchenko S. V., Chernyshova N. P. Optimisation of Production, Distribution and Supply of Electric Energy under the Conditions of the Energy Market of Ukraine

The article considers approaches to modelling production, distribution and supply of electric energy in the energy system of Ukraine under conditions of the energy market. It considers specific features of electric energy as a commodity and, as a consequence of these specific features, a disbalance between supply and consumption of electric energy. It justifies appearance of the task of co-ordination of volumes of production and supply with the established level of demand, subject to dynamic changes, under conditions of deficit of resources. It takes into account that electric energy is delivered to consumers through intermediary nodes – pumped-storage plants. The authors propose to reduce the task of finding an optimal plan of transmission of electric energy from points of production to points of consumption with minimisation of transportation expenditures to a multi-dimensional transportation task with intermediary nodes. The article formulates a mathematical model of this task, provides algorithms of its solution and considers a practical example of application of the proposed approach and provides analysis of the obtained results.

Key words: energy system, electric energy, energy market, modelling, model, distribution, transmission, optimisation.

Formulae: 21. **Bibl.:** 11.

Gambarov Leonid A. – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Economic Cybernetics and marketing management, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (vul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine)

Shevchenko Sergiy V. – Associate Professor, Department of Automated Control Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (vul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine)

Chernyshova Nadezhda P. – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economic Cybernetics and marketing management, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (vul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine)

Тепловая и электрическая энергия – необходимое условие жизнедеятельности человеческого общества. Эффективное функционирование электроэнергетики является необходимым условием стабильности процессов национальной экономики, ее развития, выполнения плановых структурных преобразований, удовлетворения потребностей в электрической энергии, обеспечения уровня энергетической безопасности [3]. В условиях дефицита ресурсов, кризисных состояний экономики, перехода к рыночным механизмам регулирования деятельности достаточно важным становится оптимизация принимаемых решений в планировании и управлении распределением и поставками электроэнергии [4].

Все сделки купли-продажи электрической энергии в Украине осуществляются на оптовом рынке. Оптовый рынок электроэнергии (ОРЭ) Украины был создан в 1996 году по образцу модели пула электроэнергии Англии. Физически электроэнергия, произведенная генерирующими компаниями, попадает к потребителю через магистральные и распределительные электрические сети на основании договоров на передачу электрической энергии между соответствующими субъектами ОРЭ [7].

Наиболее важными особенностями электроэнергетики как товара, которые необходимо учитывать при организации рынка электроэнергии, являются следующие: производство, доставка (передача и распределение) и потребление электроэнергии в силу его физической природы происходят практически одновременно, и ее невозможно складировать (накапливать) в значительных объемах, электроэнергия является в высшей степени стандартизированным продуктом, поставляемым множеством производителей в общие электрические сети и мгновенно потребляемым отсюда же множеством потребителей. Поэтому с физической точки зрения невозможно определить, кто произвел электроэнергию, потребляемую тем или иным потребителем, – можно лишь контролировать объемы поставки в общую сеть от каждого производителя и объемы потребления из нее каждым потребителем [5]. Используемое диспетчерское управление в электроэнергетике используется для минимизации отклонения объемов производства электроэнергии от установленного уровня спроса [6]. Однако приведенные особенности ее использования влекут дисбаланс между поставками и потреблением [8]. Возникает задача согласования объемов производства и поставок электроэнергии с установленным уровнем спроса, подверженным динамическим изменениям в ходе рассматриваемых периодов времени [9].

Целью работы является построение математической модели для управления производством, распределением и поставками электроэнергии в условиях функционирования оптового рынка электроэнергии, формирование подходов для ее решения с учетом текущих состояний электроэнергетической системы, ресурсных ограничений и характеристик процессов функционирования и управления.

Суть обсуждаемой проблемы заключается в следующем. Все сделки купли-продажи электрической энергии в Украине осуществляются на оптовом рынке. Физически

электроэнергия, произведенная генерирующими компаниями, попадает к потребителю через магистральные и распределительные электрические сети на основании договоров на передачу электрической энергии между соответствующими субъектами ОРЭ. В энергосистеме Украины большую долю составляют мощности тепловых и атомных электростанций, которые не могут быстро снижать выработку электроэнергии при снижении энергопотребления (например, ночью) или же делают это с большими потерями. Имеющиеся в составе энергосистемы гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) используются для выравнивания суточной неоднородности графика электрической нагрузки [1, 2]. Электроэнергия, произведенная электростанциями, передается посредством линий электропередач (ЛЭП) в электросеть, для поставки конечным потребителям.

Пусть имеется n пунктов производства электроэнергии и m пунктов ее потребления, а также k промежуточных пунктов аккумуляции электроэнергии. Производство и потребление сбалансированы, т. е. общие объемы производства и потребления равны между собой. Задача состоит в отыскании рационального плана передачи из пунктов производства в пункты потребления электроэнергии, при котором транспортные расходы минимальны. Полученный в результате решения план передачи электроэнергии должен отвечать следующим требованиям:

- 1) спрос каждого из пунктов потребления должен полностью удовлетворяться;
- 2) вся электроэнергия, произведенная в каждом пункте производства, должна быть полностью использована.

Таким образом, рассматривается ситуация, когда электроэнергия поступает потребителям не непосредственно, а через промежуточные узлы (гидроаккумулирующие станции). Задача составления плана транспортировок, которая позволяет минимизировать общие затраты, сводится к многомерной транспортной задаче [10]. Формализуем поставленную задачу. Введем следующие обозначения:

x_{ik}, \hat{x}_{kj} – количество единиц продукта, перевозимого в соответствии с маршрутами $i \rightarrow k$ и $k \rightarrow j$;

c_{ik}, \hat{c}_{kj} – стоимости перевозки единицы продукта по соответствующим маршрутам $i \rightarrow k$ и $k \rightarrow j$;

a_i – количество единиц продукта, произведенное в i -ом пункте;

b_j – количество единиц продукта, потребленное в j -м пункте;

d_k – суммарная пропускная способность k -го узла.

В результате получаем транспортную задачу с промежуточными узлами (ТЗПУ) следующего вида: найти

$$x = (x_{ik}), \hat{x} = (\hat{x}_{kj}), i \in I = \{1, \dots, n\}, j \in J = \{1, \dots, m\}, k \in K, \quad (1)$$

обеспечивающие

$$\min_{x, \hat{x}} \left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \hat{c}_{kj} \hat{x}_{kj} \right) \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = a_i, \quad i \in I = \{1, \dots, n\}, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} = \sum_{j \in J} \hat{x}_{kj}, \quad k \in K = \{1, \dots, r\}, \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \hat{x}_{kj} = b_j, \quad j \in J = \{1, \dots, m\}, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \hat{x}_{kj} \leq d_k, \quad k \in K, \quad (6)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad \hat{x}_{kj} \geq 0, \quad i \in I, \quad k \in K, \quad j \in J. \quad (7)$$

Математическая модель (1) – (7) описывает транспортную задачу с промежуточными узлами (ТЗПУ). Суть ее – в нахождении оптимального плана перевозок продукта из пунктов производства i в пункты потребления j при наличии ограничений на пропускные способности промежуточных узлов k . Предполагается, что весь произведенный продукт в каждом i -м пункте производства используется, а спрос каждого j -го пункта потребления удовлетворяется.

Возрастание числа индексов у переменных до трех резко увеличивает размерность задачи и делает принципиально невозможным ее решение простыми способами, подобными методу потенциалов и его модификациями [10]. Использование методов линейного программирования при значительных n, m, r (точнее, при достаточно большом значении их произведения) также невозможно из-за возрастания размерности задачи. С математической точки зрения предполагаемый подход является разновидностью метода линеаризации в пространстве потенциалов и примыкает к проблематике негладкой оптимизации.

Особенность ТЗПУ связана с наличием ограничений (4). Если ввести переменные $h_k, k \in K$:

$$\sum_{i \in I} x_{ik} = \sum_{j \in J} \hat{x}_{kj} = h_k, \quad k \in K \quad (8)$$

и предположить, что $h_k = \bar{h}_k$ – определены, то поставленная ранее задача распадается на две независимые двух-индексные транспортные подзадачи [10].

В первой подзадаче T нужно найти:

$$x = (x_{ik}), \quad i \in I = \{1, \dots, n\}, \quad k \in K = \{1, \dots, r\} \quad (9)$$

$$\min_x \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik}$$

при ограничениях:

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = a_i, \quad i \in I; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} = \bar{h}_k, \quad k \in K; \quad (11)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad i \in I, \quad k \in K. \quad (12)$$

Во второй подзадаче необходимо определить:

$$\hat{x} = (\hat{x}_{kj}), \quad j \in J = \{1, \dots, m\}, \quad k \in K = \{1, \dots, r\} \quad (13)$$

$$\min_x \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \hat{c}_{kj} \hat{x}_{kj}$$

при ограничениях:

$$\sum_{j \in J} \hat{x}_{kj} = \bar{h}_k, \quad k \in K; \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \hat{x}_{kj} = b_j, \quad j \in J; \quad (15)$$

$$\hat{x}_{kj} \geq 0, \quad j \in J, \quad k \in K. \quad (16)$$

Введем в рассмотрение вектор $h = \{h_k\}$. Оптимальное значение функции цели задачи T при $\bar{h} = h$ обозначим через $f(h)$. Функция $f(h)$ определена, выпукла и непрерывна на множестве H_0 , задаваемом условиями

$$\sum_{k \in K} h_k = \sum_{i \in I} a_i,$$

$$h_k \geq 0, \quad k \in K.$$

Аналогично по задаче \hat{T} находится функция $\hat{f}(h)$. Пусть $H_s(\varepsilon)$ – множество векторов $h(s+1) = \{h_k(s+1)\}$, удовлетворяющих ограничениям

$$\sum_{k \in K} h_k(s+1) = \sum_{i \in I} a_i,$$

$$h_k(s+1) \leq d_k, \quad k \in K,$$

$$h_k(s+1) \geq (1-\varepsilon)\bar{h}_k(s), \quad k \in K,$$

где $\bar{h}_k(s)$ выбраны на $(s-1)$ -м шаге, $\varepsilon \in [0, 1]$, $s = 1, \dots, [3]$.

Определение оптимальных наборов

$$x^* = \{x_{ik}^*\} \quad \text{и} \quad \hat{x}^* = \{\hat{x}_{kj}^*\}$$

связем с задачей построения последовательности $\{\bar{h}_k(s)\}$. Рассмотрим функцию

$$\Phi(h) = f(h) + \hat{f}(h)$$

и поставим задачу: найти вектор $h^* \in H$ такой, что

$$\min \{ \Phi(h) \mid h \in H \} = \Phi(h^*), \quad (17)$$

где множество $H = H_s(1)$ не зависит от s . Обозначим через $g_\Phi(h)$ субградиент функции $\Phi(h)$ и решим задачу

$$\min \{ \langle g_\Phi(\bar{h}(s)), h(s+1) \rangle \mid h(s+1) \in H_s \}, \quad (18)$$

где $\langle g_\Phi(\bar{h}(s)), h(s+1) \rangle$ – скалярное произведение соответствующих векторов. Субградиент $g_\Phi(\bar{h}(s))$ выразим

через двойственные оценки задач T и \hat{T} . Тогда выражение (18) можно переписать в виде: найти

$$\min_{h(s+1) \in H_s(\varepsilon)} \sum_{k \in K} (v_k(s) - \hat{u}_k(s)) h_k(s+1), \quad (19)$$

где $v_k(s), k \in K$ – оптимальные двойственные оценки ограничений

$$\sum_{i \in I} x_{ik} = \bar{h}_k(s), \quad k \in K,$$

задачи T , а $\hat{u}_k(s), k \in K$ – оптимальные двойственные оценки ограничений

$$\sum_{j \in J} \hat{x}_{kj} = \bar{h}_k(s), \quad k \in K$$

задачи \hat{T} .

Для определения $\bar{h}(s+1)$ используется задача следующего вида: найти

$$\min_{0 \leq \varepsilon \leq 1} \left\{ \Phi \left(\arg \min_{h(s+1) \in H_s(\varepsilon)} \langle g_\phi(\bar{h}(s)), h(s+1) \rangle \right) \right\}. \quad (20)$$

Она предполагает решение последовательности вспомогательных задач (19), в которых ε выбирается с определенным шагом дискретности (например, 0, 1), начиная с $\varepsilon = 1$. В качестве $\bar{h}(s+1)$ берется решение вспомогательной задачи (19) при $\varepsilon = \varepsilon(s)$, на котором достигается минимум функции

$$\Phi \left(\arg \min_{h(s+1) \in H_s(\varepsilon)} \langle g_\phi(\bar{h}(s)), h(s+1) \rangle \right)$$

по дискретным значениям ε .

Итеративный процесс определения решения h^* задачи (17) состоит в следующем.

Задается вектор $\bar{h}(1) \in H_s(1)$. Его можно найти, например, по формулам

$$h_k = d_k \sum_{i \in I} a_i / \sum_{k \in K} d_k, \quad k \in K. \quad (21)$$

Соотношения (21) означают, что через промежуточные узлы проходят потоки, пропорциональные их пропускным способностям. Для любого $s \geq 1$ вектор $\bar{h}(s+1)$ определяется на итерации s , включающей несколько этапов.

1. Вычисляется $\Phi(h(s))$ путем решения двух независимых транспортных задач T и \hat{T} любым методом, например, потенциалов, позволяющим получить оптимальные двойственные оценки.

2. Определяется субградиент $g_\phi(h(s))$.

3. Решается задача (20) для нахождения оптимального значения $\varepsilon = \varepsilon(s)$ и вычисления $\bar{h}(s+1)$. Далее идет возврат к этапу 1.

Пример 1. Пусть $n = 4$, $r = 4$, $m = 5$. С целью исследования скорости практической сходимости алгоритма и точности получаемого результата этот пример решен параллельно при помощи стандартной процедуры ЛП. Точность решения существенно зависит от точности определения оптимального значения шагового множителя $\varepsilon = \varepsilon(s)$. На широком диапазоне статистической информации время решения этого примера с использованием схемы декомпозиции и процедуры ЛП практически совпадало (при достижении точности порядка 1% за четыре итерации). Вычислительная эффективность подхода значительно повышается, если на этапе 3 при $s=1$ отказаться от задачи (20) и в качестве $\bar{h}(2)$ выбрать решение задачи (19) при $\varepsilon = 1$. Далее алгоритм функционирует без измерений, согласно описанной выше схеме. В этом случае, в условиях того же примера точность около 1% была достигнута за две итерации, а время решения ТЗПУ сократилось почти в 3 раза.

Пример 2. Положим $n = 30$, $r = 10$, $m = 20$. Исследование алгоритма в этих условиях подтвердило сделанное выше предположение. Для достижения одной и той же точности время решения задачи по двум предложенным модификациям этапа 3 при $s = 1$ различалось в 7 – 10 раз в зависимости от предъявленных требова-

ний. Учитывая, что на практике априорная информация о целевой функции, как правило, неточна, получение высокоточного результата теряет смысл. Если исследуются задачи, для которых высокая точность решения не нужна, то достаточно ограничиться лишь двумя итерациями, причем решение задачи (20) нужно осуществлять только для $s = 2$. При этом требование к точности определения шагового множителя $\varepsilon(2)$ невысоко, что значительно снижает объем вычислений и делает процедуру легко доступной пользователю. Исследование задач, для которых высокая точность решения крайне важна, также предполагает вычисление $\bar{h}(s+1)$ по правилу (21), начиная с $s = 2$. Однако в этом случае требование, предъявляемое к точности шаговых множителей, жесткое, а число итераций определяется, в конечном счете, точностью получаемого решения. При этом объем вычислений существенно возрастает, а эффективность предлагаемого подхода снижается.

Рассмотренная в работе схема декомпозиции ТЗПУ допускает и иной подход к решению задачи. Он связан со снятием условия монотонности метода и специальной регулировкой шаговых множителей. При реализации соответствующего алгоритма $\varepsilon(s)$ задаются априорно, а не вычисляются с помощью решения задачи (20), как прежде. Например, в качестве $\varepsilon(s)$ можно выбрать

$$\varepsilon(s) = (q)^s, \quad q \in (0, 1), \quad s = 1, 2, \dots$$

Подобная регулировка шага отличается крайней простотой и быстро приводит в окрестность решения задачи (17). Дальнейшее уменьшение функции $\Phi(h)$ замедляется, и начинаются колебания возле точки экстремума. Так, в условиях примера 1 последовательность $h(s)$ за 10 итерации попала в окрестность множества решения с точностью до 1%. При этом время решения ТЗПУ сократилось почти в три раза по сравнению со временем, затраченным при использовании процедуры ЛП. Точность 0,1% была достигнута за 22 итерации, а время решения сократилось в 1,5 раза. Дальнейшие вычисления не привели к существенному повышению точности.

Исследование результатов примера 2 показало вычислительную эффективность нерелаксационного алгоритма с возрастанием размерности задачи.

ВЫВОДЫ

В результате анализа процессов производства распределения и поставок электроэнергии в условиях энергорынка на Украине выделена задача согласования объемов производства электроэнергии со значениями спроса, установленными в результате функционирования рынка двусторонних договоров и балансирующего рынка; сформирована математическая модель в виде транспортной задачи с промежуточными узлами и предложены алгоритмы ее решения. Полученные результаты решения свидетельствуют о возможности их использования в составе задач планирования и управления украинской электроэнергетики.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: выделены процессы управления объемами производства,

распределения и поставок электроэнергии, построена математическая модель, обеспечивающая согласование уровня спроса и объемов производства, распределения и поставок электроэнергии с минимальными затратами, предложены алгоритмы ее решения. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Синюгин В. Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике / В. Ю. Синюгин, В. И. Магрук, В. Г. Родионов. – Изд. ЭНС, 2008, 352с.
2. Баландин Д. В. Структура и особенности рынка электроэнергии межстрановой анализ / Д. В. Баландин // Вестник СПбГУ. Сер. 8.– 2005. – Вып. 3.
3. Закон України «Про електроенергетику» (Редакція від 19.01.2012, підстава 4220-17).
4. Закон України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України», вносився депутат. України Глуценком І. М., від 17.07.2012 р.
5. Александров Г. Н. Передача электрической энергии / Г. Н. Александров. – 2-е изд. – С-Птб. : Изд. политех. универ., 2009. – 410 с.
6. Красник В. В. Рыночная электроэнергетика. Подключение к электросетям, покупка и продажа электроэнергии / В. В. Красник. – Москва : Энергосервис, 2007. – 248 с.
7. Кальченко В. М. Оптовый рынок электрической энергии Украины: функционирования, проблемы, досвід та перспективи / В. М. Кальченко // Энергетика и электрификация. – Спецвыпуск. – 2001. – август.
8. ГНД 34.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-154 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. Затверджено наказом № 757 Мінпаливенерго України від 17.12.03.
9. Дерзский В. Г. Обоснование уровня нормативных потерь электроэнергии в распределительных сетях / В. Г. Дерзский, В. Ф. Скиба // Энергетика и электрификация. – 2007. – № 12.
10. Габасов Р. Методы линейного программирования. Часть 2. Транспортные задачи / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова.– М. : Либроком, 2010. – 240 с.
11. Гамбаров Л. А. Итеративный алгоритм решения одного класса задач линейного программирования / Л. А. Гамбаров, 1981.

REFERENCES

- Aleksandrov, G. N. *Peredacha elektricheskoy energii* [Transfer of electrical energy]. St. Petersburg: Izdatelstvo SPbGPU, 2009.
- Balandin, D. V. "Struktura i osobnosti rynku elektroenergii mezhstranovyy analiz" [Structure and cross-country analysis of the electricity market]. *Vestnik SPbGU*, no. 3 (2005).
- Derzskiy, V. G., and Skiba, V. F. "Obosnovanie urovnia normativnykh poter elektroenergii v raspredelitelnykh setiakh" [Setting the level of regulatory power losses in distribution networks]. *Energetika i elektrifikatsiia*, no. 12 (2007).
- Gabasov, R., and Kirillova, F. M. *Metody lineynogo programmirovaniia* [Linear programming techniques]. Moscow: Librokom, 2010.
- Krasnik, V. V. *Rynochnaia elektroenergetika. Podkliuchenie k elektrosetiam, pokupka i prodazha elektroenergii* [Electricity

market. Connection to the electricity grid, the purchase and sale of electricity]. Moscow: Energoservis, 2007.

Kalchenko, V. M. "Optoviy rynek elektrychnoi enerhii Ukrainy: funktsionuvannia, problemy, dosvid ta perspektyvy" [Wholesale Electricity Market of Ukraine: performance, challenges, experiences and perspectives]. *Enerhetyka y elektryfikatsiia* (2001).

[Legal Act of Ukraine] (2012).

[Legal Act of Ukraine] (2012).

Metodyka skladannia struktury balansu elektroenergii v elektrychnykh merezhakh 0,38-154 kV, analizu ioho skladovyykh i normuvannia tekhnolohichnykh vytrat elektroenergii, 2003.

Siniugin, V. Yu, Magruk, V. I., and Rodionov, V. G. *Gidroakumuliruiushchie elektrostantsii v sovremennoy elektroenergetike* [Pumped storage power plant in a modern power]. Moscow: ENAS, 2008.