

УДК 621.310.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423
Шифр специальности ВАК: 05.14.01

Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства

И.У. Рахмонов¹✉, В.Я. Ушаков², А.М. Нажимова³, К.К. Обидов⁴, С.Р. Сулейманов⁵

¹ Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Каракалпакский государственный университет, Узбекистан, г. Нукус

⁴ «ТИИИМСХ» НИУ Бухарский институт управления природными ресурсами, Узбекистан, г. Бухара

⁵ Научно-производственная компания КазТехАвтоматика, Казахстан, г. Телмиртау

✉ ilider1987@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена важностью минимизации потребления электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства с учетом особенностей технологических процессов на них и требований сохранения объема выпускаемой ими продукции. **Цель:** решить задачу минимизации потребления электрической энергии на основе математической модели и градиентного метода в условиях оптимального планирования объема продукции, выпускаемой на промышленными предприятиями с непрерывным характером производства; разработать математическую модель оптимального распределения продукции за цикл времени (месяц, квартал, год) по цехам с учетом простых и функциональных ограничений, исходя из условия обеспечения минимального потребления электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства. **Методы.** При разработке математической модели обеспечения минимального потребления электроэнергии при сохранении объема производимой продукции применены классические методы оптимизации Лагранжа, а с целью обеспечения достаточной точности расчета – итерационные методы. Для рассматриваемой задачи предполагалась и установлена погрешность расчета на уровне $\varepsilon=0,1$. Известно, что выбор значения погрешности расчета зависит от особенностей решаемой задачи и лица, принимающего решение. Для проверки адекватности разработанной модели был использован метод отыскания относительного экстремума функции нескольких переменных. **Результаты.** Использование математической модели, учитывающей характер технологического процесса и граничные условия в простой и интегральной форме, показало целесообразность оптимального планирования электропотребления предприятием. Эффективность разработанных подходов проверена на примере металлургического предприятия как промышленного предприятия с непрерывным характером производства при решении задачи минимизации расхода электроэнергии на продукцию, производимую в течение отчетного периода. Использование предложенной модели позволило снизить годовое потребление электроэнергии на 2,5 % при сохранении неизменным объема производства продукции. Один из классических методов оптимизации – метод отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных – при проверке показал практически такие же результаты. Это еще одно свидетельство адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: технологический процесс, электропотребление, продукция, оптимизация, минимизация, метод Лагранжа, функциональные ограничения, математический модель, планирование, непрерывный режим работы, адекватность

Для цитирования: Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, А.М. Нажимова, К.К. Обидов, С.Р. Сулейманов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

UDC 621.310.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production

I.U. Rakhmonov^{1✉}, V.Ya. Ushakov², A.M. Najimova³, K.K. Obidov⁴, S.R. Suleimanov⁵

¹ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

⁴ "TIIAME" NRU Bukhara Institute of Natural Resources Management, Bukhara, Uzbekistan

⁵ Research and production company KazTechAutomatics, Temirtau, Kazakhstan

✉ ilider1987@asu.ru

Abstract. Relevance. Determined by the importance of minimizing electrical power consumption in industrial enterprises with continuous production, considering the specific characteristics of their technological processes and the requirements to maintain the output volume of their products. **Aim.** To solve the task of minimizing electrical power consumption based on a mathematical model and gradient method under optimal planning of the production volume of the industrial enterprises with continuous production; to develop a mathematical model for optimal distribution of production over a time cycle (month, quarter, year) across departments, taking into account both simple and functional constraints, derived from the condition of ensuring minimal electrical power consumption in industrial enterprises with continuous production. **Methods.** When developing the mathematical model for ensuring minimal electrical power consumption while preserving the production volume, classic Lagrange optimization methods were used. To ensure sufficient calculation accuracy, iterative methods were also applied. For the task under consideration, a calculation error margin of $\epsilon=0,1$ was assumed and established. It is known that the choice of calculation error margin depends on the specifics of the problem at hand and the decision-maker. To verify the adequacy of the developed model, the method of finding the relative extremum of a function of several variables was used. **Results.** The use of the mathematical model, which takes into account the nature of the technological process and boundary conditions in both simple and integral forms, demonstrated the feasibility of optimal planning of electrical power consumption by the enterprise. The effectiveness of the developed approaches was verified using a metallurgical enterprise as an example of an industrial enterprise with continuous production, in solving the task of minimizing electrical power consumption for products produced during the reporting period. The use of the proposed model allowed for a reduction in annual electrical power consumption by 2.5% while maintaining the same production volume. One of the classic optimization methods – the method of finding the relative extremum of functions of several variables – showed almost identical results upon verification. This serves as further evidence of the adequacy of the proposed model.

Keywords: technological process, power consumption, products, optimization, minimization, Lagrange method, functional limitations, mathematical model, planning, continuous production, adequacy

For citation: Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Najimova A.M., Obidov K.K., Suleimanov S.R. Mathematical modeling of minimization of electricity consumption by industrial enterprises with continuous production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423

Введение

Повышение эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях с непрерывным характером производства (ППНХП) требует выполнения системы мероприятий, в том числе специальных [1, 2]. К универсальным, наиболее общим, мероприятиям обычно относят следующие:

- учёт и контроль расхода электроэнергии;
- составление электробалансов отдельных электропотребляющих машин и агрегатов, цехов и предприятия в целом;
- нормирование электропотребления;

- разработка и реализация конкретных мероприятий по рациональному использованию электроэнергии.

Одним из путей повышения энергоэффективности работы промышленных предприятий является минимизация расхода ими электроэнергии при сохранении объёма выпускаемой продукции за рассматриваемый период. Минимизации расхода электроэнергии можно добиться привлечением потребителей; в рассматриваемом случае – ППНХП на административно-экономической основе [3].

В [4–6] предложена следующая технология реализации потенциала энергосбережения и повышения энергоэффективности (ЭС и ПЭЭ) на ППНХП:

- разработка новых методов и технических решений по снижению энергетических затрат;
- оптимизация расхода топлива, электрической и тепловой энергии в основных технологических процессах промышленного производства с использованием современных технических средств учёта, контроля и управления;
- разработка методов экспериментальных исследований и измерений на действующем оборудовании ППНХП;
- составление математических моделей параметров управления режимами энергопотребления, обеспечивающих минимум энергетических затрат.

В связи с этим на основе выполненного анализа современного состояния управления потреблением электроэнергии промышленными предприятиями можно сделать вывод, что целесообразным является разработка и использование специально созданной для этой цели математической модели.

Результаты исследования

При решении задач реализации потенциала ЭС и ПЭЭ в качестве основных энергетических показателей электропотребления, которые зависят от многих факторов, обычно рассматриваются: потребляемая активная мощность – P , расход электроэнергии – W , удельное электропотребление – d (на единицу произведенной продукции) [7, 8].

Обычно на показатели электропотребления наибольшее влияние оказывает объём и номенклатура выпускаемой продукции за расчётный период (Π). В математических моделях это влияние описывается выражением $P=f(\Pi)$ [9]. При выпуске нескольких видов продукции учитываются их объём и доля каждого вида в общем выпуске продукции, а также режим работы оборудования при изготовлении каждого вида продукции. Потребляемая мощность определяется для каждого вида продукции. В этих случаях исследование проводится на основе системного подхода, что позволяет разработать методы оптимизации электрических нагрузок и определить зависимости между режимом работы электрооборудования и его энергетическими показателями [10, 11].

Как известно [12, 13], исследование можно выполнять как на физической модели (на уменьшенном варианте реального объекта), так и на математической модели. В первом случае изучают сам процесс, а во втором исследуют уравнения, описывающие тот или иной процесс. Обычно в таких случаях невозможно аналитическое решение таких уравнений, поэтому с помощью различных приближенных методов уравнения приводят к виду, при котором они могут быть решены.

При оптимизации электропотребления разрабатываются и выполняются энергосберегающие мероприятия, для осуществления которых требуются значитель-

ные финансовые средства. При этом для оценки различных стратегий используются разработанные модели, и при изменении любого параметра с их помощью можно быстро и точно найти новые решения, обеспечивающие оптимальность системы в целом [14–16].

Промышленные предприятия, как правило, располагают информацией по итогам работы в отчетном периоде об объемах произведенной продукции и фактических расходах электроэнергии на каждый вид продукции в соответствии с принятой для производственных подразделений методикой учёта электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя) [17–19]. Необходимо отметить, что предложенная методика применима для предприятий, выпускающих один тип продукции с различающимися объемами по временным интервалам. На основе этой информации можно нормировать удельный расход электроэнергии по соотношению:

$$d_i = f(\Pi_i) = \frac{W_i}{\Pi_i}, \quad (1)$$

где W_i – расход электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя), кВтч; d_i – удельный расход электроэнергии за отчетный период (год, месяц, неделя), кВтч/т; Π_i – объём выпускаемой продукции за отчетный период (год, месяц, неделя), т.

Анализ статистических данных об объемах производства и соответствующих им удельных расходах электроэнергии показал, что наилучшим образом связь удельных расходов электроэнергии с объемами производства отражается экспоненциальной зависимостью вида [9]:

$$d_i = f(\Pi_i) = \exp(a_{i0} + a_{i1}\Pi_i), \quad (2)$$

где a_{i0} , a_{i1} – коэффициенты, определяемые для каждой зависимости (для каждого производственного подразделения предприятия).

Таким образом, на уровне производственных подразделений объём потребления электроэнергии можно определять на основе полученных зависимостей (1) по соотношению:

$$W_i = f(\Pi_i) = d_i \Pi_i. \quad (3)$$

Задача состоит в минимизации общего расхода или удельного расхода электроэнергии при ограничивающем условии для объема выпускаемой продукции Π_i , т. е.:

$$W_i = f(\Pi_i) \rightarrow \min \text{ или } d_i = f(\Pi_i) \rightarrow \min.$$

Исходя из особенностей работы оборудования ППНХП, для обеспечения неизменного объёма производства продукции в течение технологического процесса при минимально возможном потреблении электроэнергии задача оптимального распределения

производства готовой продукции в течение отчётного периода (без учета простых и функциональных ограничений) пошагово решается следующим образом [20, 21].

Минимизируется целевая функция, которая представляет собой сумму затрат на электроэнергию при производстве готовой продукции в j -цехах предприятия:

$$W_j = \Pi_j e^{a+b\Pi_j} \rightarrow \min, \quad (4)$$

здесь

$$W_j = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n. \quad (5)$$

Ограничения:

- по балансу готовой продукции, произведённой в цехах предприятия за отчетный период (год, месяц, неделя):

$$\Pi_j = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n, \quad (6)$$

- по максимальному и минимальному объемам готовой продукции, которая может быть произведена цехом за отчётный период (год, месяц, неделя):

$$\Pi_j^{\min} \leq \Pi_j \leq \Pi_j^{\max}, \quad j \in N. \quad (7)$$

Описанная уравнениями (4)–(7) задача с учетом ограничений минимизируется с помощью функции Лагранжа:

$$\begin{aligned} L &= W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n + \\ &+ \lambda(\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \dots - \Pi_n) = \\ &= \Pi_1 e^{a+b\Pi_1} + \Pi_2 e^{a+b\Pi_2} + \Pi_3 e^{a+b\Pi_3} + \dots + \Pi_n e^{a+b\Pi_n} + \\ &+ \lambda(\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \Pi_n), \end{aligned} \quad (8)$$

где λ – неопределенные множители Лагранжа с учётом условия баланса производства готовой продукции в отчетном периоде.

Для обеспечения минимума функции (8) должно выполняться следующее условие:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \Pi_1} &= w_1 - \lambda = (1 + b\Pi_1)e^{a+b\Pi_1} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_2} &= w_2 - \lambda = (1 + b\Pi_2)e^{a+b\Pi_2} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_3} &= w_3 - \lambda = (1 + b\Pi_3)e^{a+b\Pi_3} - \lambda = 0; \\ &\dots \\ \frac{\partial L}{\partial \Pi_n} &= w_n - \lambda = (1 + b\Pi_n)e^{a+b\Pi_n} - \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \Pi - \Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3 - \dots - \Pi_n = 0, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где $w_i = \frac{\partial W_i}{\partial \Pi_j}$ – относительный прирост потребления

электроэнергии j -го цеха при производстве готовой продукции Π_j за отчетный период,

Из системы (9) видно что, значения λ равны:

$$\lambda = (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_j}.$$

Для решения системы уравнений значения λ находим по минимальным значениям объема продукции, т. е.

$$\lambda = (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_{\min}}.$$

Тогда для определения значения Π_i имеем трансцендентные уравнения вида

$$f(\Pi_i) = \lambda - (1 + b\Pi_j)e^{a+b\Pi_i} = 0. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) применим метод итерации.

С учетом (10) уравнение имеет следующий вид:

$$\Pi_j = \frac{\lambda}{b} e^{-(a+b\Pi_i)} - \frac{1}{b}.$$

Значения Π_i из (4) определяются методом итерации.

Таким образом, для обеспечения минимума потребления электроэнергии в процессе производства готовой продукции необходимо выполнять условия, записанные в виде (6), (7).

В частных случаях, т. е. с учетом всех условий, приведенных в (8), получаем:

$$\left. \begin{aligned} w_n &= -\lambda_i, \quad i \in N; \\ \Pi - \sum_{i=1}^n \Pi_i &= 0, \end{aligned} \right\}.$$

Это означает, что при сохранении баланса готовой продукции равенство относительного прироста расхода электроэнергии i -го цеха при производстве продукции Π_j за рассматриваемый отчетный период является критерием минимального потребления электроэнергии [22, 23].

Для проверки правильности сформулированных выше выводов рассмотрена задача обеспечения минимального расхода электроэнергии на готовую продукцию, производимую промышленными предприятиями с непрерывным характером производства в течение отчетного периода. В связи с тем, что потребление электроэнергии на предприятии пропорционально удельной стоимости продукции, рекомендуется использовать стоимостные характеристики вместо характеристик электропотребления

$$\Pi_j = \frac{\lambda}{b} e^{-(a+b\Pi_i)} - \frac{1}{b}.$$

Значения Π_i определяются с помощью метода итерации.

Таким образом, для обеспечения минимума потребления электроэнергии в процессе производства готовой продукции необходимо выполнять условия, записанные в виде (6)–(8).

В частных случаях, т. е. с учетом всех условий, приведенных в (8), получаем:

$$\left. \begin{aligned} w_n &= -\lambda_j, \quad i \in N \\ \Pi - \sum_{i=1}^n \Pi_j &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Это означает, что при сохранении баланса готовой продукции равенство относительного прироста расхода электроэнергии j -го цеха при производстве продукции Π за рассматриваемый период является критерием минимального потребления электроэнергии.

Для подтверждения сформулированных выше выводов рассмотрена задача обеспечения минимального расхода электроэнергии на производство продукции на ППНХП в течение отчетного периода по подразделениям предприятия (по цехам). Коэффициенты, определенные по уравнениям (2) и (3), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты, характеризующие расход электроэнергии по подразделениям предприятия (по цехам), определенные по уравнениям (2) и (3)

Table 1. Coefficients, characterizing electrical power consumption by divisions of the enterprise (by workshops), determined according to equations (2) and (3)

Подразделения (цех)/Divisions (workshop)	a_0	a_1
№ 1	3,0092	0,0041
№ 2	3,0067	0,0043
№ 3	2,9663	0,0043

Введен ряд ограничений в соответствии с уравнениями (6) и (7):

- по балансу готовой продукции, произведённой предприятием за год:

$$\sum_{k=1}^{IV} \Pi_j = \Pi_1' + \Pi_2' + \Pi_3' + \dots + = 854;$$

- плановые обязательства по объему производимой продукции, принятые предприятием (табл. 2).
- ограничения по максимальному и минимальному объемам продукции, произведённой в цехах предприятия по кварталам имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{цех № 1:} & \quad 67 \leq \Pi_1 \leq 81 \\ \text{цех № 2:} & \quad 69 \leq \Pi_2 \leq 82 \\ \text{цех № 3:} & \quad 65 \leq \Pi_3 \leq 75. \end{aligned}$$

Таблица 2. Плановые значения выпуска готовой продукции ППНХП

Table 2. Planned output values of finished products of the industrial enterprises of continuous production (IECP)

Кварталы/Quarters	1	2	3	4	Сумма/Total
$\Pi_{\text{план, т}}/\Pi_{\text{plan, t}}$	210	241	201	202	854

Здесь граничные условия для каждого цеха заранее заданы руководством предприятия, а минимальные и максимальные значения определяются спецификой технологического процесса. Например, сокращение производства до минимального значения нецелесообразно с экономической точки зрения, а увеличение его выше максимального значения ограничено возможностями предприятия (или цеха).

Ежеквартальный план по выпуску продукции и соответствующая ему потребляемая электроэнергия приведены в табл. 3.

Таблица 3. Ежеквартальный план производства продукции и потребление электроэнергии предприятием

Table 3. Quarterly plan for production and electrical power consumption by the enterprise

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
Объем произведенной продукции, $\Pi_{\text{план, т}}$ Volume of produced products, $\Pi_{\text{plan, t}}$	210	241	201	202	854
Расход электроэнергии на производство продукции, $W_{\text{план, } 10^4 \cdot \text{кВт}\cdot\text{ч}}$ Electrical power consumption for production, $W_{\text{plan, } 10^4 \cdot \text{kW}\cdot\text{h}}$	81,69	93,749	78,189	78,578	332,21

Поквартальное изменение в течение года потребления электроэнергии и объема произведенной продукции на предприятии чёрной металлургии с непрерывным характером производства показано в табл. 4.

Видно, что при незначительном изменении объема производимой продукции в течение года наблюдаются значительные изменения объема потребленной электроэнергии. При сохранении годового объема готовой продукции минимальное потребление электроэнергии в месяц составляет $324,03 \cdot 10^6$ кВт·ч, а различие между плановым и оптимальным годовым потреблением электроэнергии составляет $8,176 \cdot 10^6$ кВт·ч. Годовое потребление электроэнергии уменьшается на 2,5 % при сохранении объемов производства продукции, т. е.

условия ограничения по максимальному и минимальному объемам продукции, произведённой в цехах предприятия за год по кварталам в разрезах цехов, выполняются. Результаты исследования подтверждают адекватность предложенной модели.

Таблица 4. *Поквартальное изменение выпуска готовой продукции и потребления электроэнергии*

Table 4. *Quarterly changes in finished product output and electrical power consumption*

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
$P_{\text{план}}, \text{т}/P_{\text{план}}, \text{t}$	210	241	201	202	854
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптим.}}, \text{t}$	205	238	201	210	854
Разница в объемах произведенной продукции, т Difference in volume of products, t	5	3	0	-8	0
$W_{\text{план}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{план}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	81,69	93,749	78,189	78,578	332,21
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	80,01	83,84	79,57	80,61	324,03
Разница в объемах потребления ЭЭ, $10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ Difference in electrical power consumption volumes, $10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	1,68	9,909	-1,381	-2,032	8,176

Результаты подобного сравнения, но в разрезе цехов (на примере трех цехов), приведены в табл. 5.

Таблица 5. *Изменение по кварталам выпуска готовой продукции и потребления электроэнергии в разрезе цехов*

Table 5. *Quarterly changes in the output of finished products and electrical power consumption by workshop division*

Подразделения (цехи) Divisions (workshops)	Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
№ 1	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	70	81	67	69	287
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	27,01	28,26	26,68	26,90	109
№ 2	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	69	82	69	75	295
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	27,21	28,77	27,21	27,92	111
№ 3	$P_{\text{оптимал.}}, \text{т}$ $P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	66	75	65	66	272
	$W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	25,79	26,81	25,68	25,79	104

В табл. 6 достоверность полученных результатов и сделанных на их основе выводов подтверждена сравнением с результатами, полученными методом отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных [24, 25].

Таблица 6. *Сравнение полученных результатов методом отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных*

Table 6. *Comparison of results obtained by the method of finding the relative extremum of functions of several variables*

Кварталы Quarters	1	2	3	4	Сумма Total
Результаты, полученные разработанным авторами методом Results obtained by the method developed by the authors					
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	204	238	202	210	854
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	80,01	83,84	79,57	80,61	324,03
Результаты, полученные методом, предложенным в [24, 25] Results obtained by the method proposed in [24, 25]					
$P_{\text{оптим.}}, \text{т}/P_{\text{оптимал.}}, \text{t}$	205	238	201	210	854
$W_{\text{оптим.}}, 10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ $W_{\text{оптимал.}}, 10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	79,86	83,84	80,52	80,61	324,83
Разница в объемах потребления ЭЭ, $10^4 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$ Difference in electrical power consumption volumes, $10^4 \cdot \text{kW} \cdot \text{h}$	0,15	0	-0,95	0	-0,8

Заключение

Решена задача минимизации потребления электроэнергии на основе математической модели и градиентного метода в условиях оптимального планирования объема продукции, выпускаемой на ППНХП. При разработке математической модели, учитывающей характер технологического процесса и граничные условия в простой и интегральной форме, выявлена целесообразность оптимального планирования электропотребления предприятием.

На основе проведенных расчетно-экспериментальных исследований установлено, что предложенная математическая модель является адекватной, так как обеспечивает минимум потребления электроэнергии. При учете различных видов ограничений она обладает высокими вычислительными качествами. При этом оптимальный объем выпускаемой продукции относится к определенному отрезку времени (месяц, год) при условии строгого соблюдения требований технологического процесса.

Адекватность разработанной модели подтверждена на примере работы металлургического предприятия. При этом выявлено условие минимального потребления электроэнергии. Результаты расчетов по предложенной методике и с применением метода отыскания относительного экстремума функций нескольких переменных практически совпали. Использование на практике предложенного

авторами метода позволяет сократить годовое электропотребление на $8,176 \cdot 10^6$ кВт·ч, что составит 2,5 % от суммарного объема. Естественно, что при этом должны учитываться основные факторы,

влияющие на потребление электроэнергии на данном конкретном промышленном предприятии, а также граничные условия в простой и интегральной форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zharov V., Tokarenko A. Quantitative assessment of sustainability level of industrial enterprises // *BIO Web of Conferences Aquaculture-2023*. – 2023. – Vol. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405003> (дата обращения 15.09.2023).
2. Zakharchenko N., Kosaretskyi Y., Andreichenko A. Methodical provision of assessment of the efficiency of the functioning of a high-tech industrial enterprise on the basis of score-coefficient method // *Economic Innovations*. – 2023. – Vol. 25. – № 87. – P. 18–26. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2023.25.2> (дата обращения 15.09.2023).
3. Gayibov T., Reymov K. Optimal planning of short-term modes of power systems with control of loads of electric consumers and taking into account of network factor // *European Science Review*. – 2017. – Vol. 3. – № 9–10. – P. 86–91.
4. Dinolov O. Energy efficiency of induction motor drives: state of the art, analysis and recommendations // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 7136. URL: <https://doi.org/10.3390/en162071-36> (дата обращения 15.09.2023).
5. Shinkevich A.I. Modeling the efficiency of using digital technologies of energy and resource saving technologies at petrochemical enterprises // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2020. – Vol. 10 (5). – P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.9837> (дата обращения 15.09.2023).
6. Yepifanova I.Yu., Dzhedzhula V.V. Modelling of potential level of industrial enterprises // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. – 2022. – Vol. 17. – P. 556–565.
7. The effect of electricity distribution loos, electricity power consumption, electricity intensity on energy consumption in West Africa / A. Mohammed, S. Ismail, F. Roslan, A. Ahmad // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2022. – Vol. 12. – № 5. – P. 361–369. URL: <https://doi.org/10.32479/ijeep.13386> (дата обращения 15.09.2023).
8. Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 236. – P. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245
9. Гофман И.В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий. – СПб.: Энергия, 1966. – 319 с.
10. Dzhedzhula V., Yepifanova I. Optimization of energy saving potential of industrial enterprises // *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. – 2021. – P. 433–436. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548428.
11. Energy-efficient field-oriented control for induction motors taking into account core losses / G. Khoury, R. Ghosn, F. Khatounian, M. Fadel, M. Tientcheu // *Proceedings of the 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control*. – Budapest, Hungary, 2018. – P. 543–548.
12. Mokin O., Budak B., Kryvonis O. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters // *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. – 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100504>
13. Maryasin O.Y. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise // *4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency-2022*. – Lipetsk, Russian Federation, 2022. – P. 808–813. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973902.
14. Novel sampling-based optimal motion planning algorithm for energy-efficient robotic pick and place / M.M. Alam, T. Nishi, Z. Liu, T.A. Fujiwara // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 6910. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/en16196910> (дата обращения 15.09.2023).
15. Maryasin O. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise. – 2022. – P. 808–813. URL: <https://doi.org/10.1109/SUMMA57301.2022.9973902> (дата обращения 15.09.2023).
16. Chang S.C. Effects of financial developments and income on energy consumption // *International Review of Economics and Finance*. – 2015. – Vol. 35. – P. 28–40. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iref.2014.08.011> (дата обращения 15.09.2023).
17. Соколов В.К. Задачи оперативной оптимизации производства электроэнергии в условиях рыночных отношений // *Электричество*. – 2007. – № 1. – С. 2–9.
18. Валь П.В., Попов Ю.П. Концепция разработки системы прогнозирования электропотребления промышленного предприятия в условиях оптового рынка // *Промышленная энергетика*. – 2011. – № 10. – С. 31–35.
19. Арендателева С.И. Математическое моделирование производственного планирования на малом предприятии // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Прикладная математика»*. – 2010. – № 2 (17). – С. 97–109.
20. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбанов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 125–133. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407
21. Рахмонов И.У., Реймов К.М. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2019. – № 62 (6). – С. 528–535. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535> (дата обращения 15.09.2023).
22. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry // *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
23. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks // *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
24. Method of integral gradients for searching global extremum of multivariable functions (procedure improvement) / V. Shmukler, V. Babaev, L. Kovalenko, O. Kalmykov, I. Demianenko // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 807. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (дата обращения 15.09.2023).

25. Doroshenko D., Bilichenko R. Understanding of the main ideas and logical reasoning when studying the sequence limit section // Collection of Scientific Papers ЛОГОС. – 2022. – P. 97–100. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-16.09.2022.26> (дата обращения 15.09.2023).

Информация об авторах

Икромжон Усмонович Рахмонов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электро-снабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. ilider1987@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Василий Яковлевич Ушаков, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vyush@tpu.ru

Айсулу Махмудовна Нажимова, доктор философии по техническим наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдилова, 1. a_najimova@karsu.uz; <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Камолиддин Комилович Обидов, заместитель декана по работе с молодежью гидромелиоративного факультета, Бухарский институт управления природными ресурсами национального исследовательского университета Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Узбекистан, 200100, г. Бухара, шоссе Газлийское, 32. fedika1@mail.ru

Сейдамет Ришадович Сулейманов, директор, Научно-производственная компания КазТехАвтоматика, Казахстан, 101400, г. Темиртау, ул. Сейфуллина, 11. seidamet.s@gmail.com

Поступила в редакцию: 05.10.2023

Поступила после рецензирования: 20.02.2024

Принята к публикации: 14.03.2024

REFERENCES

1. Zharov V., Tokarenko A. Quantitative assessment of sustainability level of industrial enterprises. *BIO Web of Conferences AQUACULTURE-2023*. Vol. 05003. Available at: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405003> (accessed 15 September 2023).
2. Zakharchenko N., Kosaretskyi Y., Andreichenko A. Methodical provision of assessment of the efficiency of the functioning of a high-tech industrial enterprise on the basis of score-coefficient method. *Economic Innovations*, 2023, vol. 25, no. 87, pp. 18–26. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.31520/ei.2023.25.2> (accessed 15 September 2023).
3. Gayibov T., Reymov K. Optimal planning of short-term modes of power systems with control of loads of electric consumers and taking into account of network factor. *European Science Review*, 2017, vol. 3, no. 9–10, pp. 86–91.
4. Dinolov O. Energy efficiency of induction motor drives: state of the art, analysis and recommendations. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 7136. Available at: <https://doi.org/10.3390/en162071-36> (accessed 15 September 2023).
5. Shinkevich A.I. Modeling the efficiency of using digital technologies of energy and resource saving technologies at petrochemical enterprises. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020, vol. 10 (5), pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.32479/ijeep.9837> (accessed 15 September 2023).
6. Yepifanova I.Yu., Dzhedzhula V.V. Modelling of potential level of industrial enterprises. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2022, vol. 17, pp. 556–565.
7. Mohammed A., Ismail S., Roslan F., Ahmad A. The effect of electricity distribution loos, electricity power consumption, electricity intensity on energy consumption in West Africa. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2022, vol. 12 (5), pp. 361–369. Available at: <https://doi.org/10.32479/ijeep.13386> (accessed 15 September 2023).
8. Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 245–248. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.245
9. Goffman I.V. *Rationing of energy consumption and energy balances of industrial enterprises*. Moscow, Energiya Publ., 1966. 319 p. (In Russ.).
10. Dzhedzhula V., Yepifanova I. Optimization of energy saving potential of industrial enterprises. *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, 2021. pp. 433–436. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548428.
11. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. Energy-efficient field-oriented control for induction motors taking into account core losses. *Proc. of the 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control*, 2018. pp. 543–548.
12. Mokin O., Mokin B., Kryvonis O. Synthesis of mathematical models for one class of electromechanical systems with variable parameters. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100504>
13. Maryasin O.Y. Two-stage problem of optimizing smart grid energy consumption at the enterprise. *4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency-2022*. pp. 808–813. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973902.
14. Alam M.M., Nishi T., Liu Z., Fujiwara T. A Novel sampling-based optimal motion planning algorithm for energy-efficient robotic pick and place. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 6910, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16196910> (accessed 15 September 2023).
15. Maryasin O.Yu., Lukashov A.I. Optimizing the daily energy consumption of an enterprise. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, vol. 857, pp. 370–382.

16. Chang S.C. Effects of financial developments and income on energy consumption. *International Review of Economics and Finance*, 2015, vol. 35, pp. 28–40. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iref.2014.08.011> (accessed 15 September 2023).
17. Sokolov V.K. Problems of operational optimization of electricity production in conditions of market relations. *Electricity*, 2007, no. 1, pp. 2–9. (In Russ.).
18. Val P.V., Popov Yu.P. Concept for developing a system for forecasting power consumption of an industrial enterprise in the conditions of the wholesale market. *Industrial Energy*, 2011, no. 10, pp. 31–35. (In Russ.).
19. Arendateleva S.I. Mathematical modeling of production planning in a small enterprise. *Bulletin of Tver State University. Series "Applied Mathematics"*, 2010, no. 2 (17), pp. 97–109. (In Russ.).
20. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Forecasting electricity consumption by LSTM neural network. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 125–133. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4407> (accessed 15 September 2023).
21. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Mathematical models and algorithms of optimal load management of electricity consumers. *Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 528–535. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535> (accessed 15 September 2023).
22. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry. *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
23. Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. Optimization of complex parameters of urban distribution electric networks. *Journal of Physics: Conference Series. APITECH-2019*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055046.
24. Shmukler V., Babaev V., Kovalenko L., Kalmykov O., Demianenko I. Method of integral gradients for searching global extremum of multivariable functions (procedure improvement). *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, vol. 807. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_7 (accessed 15 September 2023).
25. Doroshenko D., Bilichenko R. Understanding of the main ideas and logical reasoning when studying the sequence limit section. *Collection of Scientific Papers ΛΟΓΟΣ*, 2022, pp. 97–100. Available at: <https://doi.org/10.36074/logos-16.09.2022.26> (accessed 15 September 2023).

Information about the authors

Ikromjon U. Rakhmonov, Dr. Sc., Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan. ilider1987@asu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vyush@tpu.ru

Aysulu M. Najimova, PhD, Associate Professor, Karakalpak State University, 1, Ch. Abdirrov street, Nukus, 230100, Uzbekistan. a_najimova@karsu.uz; <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Kamoliddin K. Obidov, Associate Dean on Working with Youth, "TIAME" NRU Bukhara Institute of Natural Resources Management, 32, Gazli highway, Bukhara, 200100, Uzbekistan. Fedika1@mail.ru

Seidamet R. Suleimanov, Postdoctoral Student, Director of the Research and Production Company KazTechAutomatics, 11, Seifullin street, Temirtau, 101400, Kazakhstan. seidamet.s@gmail.com

Received: 05.10.2023

Revised: 20.02.2024

Accepted: 14.03.2024