



Ishlab chiqarish yuklamasini optimal qayta taqsimlash sanoat korxonasining elektr energiyasi iste'molini minimallashtirish usuli sifatida

Ikromjon U. Rakhmonov¹, Aysulu M. Najimova²

¹) DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; ilider1987@yandex.com <https://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

²) PhD, dotsent, Qoraqalpoq davlat universiteti, Nukus, 230100, O'zbekiston najimova_a@mail.ru <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Dolzarbli: sanoat korxonalarida elektr energiyasi iste'molini asosiy elektr qabul qiluvchilarning ishlashini bevosita cheklash hisobiga kamaytirish har doim ham maqsadga muvofiq emas, chunki bu texnologik jarayonning buzilishiga va ishlab chiqarish unumdorligining pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, boshqaruvning oqilona yo'nalishlaridan biri belgilangan mahsulot ishlab chiqarish hajmini saqlab qolgan holda ishlab chiqarish va unga mos elektr yuklamalarini texnologik bo'linmalar o'rtasida optimal ravishda qayta taqsimlashdan iborat.

Ushbu masalani hal etish uchun bo'linmalarining ishlab chiqarish unumdorligi bilan elektr energiyasining tegishli sarfi o'rtasidagi miqdoriy bog'liqlikni aniqlash, shuningdek, texnologik va elektrotexnik cheklovlarni hisobga olish zarur.

Maqsad: Sanoat korxonasining belgilangan mahsulot ishlab chiqarish hajmini saqlab qolish va o'rnatilgan texnologik cheklovlariga rioya qilish sharti bilan jami elektr energiyasi iste'molini minimallashtirishni ta'minlaydigan ishlab chiqarish yuklamasini optimal qayta taqsimlashning matematik modelini shakllantirish.

Usullar: Tadqiqot ishida ishlab chiqarish-energetika tizimini matematik formallashtirish, solishtirma elektr energiyasi iste'molini mahsulot ishlab chiqarish hajmining funksiyasi ko'rinishida ifodalash, ishlab chiqarish bo'linmalarining energetik xarakteristikasini eksponensial approksimatsiya qilish, ishlab chiqarish yuklamasining optimal taqsimotini aniqlash uchun Lagranj usuli va statsionarlik shartlaridan foydalanish kabi usullar qo'llanilgan. Aktiv cheklovlar mavjud bo'lgan hollarda ishlab chiqarish yuklamasi tegishli texnologik chegara qiymatida qat'iy belgilanadi, yuklamaning qolgan qismi esa boshqa ishlab chiqarish bo'linmalari o'rtasida optimal ravishda qayta taqsimlanadi.

Natijalar: Jami elektr energiyasi iste'molini minimallashtirish masalasining matematik qo'yilishi mahsulot ishlab chiqarishning belgilangan umumiy hajmini majburiy ravishda saqlab qolish sharti bilan olindi. Hisoblash umumiy ishlab chiqarish hajmi 3000 t bo'lgan uchta ishlab chiqarish liniyasi uchun, har bir liniyaning ruxsat etilgan ishlab chiqarish unumdorligi 850-1150 t oralig'ida bo'lishi sharti bilan amalga oshirildi. Dastlabki rejimda yuklama teng taqsimlangan: $1000+1000+1000=3000$ t. Optimallashtirish natijasida $1140+850+1010=3000$ t taqsimot olindi. Bunda jami elektr energiyasi iste'moli 2797136 dan 2743655 kVt-soatgacha kamaydi, mutlaq kamayish esa 53481 kVt-soatni tashkil etdi.

Kalit so'zlar: elektr energiyasi iste'moli, ishlab chiqarish yuklamasi, matematik model, optimallashtirish, ishlab chiqarish dasturi, solishtirma elektr energiyasi iste'moli, energetik xarakteristika, Lagranj usuli, texnologik cheklovlar

For citation: I.U. Rakhmonov, A.M.Najimova. Optimal redistribution of production load as a method for minimizing electricity consumption in an industrial enterprise. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 124-131.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23219410>

Received: 15.02.2026

Revised: 17.03.2026

Accepted: 11.04.2026

Published: 25.09.2026

Copyright: © Ikromjon U. Rakhmonov, Aysulu M. Najimova 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Оптимальное перераспределение производственной нагрузки как метод минимизации электропотребления промышленного предприятия

Икромжон У. Рахмонов¹, Айсулу М. Нажимова²

¹) DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; ilider1987@yandex.com <https://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

²) PhD, доцент, Каракалпакский государственный университет, Нукус, 230100, Узбекистан najimova_a@mail.ru <https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Актуальность: для промышленных предприятий снижение электропотребления непосредственно за счёт ограничения работы основных электроприёмников не всегда является допустимым, поскольку может привести к нарушению технологического процесса и снижению производительности. В связи с этим рациональным направлением управления является оптимальное перераспределение производственной и соответствующей ей электрической нагрузки между технологическими подразделениями при сохранении заданного объёма выпуска продукции. Для решения данной задачи необходимо установить количественную взаимосвязь между производительностью подразделений и соответствующим расходом электрической энергии, а также учитывать технологические и электротехнические ограничения.

Цель: формирование математической модели оптимального перераспределения производственной нагрузки промышленного предприятия, обеспечивающей минимизацию суммарного электропотребления при сохранении заданного объёма выпуска продукции и выполнении установленных технологических ограничений.

Методы: в работе использованы математическая формализация производственно-энергетической



системы, представление удельного электропотребления в виде функции объёма выпуска продукции, экспоненциальная аппроксимация энергетической характеристики производственных подразделений, метод Лагранжа и условия стационарности для определения оптимального распределения производственной нагрузки. При наличии активных ограничений производственная нагрузка фиксируется на соответствующей технологической границе, а оставшаяся часть нагрузки перераспределяется между другими подразделениями.

Результаты: получена математическая постановка задачи минимизации суммарного электропотребления при обязательном сохранении заданного суммарного объёма выпуска продукции. Расчёт выполнен для трёх производственных линий при общем объёме выпуска 3000 т и диапазоне допустимой производительности 850-1150 т для каждой линии. В исходном режиме нагрузка распределена равномерно: $1000+1000+1000=3000$ т. В результате оптимизации получено распределение $1140 + 850 + 1010 = 3000$ т. При этом суммарное электропотребление уменьшилось с 2797136 до 2743655 кВт·ч, а абсолютное снижение составило 53481 кВт·ч.

Ключевые слова: электропотребление, производственная нагрузка, математическая модель, оптимизация, производственная программа, удельное электропотребление, энергетическая характеристика, метод Лагранжа, технологические ограничения.

Optimal redistribution of production load as a method for minimizing electricity consumption in an industrial enterprise

Ikromjon U. Rakhmonov¹, Aysulu M. Najimova²

¹⁾ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; ilider1987@yandex.com
<https://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

²⁾ PhD, associate professor, Karakalpak State University, Nukus, 230100, Uzbekistan najimova_a@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-7336-8362>

Relevance: for industrial enterprises, reducing electricity consumption directly by limiting the operation of major electrical loads is not always permissible, as it may disrupt the technological process and reduce productivity. In this regard, a rational approach to management is the optimal redistribution of production and the corresponding electrical load among technological units while maintaining the specified production output. To address this task, it is necessary to establish a quantitative relationship between the productivity of the units and the corresponding electrical energy consumption, while also taking technological and electrical constraints into account.

Aim: formation of a mathematical model for the optimal redistribution of the production load of an industrial enterprise, ensuring the minimization of total electricity consumption while maintaining the specified production output and complying with established technological constraints.

Methods: the study employs mathematical formalization of the production-energy system, representation of specific electricity consumption as a function of production output, exponential approximation of the energy characteristics of production units, the Lagrange multiplier method, and stationarity conditions to determine the optimal distribution of the production load. When active constraints are present, the production load is fixed at the corresponding technological boundary, while the remaining portion of the load is redistributed among the other units.

Results: a mathematical formulation of the problem of minimizing total electricity consumption while maintaining the specified total production output was obtained. The calculation was performed for three production lines with a total production volume of 3,000 t and an allowable productivity range of 850–1,150 t for each line. In the initial mode, the load was distributed evenly: $1,000 + 1,000 + 1,000 = 3,000$ t. As a result of the optimization, the distribution obtained was $1,140 + 850 + 1,010 = 3,000$ t. At the same time, total electricity consumption decreased from 2,797,136 to 2,743,655 kWh, with an absolute reduction of 53,481 kWh.

Keywords: electricity consumption, production load, mathematical model, optimization, production program, specific electricity consumption, energy characteristic, Lagrange method, technological constraints.

1. Введение (Introduction)

Для математической формализации производственно-энергетического режима промышленного предприятия необходимо установить взаимосвязь электрического режима с производственной программой. В производстве последовательные технологические стадии различаются по энергоёмкости и допустимой загрузке оборудования, вследствие чего при управлении режимом необходимо одновременно учитывать производственные, технологические и электрические параметры [1-2].

Снижение электропотребления промышленного предприятия за счёт непосредственного ограничения работы основных электроприёмников не всегда является допустимым, поскольку такой подход может привести к нарушению технологического процесса и снижению производительности. Более рациональным является перераспределение производственной и соответствующей ей электрической нагрузки между отдельными подразделениями в пределах технологически допустимых режимов.

В основе предлагаемого подхода рассматривается взаимосвязь объёма электропотребления с количеством выпускаемой продукции. На основе статистической информации о производительности и соответствующем расходе электрической энергии определяются



энергетические характеристики отдельных производственных подразделений, которые в дальнейшем используются при оптимизации производственно-энергетического режима. Основная задача заключается в определении такого распределения производственной нагрузки между отдельными подразделениями, при котором заданный объём производства обеспечивается при минимальном суммарном расходе электрической энергии [4-6].

2. Материалы и методы (Methods and materials)

Состояние производственно-энергетической системы представляется вектором, включающим производственные и электрические параметры. В качестве основных производственных переменных рассматриваются производительность $G_i(t)$, коэффициент загрузки оборудования $K_{3,i}(t)$ и совокупность технологических параметров $Z_{tex,i}(t)$. К электрическим параметрам относятся активная мощность $P_i(t)$, реактивная мощность $Q_i(t)$, напряжение $U(t)$, ток $I(t)$ и коэффициент мощности $\cos\varphi(t)$.

Активная мощность отдельного подразделения определяется зависимостью:

$$P_i(t) = F_i \left[G_i(t), K_{3,i}(t), U(t), \cos\varphi(t), Z_{tex,i}(t), F_{BH}(t) \right] + \varepsilon_i(t); \quad (1)$$

где F_i -функциональная зависимость электрического режима от производственных, технологических и электрических факторов; $F_{BH}(t)$ - внешние воздействия; $\varepsilon_i(t)$ - составляющая, учитывающая погрешность модели [3].

За расчётный интервал T суммарное электропотребление определяется выражением:

$$W_{\Sigma} = \int_0^T P_{\Sigma}(t) dt = \sum_{i=1}^n W_i + W_{BSP}; \quad (2)$$

Объём продукции, произведённой i -м подразделением за тот же период, определяется как:

$$G_i = \int_0^T G_i(t) dt. \quad (3)$$

Тогда удельное электропотребление подразделения определяется отношением:

$$w_{уд,i} = \frac{W_i}{G_i}, w_{уд,\Sigma} = \frac{W_{\Sigma}}{G_{\Sigma}}, \quad (4)$$

Данный показатель характеризует энергетические затраты на единицу произведённой продукции и используется для последующего сравнения различных вариантов распределения производственной нагрузки.

Для последующей оптимизации производственная программа представляется через распределение заданного объёма продукции между подразделениями. Основное балансовое условие:

$$\sum_{i=1}^n G_i = G_{\text{пл}} = \text{const}. \quad (5)$$

Таким образом, оптимизация осуществляется не за счёт уменьшения общего объёма выпуска продукции, а за счёт допустимого перераспределения производственной нагрузки между подразделениями.

Для каждого подразделения устанавливаются допустимые объёмы производства:

$$G_i^{\min} \leq G_i \leq G_i^{\max}. \quad (6)$$

Кроме того, учитываются электротехнические ограничения по напряжению, току и коэффициенту мощности, а для последовательных технологических стадий вводится условие согласованности производительности [7-8]. Общая область допустимых решений формируется пересечением энергетических, технологических и производственных ограничений:

$$\Omega_{\text{доп}} = \Omega_{\mathcal{E}} \cap \Omega_T \cap \Omega_G. \quad (7)$$

Такая постановка исключает энергетически выгодные, но технологически или электротехнически недопустимые режимы. Основной критерий управления формулируется как:

$$W_{\Sigma}(G) = \sum_{i=1}^n W_i(G_i) \rightarrow \min. \quad (8)$$

При обязательном выполнении условия сохранения производственной программы:

$$\sum_{i=1}^n G_i = G_{\text{пл}}, \quad (9)$$

Для реализации предлагаемого подхода необходимо установить количественную связь между объёмом выпуска продукции и соответствующим расходом электрической энергии. Удельное электропотребление i -го производственного подразделения в общем виде представ-



ляется зависимостью:

$$w_{y0} = f(G_i) . \quad (10)$$

На основе производственно-энергетических данных данная зависимость может быть представлена экспоненциальной функцией:

$$w_{y0}(G_i) = \exp(a_{0i} + a_{1i}G_i) ; \quad (11)$$

где a_{0i} и a_{1i} — коэффициенты математической модели, определяемые для каждого производственного подразделения по фактическим значениям объема выпуска продукции и соответствующего удельного электропотребления.

С учетом данной зависимости расход электрической энергии отдельного подразделения определяется:

$$W_i(G_i) = G_i \cdot \exp(a_{0i} + a_{1i}G_i) . \quad (12)$$

Таким образом, каждому производственному подразделению ставится в соответствие индивидуальная энергетическая характеристика, отражающая изменение расхода электрической энергии в зависимости от его производительности. Суммарное электропотребление предприятия определяется как:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n W_i(G_i) . \quad (13)$$

Для решения задачи оптимального перераспределения производственной нагрузки при фиксированном суммарном объеме выпуска вводится функция Лагранжа:

$$L(G_1, G_2, \dots, G_n, \lambda) = \sum_{i=1}^n W_i(G_i) + \lambda \left(G_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n G_i \right) . \quad (14)$$

Необходимые условия оптимальности определяются дифференцированием функции Лагранжа по значениям производственной нагрузки и множителю Лагранжа. Отсюда следует фундаментальное условие оптимального распределения:

$$\frac{dW_i(G_i)}{dG_i} = \lambda . \quad (15)$$

Физический смысл данного условия заключается в выравнивании предельного изменения электропотребления, соответствующего изменению объема производства, между производственными подразделениями, участвующими в перераспределении нагрузки [9-10].

Для принятой экспоненциальной модели производная определяется выражением:

$$\frac{dW_i}{dG_i} = \exp(a_{0i} + a_{1i}G_i)(1 + a_{1i}G_i) . \quad (16)$$

Следовательно, оптимальные значения производственной нагрузки должны одновременно удовлетворять системе:

$$\exp(a_{0i} + a_{1i}G_i)(1 + a_{1i}G_i) = \lambda . \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n G_i = G_{\Sigma} . \quad (18)$$

Полученная система является нелинейной, поэтому определение оптимальных значений выполняется итерационным способом. После каждой итерации осуществляется проверка соответствия полученных значений установленным технологическим ограничениям. Если рассчитанное значение выходит за допустимый диапазон, оно фиксируется на соответствующей границе, а оставшаяся часть производственной нагрузки перераспределяется между другими подразделениями.

3. Результаты (Results)

Для каждой производственной линии используются индивидуальные коэффициенты энергетической характеристики, определяющие зависимость удельного электропотребления от объема выпуска продукции. Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры математической модели производственных линий

Table 1. Initial parameters of the mathematical model of production lines

Производственная линия	a_0	a_1	$G_i^{min}, \text{т}$	$G_i^{max}, \text{т}$	$G_i^{план}, \text{т}$
Линия №1	6,6	0,00012	850	1150	1000
Линия №2	6,85	0,00018	850	1150	1000
Линия №3	6,592	0,00014	850	1150	1000

Для всех трех производственных линий соблюдается технологическое ограничение:



$$850 \leq G_i \leq 1150.$$

Заданный суммарный объём выпуска продукции составляет: $G_{\Sigma} = 3000 \text{ т}$.

В исходном режиме: $G_1 = G_2 = G_3 = 1000 \text{ т}$.

Согласно математической модели, удельное электропотребление первой производственной линии определяется выражением:

$$d_1 = \exp(6,6 + 0,00012 \cdot 1000) = 828,82 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

Соответствующее электропотребление первой линии составляет:

$$W_1 = 1000 \cdot 828,82 = 828818 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Для второй производственной линии:

$$d_2 = \exp(6,85 + 0,00018 \cdot 1000) = 1130,03 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

$$W_2 = 1000 \cdot 1130,03 = 1130031 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Для третьей производственной линии:

$$d_3 = \exp(6,59136 + 0,00014 \cdot 1000) = 838,29 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

$$W_3 = 1000 \cdot 838,29 = 838287 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, суммарное электропотребление предприятия при исходном распределении производственной нагрузки составляет:

$$W_{\Sigma}^{\text{план}} = 828818 + 1130031 + 838287 = 2797136 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Полученные результаты показывают, что производственные линии обладают различной энергетической эффективностью. Наибольшим удельным электропотреблением характеризуется линия №2, тогда как линии №1 и №3 имеют более низкие энергетические затраты на единицу продукции. Следовательно, снижение суммарного электропотребления может быть достигнуто путём перераспределения части производственной нагрузки с менее энергоэффективной линии №2 на линии №1 и №3.

Решение оптимизационной задачи по выражениям (11) - (18) с учётом технологических ограничений позволило получить следующее распределение производственной нагрузки:

$$G_1^{\text{опт}} = 1140 \text{ т}, G_2^{\text{опт}} = 850 \text{ т}, G_3^{\text{опт}} = 1010 \text{ т}$$

При этом балансовое условие полностью выполняется:

$$1140 + 850 + 1010 = 3000 \text{ т}$$

Следовательно, суммарный объём выпуска продукции остаётся неизменным, а оптимизация осуществляется исключительно за счёт перераспределения производственной нагрузки между тремя технологическими линиями.

Для первой производственной линии в оптимальном режиме:

$$d_1^{\text{опт}} = \exp(6,600 + 0,00012 \cdot 1140) = 842,86 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

Соответственно:

$$W_1^{\text{опт}} = 1140 \cdot 842,86 = 960860 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Для второй производственной линии:

$$d_2^{\text{опт}} = \exp(6,850 + 0,00018 \cdot 850) = 1099,93 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

$$W_2^{\text{опт}} = 850 \cdot 1099,93 = 934939 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Для третьей производственной линии:

$$d_3^{\text{опт}} = \exp(6,59136 + 0,00014 \cdot 1010) = 839,46 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

$$W_3^{\text{опт}} = 1010 \cdot 839,46 = 847856 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, суммарное электропотребление предприятия после оптимального перераспределения производственной нагрузки составляет (табл. 2):

$$W_{\Sigma}^{\text{опт}} = 960860 + 934939 + 847856 = 2743655 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таблица 2. Результаты исходного и оптимального режимов

Table 2. Results of the initial and optimal modes

Показатель	Линия №1	Линия №2	Линия №3	Всего
$G_{\text{план}}, \text{ т}$	1000	1000	1000	3000
$G_{\text{опт}}, \text{ т}$	1140	850	1010	3000
Изменение G , т	+140	-150	+10	0
$W_{\text{план}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	828 818	1 130 031	838 287	2 797 136
$W_{\text{опт}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	960 860	934 939	847 856	2 743 655

Абсолютное снижение электропотребления определяется как:



$$\Delta W = W_{\Sigma}^{\text{план}} - W_{\Sigma}^{\text{опт}}. \quad (19)$$

После подстановки полученных значений:

$$\Delta W = 2797136 - 2743655 = 53481 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Относительное снижение электропотребления составляет:

$$\eta_w = \frac{W_{\Sigma}^{\text{план}} - W_{\Sigma}^{\text{опт}}}{W_{\Sigma}^{\text{план}}} \cdot 100\%. \quad (20)$$

Подстановка полученных значений даёт:

$$\eta_w = \frac{2797136 - 2743655}{2797136} \cdot 100\%$$

Полученный результат свидетельствует о снижении суммарного электропотребления при неизменном объёме выпуска продукции. При этом перераспределение производственной нагрузки осуществляется в пределах установленных технологических ограничений.

Для дополнительной проверки полученного решения определяются предельные значения электропотребления производственных линий, нагрузка которых находится внутри допустимой области.

Для первой линии:

$$\frac{dW_1}{dG_1} = \exp(6,600 + 0,00012 \cdot 1140)(1 + 0,00012 \cdot 1140)$$

откуда:

$$\frac{dW_1}{dG_1} \approx 958,16$$

Для третьей линии:

$$\frac{dW_3}{dG_3} = \exp(6,59136 + 0,00014 \cdot 1010)(1 + 0,00014 \cdot 1010)$$

Для третьей линии:

$$\frac{dW_3}{dG_3} \approx 958,16$$

Следовательно:

$$\frac{dW_1}{dG_{31}} \approx \frac{dW_3}{dG_3} \approx 958,16$$

что соответствует условию оптимальности для производственных линий, нагрузка которых находится внутри допустимой области. Для второй производственной линии оптимальное значение достигает установленной нижней технологической границы:

$$G_2^{\text{опт}} = G_2^{\text{мин}} = 850 \text{ т}.$$

Это обусловлено более высокими предельными энергетическими затратами второй линии по сравнению с первой и третьей линиями, вследствие чего дальнейшее перераспределение нагрузки в её сторону не обеспечивает снижения целевой функции.

Проведённые расчёты и проверка условий оптимальности подтверждают возможность формирования энергетически рационального производственного режима посредством перераспределения нагрузки между технологическими подразделениями. Полученные оптимальные значения производительности удовлетворяют установленным ограничениям и обеспечивают минимизацию целевой функции.

Таким образом, результаты расчётно-экспериментальной оценки подтверждают адекватность разработанной математической модели и возможность использования полученных оптимальных параметров для формирования управляющих воздействий в системе комплексного интеллектуального управления электропотреблением промышленного предприятия.

Результаты расчёта показывают, что различные производственные линии обладают различной энергетической эффективностью. Поэтому равномерное распределение производственной нагрузки между подразделениями не обеспечивает минимального электропотребления предприятия.

При исходном распределении 1000+1000+1000 т суммарное электропотребление составляет 2797136 кВт·ч. После применения оптимизационной процедуры нагрузка перераспределяется на уровне 1140+850+1010 т, при этом общий объём выпуска остаётся неизменным и составляет 3000 т. Одновременно суммарное электропотребление уменьшается до 2743655 кВт·ч.

Полученный результат непосредственно связан с различием энергетических характеристик производственных линий. При увеличении нагрузки на энергетически более эффективные линии и снижении нагрузки на линию с более высокими энергетическими затратами обеспечивается уменьшение целевой функции. При этом оптимизация ограничивается технологическими



возможностями оборудования, вследствие чего в рассматриваемом случае вторая линия достигает минимального допустимого значения 850 т.

Таким образом, оптимальное решение формируется не только под воздействием различий в энергетической эффективности производственных подразделений, но и с учётом их допустимых границ производительности. Именно сочетание энергетической модели и системы ограничений обеспечивает получение допустимого и одновременно энергетически рационального производственно-энергетического режима.

Сформированная математическая модель используется как основа для определения управляющего решения в системе комплексного интеллектуального управления электропотреблением. При изменении производственных или электрических параметров энергетические зависимости $W_i(G_i)$ и область допустимых решений могут уточняться, что обеспечивает адаптацию модели к текущему состоянию предприятия.

4. Заключение (Conclusion)

1. Сформирована математическая постановка задачи оптимального перераспределения производственной нагрузки промышленного предприятия, в которой суммарное электропотребление минимизируется при обязательном сохранении заданного объёма выпуска продукции и соблюдении технологических и электротехнических ограничений.

2. Установлена зависимость электропотребления производственного подразделения от объёма выпуска продукции на основе экспоненциальной энергетической характеристики $W_i(G_i) = G_i \exp(a_{0i} + a_{1i}G_i)$.

3. На основе метода Лагранжа получено условие оптимального распределения производственной нагрузки, согласно которому для внутренних оптимальных режимов предельные изменения электропотребления по объёму производства выравниваются между соответствующими производственными подразделениями.

4. Для трёх производственных линий при заданном выпуске 3000 т и ограничениях $850 \leq G_i \leq 1150$ т оптимальное распределение составило 1140, 850 и 1010 т соответственно. При этом исходное распределение 1000, 1000, 1000 т было изменено без сокращения общего объёма производства.

5. В результате оптимизации суммарное электропотребление уменьшилось с 2797136 до 2743655 кВт·ч, а абсолютное снижение составило 53481 кВт·ч. Полученный результат подтверждает возможность снижения электропотребления посредством оптимального перераспределения производственной нагрузки при неизменном объёме выпуска продукции.

6. Проверка условия оптимальности показала, что для первой и третьей линий предельные энергетические затраты в оптимальной точке совпадают приблизительно на уровне 958,16, тогда как вторая линия достигает установленной минимальной технологической границы 850 т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахмонов И. У., Нажимова А. М., Жалилова Д. А. Пахта-тўқимачилик кластери корхоналарида электр энергия истеъмолини прогностлаш: монография. – Тошкент: ТошДТУ босмахонаси, 2021. – 163 б.
2. 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. – P. 43–51. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423>
3. Рахмонов И. У., Нажимова А. М., Ниёзов Н. Н., Ушаков В. Я., Курбонов Н. Н. Прогнозирование электропотребления на основе метода главных компонент (РСА) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
4. Рахмонов И. У., Ниёзов Н. Н., Нажимова А. М., Ниматов К. Б., Ушаков В. Я., Омонов Ф. Б., Реймов К. М. Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730
5. Рахмонов И.У., Нажимова А.М., Пахта-тўқимачилик кластери корхонасининг энергетик кўрсаткичларини ҳисоблаш усулини такомиллаштириш // Science and Education in Karakalpakstan. – 2021. – № 3 (52). – С. 25–29. ISSN 2181-9203.
6. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Niyozov N. N. Prospects for the development of cotton and textile clusters in Uzbekistan // Science and Education in Karakalpakstan. – 2021. – № 3 (18). – P. 148–152. ISSN 2181-9203. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/09723958-826a-4a6a-8ce1-6ad0e81d7ee9.pdf>

7. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Niyozov N. N. Development study of the theory of forecasting electricity consumption in industrial enterprises // *Science and Education in Karakalpakstan*. – 2021. – № 4/1 (19). – P. 103–107. ISSN 2181-9203. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/4217d76c-9045-41cd-bd74-4df8fc5e441a.pdf>
8. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Kurbonov N. K., Isakulov S. D. Key measures to reduce energy consumption without compromising productivity // *Science and Education in Karakalpakstan*. – 2024. – № 2/1 (40). – P. 95–97. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/69044e48-ba3d-48a6-a210-3c15b0c5b960.pdf>
9. Rakhmonov I. U., Obidov K. K., Najimova A. M. Method and algorithm for identifying factors influencing the failure of electrical equipment // *Scientific and Technical Journal «Problems of Energy and Sources Saving»*. – Tashkent, 2024. – № 1. P. 63–69. <https://energy.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/95/47>
10. Rakhmonov I. U., Obidov K. K., Najimova A. M. The necessity of implementing energy services in cotton cleaning plants // *Scientific and Technical Journal «Problems of Energy and Sources Saving»*. – Tashkent, 2024. – № 2. – P. 73–79.

REFERENCES

1. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Jalilova D. A. Forecasting Electricity Consumption at Cotton-Textile Cluster Enterprises: Monograph. – Tashkent: Tashkent State Technical University Publishing House, 2021. – 163 p.
2. 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. – P. 43–51. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423>
3. Rakhmonov, I. U., Najimova, A. M., Niyozov, N. N., Ushakov, V. Ya., & Kurbonov, N. N. (2024). Forecasting electricity consumption based on the principal component analysis (PCA) method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335(12), 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
4. Rakhmonov, I. U., Niyozov, N. N., Najimova, A. M., Nimatov, K. B., Ushakov, V. Ya., Omonov, F. B., & Reymov, K. M. (2025). Mathematical model for reducing active power losses by reactive power regulation at enterprises with a continuous production cycle. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 336(2), 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730.
5. Rakhmonov, I. U., & Najimova, A. M. (2021). Improvement of the method for calculating energy indicators of a cotton-textile cluster enterprise. *Science and Education in Karakalpakstan*, 3(52), 25–29. ISSN 2181-9203.
6. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Niyozov N. N. Prospects for the development of cotton and textile clusters in Uzbekistan // *Science and Education in Karakalpakstan*. – 2021. – № 3 (18). – P. 148–152. ISSN 2181-9203. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/09723958-826a-4a6a-8ce1-6ad0e81d7ee9.pdf>
7. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Niyozov N. N. Development study of the theory of forecasting electricity consumption in industrial enterprises // *Science and Education in Karakalpakstan*. – 2021. – № 4/1 (19). – P. 103–107. ISSN 2181-9203. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/4217d76c-9045-41cd-bd74-4df8fc5e441a.pdf>
8. Rakhmonov I. U., Najimova A. M., Kurbonov N. K., Isakulov S. D. Key measures to reduce energy consumption without compromising productivity // *Science and Education in Karakalpakstan*. – 2024. – № 2/1 (40). – P. 95–97. <https://cdn.karsu.uz/uploads/qft-jurnal/69044e48-ba3d-48a6-a210-3c15b0c5b960.pdf>
9. Rakhmonov I. U., Obidov K. K., Najimova A. M. Method and algorithm for identifying factors influencing the failure of electrical equipment // *Scientific and Technical Journal «Problems of Energy and Sources Saving»*. – Tashkent, 2024. – № 1. P. 63–69. <https://energy.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/95/47>
10. Rakhmonov I. U., Obidov K. K., Najimova A. M. The necessity of implementing energy services in cotton cleaning plants // *Scientific and Technical Journal «Problems of Energy and Sources Saving»*. – Tashkent, 2024. – № 2. – P. 73–79.