

УДК 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Шифр специальности ВАК: 05.14.01

Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства

И.У. Рахмонов^{1✉}, Н.Н. Ниёзов¹, К.Б. Ниматов², В.Я. Ушаков³,
Ф.Б. Омонов⁴, К.М. Реймов⁵, А.М. Нажимова⁵

¹ Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент

² Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан, г. Карши

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

⁴ Термезский инженерно-технологический институт, Узбекистан, г. Термез

⁵ Каракалпакский государственный университет, Узбекистан, г. Нукус

✉ ilider1987@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена математическая модель регулирования величины реактивной мощности для снижения потерь активной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства. Приведены основные теоретические положения, математический аппарат и результаты, полученные в ходе исследования. Анализируется влияние оптимизации величины реактивной мощности на общую эффективность электропотребления предприятия, предлагаются практические рекомендации по внедрению разработанной модели в производственные процессы.

Актуальность. Непрерывные производственные процессы особенно чувствительны к стабильности и надежности электроснабжения, а также к качеству поставляемой электроэнергии. Для промышленных предприятий с непрерывным циклом производства характерна высокая энергоемкость процессов, снизить которую можно за счет регулирования величины реактивной мощности, вследствие чего уменьшаются потери активной мощности, повысится общая эффективность использования энергии, снизятся производственные издержки, улучшатся экологические показатели. **Цель.** Разработка и апробация математической модели, предназначенной для снижения потерь активной мощности с помощью регулирования величины реактивной мощности на предприятиях с непрерывным циклом производства. Исследование направлено на выявление оптимальных параметров и условий регулирования величины реактивной мощности, которые обеспечат минимальные потери электроэнергии и максимальную эффективность работы электрооборудования. **Методы.** При разработке математической модели применены классические методы оптимизации Лагранжа. На их основе выполнен анализ текущего состояния управления величиной реактивной мощности, а также разработана математическая модель, учитывающая специфику непрерывного производства. Модель включает в себя уравнения баланса мощностей, ограничения по параметрам оборудования и режимам работы предприятия. Для нахождения оптимальных значений реактивной мощности используются методы оптимизации, такие как линейное и нелинейное программирование. **Результаты.** Разработана математическая модель, учитывающая особенности непрерывных производственных процессов и позволяющая оптимизировать распределение величины реактивной мощности. Экспериментальные исследования показали, что применение разработанной модели приводит к значительному снижению потерь активной мощности, увеличению коэффициента мощности и снижению общих энергетических затрат предприятия. Практическая реализация предложенных методов позволила сократить потери активной мощности примерно на 25 % в зависимости от условий производства.

Ключевые слова: технологический процесс, электропотребление, продукция, оптимизация, минимизация, функциональные ограничения, математическая модель, планирование, реактивная мощность

Для цитирования: Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, Н.Н. Ниёзов, К.Б. Ниматов, В.Я. Ушаков, Ф.Б. Омонов, К.М. Реймов, А.М. Нажимова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

UDC 621.310.311

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Mathematical model for reducing active power losses by regulating reactive power at enterprises with continuous production mode

I.U. Rakhmonov^{1✉}, N.N. Niyozov¹, K.B. Nimatov², V.Ya. Ushakov³,
F.B. Omonov⁴, K.M. Reymov⁵, A.M. Najimova⁵

¹ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

² Karshi Engineering and Economics Institute, Karshi, Uzbekistan

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

⁴ Termez Institute of Engineering and Technology, Termez, Uzbekistan

⁵ Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

✉ ilider1987@yandex.ru

Abstract. The article presents a mathematical model for reducing active power losses at enterprises with continuous production mode by regulating the magnitude of reactive power. The main theoretical principles, mathematical framework, and results obtained during the study are provided. The authors have analyzed the impact of optimizing the magnitude of reactive power on the overall efficiency of the enterprise power consumption, and proposed practical recommendations for implementing the developed model into production processes. **Relevance.** Continuous production mode is particularly sensitive to the stability and reliability of power supply, as well as the quality of the supplied electricity. Industrial enterprises with continuous production mode are characterized by high energy consumption, which can be reduced by regulating the magnitude of reactive power. This, in its turn, reduces active power losses, increases overall energy efficiency, lowers production costs, and improves environmental performance. **Aim.** To develop and test a mathematical model aimed at reducing active power losses by regulating the magnitude of reactive power at enterprises with continuous production mode. The research focuses on identifying optimal parameters and conditions for regulating reactive power that will ensure minimal energy losses and maximum efficiency of electrical equipment. **Methods.** The development of the mathematical model employs classical Lagrangian optimization methods. Based on these methods, the authors performed an analysis of the current state of reactive power management, and developed a mathematical model, taking into account the specifics of continuous production. The model includes power balance equations, equipment parameter constraints, and operational modes of the enterprise. Optimization techniques such as linear and nonlinear programming are used to determine the optimal values of reactive power. **Results.** The authors developed the mathematical model that takes into account the features of continuous production processes and allows for the optimization of reactive power distribution. Experimental studies shown that the application of the developed model leads to a significant reduction in active power losses, an increase in the power factor, and a reduction in the enterprise overall energy costs. Practical implementation of the proposed methods resulted in a reduction of active power losses by approximately 25%, depending on the production conditions.

Keywords: technological process, electricity consumption, production, optimization, minimization, functional constraints, mathematical model, planning, reactive power

For citation: Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Nimatov K.B., Ushakov V.Ya., Omonov F.B., Reymov K.M., Najimova A.M. Mathematical model for reducing active power losses by regulating reactive power at enterprises with continuous production mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730

Введение

Снижение потерь активной мощности в электрических сетях является одной из ключевых задач для промышленных предприятий, в особенности с непрерывным циклом производства, таких как металлургические заводы, хлопкоочистительные комплексы и химические предприятия. Эти предприятия потребляют значительные объемы электроэнергии, и даже небольшая доля ее потерь может приводить к значительным финансовым убыт-

кам и снижению эффективности производства. Суточные колебания реактивной мощности создают на таких предприятиях сложности в обеспечении энергетического баланса и увеличивают потери активной мощности, снижая эффективность потребления ими электроэнергии.

Управление реактивной мощностью – один из эффективных способов снижения потерь активной мощности. Как известно, реактивная мощность не выполняет полезной работы, но необходима для

поддержания напряжения в сети и обеспечения нормального функционирования электрооборудования. Однако избыток или недостаток реактивной мощности может приводить к значительным потерям активной мощности из-за повышенного тока в сети.

Управление величиной генерации/потребления реактивной мощности позволяет не только снизить потери активной мощности, но и улучшить качество электроэнергии, снизить нагрузку на оборудование и увеличить срок его службы. В современных условиях, когда энергетическая эффективность и экономия ресурсов становятся все более важными, разработка и внедрение математических моделей для управления величиной реактивной мощности на промышленных предприятиях является актуальной задачей [1–7].

Математический аппарат для создания модели

Потребление электроэнергии на предприятиях состоит из двух основных составляющих: а) постоянная составляющая потребления электроэнергии W_0 , не зависящая от основного технологического процесса и включающая расход электроэнергии на освещение, отопление, вентиляцию; б) расход электроэнергии $W_{\text{тех}}$, зависящий от основного технологического процесса. Очевидно, что общее потребление электроэнергии предприятием равно:

$$W = W_0 + W_{\text{тех}}. \quad (1)$$

Соответственно, расходы на оплату электроэнергии также состоят из двух частей:

$$Z = Z_0 + Z_{\text{тех}}, \quad (2)$$

где Z_0 и $Z_{\text{тех}}$ – соответственно, стоимость электроэнергии, не зависящей от основного технологического процесса, и стоимость электроэнергии, потребляемой для обеспечения основного технологического процесса, р. (или другие денежные единицы).

Очевидно, что Z_0 при расчете затрат можно принять постоянной. Эти затраты не зависят не от объема и качества продукции, а от энергосберегающего или энергорасточительного поведения персонала предприятия. Основные затраты зависят от стоимости энергоресурсов, технологического уровня предприятия и стоимости запускаемого оборудования (устройств) – $Z_{\text{тех}}$. Следовательно, величина $Z_{\text{тех}}$ зависит от производственной культуры на предприятии. Таким образом, целью управления потреблением электроэнергии на предприятиях является минимизация потребления как в основном технологическом процессе, так и для обеспечения вспомогательных нужд. Снижение удельного электропотребления экономически обоснованными методами приводит к снижению себестоимости продукции [8–10].

Основной целью исследования является повышение энергоэффективности предприятий на основе минимизации потерь активной мощности за счёт компенсации реактивной мощности. Исходя из этого, математическое моделирование ориентируется на выравнивание соотношения между производимой и потребляемой реактивной мощностью. Выполнение условия $Q_{\text{сеть}} = Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{пот}} + \Delta Q$ обеспечивает удовлетворительную величину напряжения на шинах потребителей. Для проверки выполнения этого условия проанализирован суточный график электрической нагрузки объекта исследования. Результаты анализа показали переменный характер потребления реактивной мощности. Это обусловлено сложностью обеспечения баланса реактивной мощности на объектах с нерегулируемыми конденсаторными батареями (КБ), так как из-за избыточного производства реактивной мощности увеличиваются потери активной мощности [11–15].

Потери активной мощности (ΔP) в электрической сети предприятия напрямую связаны с уровнем реактивной мощности (Q) через ток, протекающий по линии. Это объясняется тем, что реактивная мощность увеличивает полную мощность (S) системы, которая рассчитывается как $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, где P – активная мощность. При возрастании Q возрастает и ток в сети ($I = S/U$, где U – напряжение), что, в свою очередь, увеличивает потери активной мощности, определяемые по формуле $\Delta P = I^2 \cdot R$, где R – активное сопротивление линии. В более развернутом виде эти потери могут быть записаны в виде выражения $\Delta P = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot R}{U^2}$. Оно показывает, что потери активной мощности прямо пропорциональны реактивной мощности. Следовательно, увеличение реактивной мощности приводит к росту потерь активной мощности из-за увеличения тока, протекающего через сеть, и повышения нагрузок на линии. Управление реактивной мощностью (например, с помощью КБ) является ключевым фактором для минимизации этих потерь и повышения энергоэффективности системы. Если потери реактивной мощности в основном связаны с реактивным током, то $\Delta P = \frac{Q^2 \cdot R}{U^2}$. В этом случае учитывается только влияние реактивной мощности.

Условие баланса реактивной мощности на предприятии с учетом потерь мощности в цехах можно отобразить уравнением:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{пот}} + \Delta Q - Q_p = 0,$$

где $\sum_{i=1}^n Q_{\text{КБ}}$ – суммарная мощность КБ, установленных в цехах, кВар; $Q_{\text{пот}}$ – реактивная мощность, потребляемая цехом, кВар; ΔQ – потери реактивной мощности, кВар; Q_p – расчетное значение реактивной мощности, кВар.

Потери реактивной мощности также связаны с потребляемыми активной и реактивной мощностями и могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta Q = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot X}{U^2},$$

где X – реактивное сопротивление линии, U – напряжение в сети.

Видно, что увеличение потерь реактивной мощности (ΔQ) приводит к росту потока потребляемой реактивной мощности (Q_p), что, в свою очередь, вызывает увеличение потерь активной мощности в системе электроснабжения предприятия. Это подчеркивает важность эффективного управления реактивной мощностью для минимизации общих энергетических потерь и повышения энергоэффективности предприятия.

При решении задачи оптимизации потребления электроэнергии учитывается только часть затрат, которая непосредственно связана с производственным процессом. Другие затраты (заработная плата, амортизация, затраты на содержание зданий и сооружений) либо не учитываются, либо учитываются в виде фиксированной величины [16–19].

Первая часть затрат включает не только оплату за полезно потребленную электроэнергию, но и за потери электроэнергии в технологических линиях электропередачи предприятия. Эти затраты определяются для любого периода T следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^n N \Delta W_i,$$

где N – цена 1 кВт·ч электроэнергии по тарифу; ΔW_i – потери электрической энергии в i -м цехе, кВт·ч.

Потери активной мощности каждого цеха ΔP_i рассчитываются по формуле:

$$\Delta W_i^t = \int_0^T \Delta P_i dt.$$

Величина ΔP_i учитывает все режимы работы предприятия в рассматриваемый период.

Методы оптимального распределения реактивной мощности в цехах предприятий. При установке на предприятии источников реактивной мощности (ИРМ) необходимо тщательно подбирать оптимальные режимы их работы. При этом выбирается режим с наименьшими потерями активной мощности, что обеспечивает баланс реактивной мощности. Оптимальный режим ИРМ определяется в основном двумя методами: безусловной и условной минимизации. Первый метод на практике используется редко, но он составляет основу метода условной минимизации. Условную минимизацию

применяют при наличии условных экстремумов целевой функции, то есть при наличии ограничений и граничных условий. Использование этих методов привело к разработке дополнительных методов, таких как градиентный, графоаналитический, метод неопределенных множителей Лагранжа и других [20–23].

Принцип равенства относительного прироста потерь активной мощности. Суммарные потери активной мощности на предприятии (ΔP) определяются из выражения:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_i. \quad (3)$$

Здесь ΔP – общие потери активной мощности на предприятии, ΔP_i – потери активной мощности в i -м цехе предприятия. Все составляющие в (3) оцениваются в кВт. Для обеспечения баланса реактивной мощности в процессе оптимизации условно предполагается использование одной из установленных на предприятии КБ в качестве балансирующей. Обычно для этой цели выбирается КБ с наибольшей емкостью, поскольку она способна генерировать достаточный объем реактивной мощности для компенсации небаланса в сети. Генерируемая этой балансирующей КБ реактивная мощность обозначается как Q_b и рассматривается как ключевой параметр при расчете распределения реактивной мощности между другими элементами энергосистемы. Такой подход позволяет минимизировать потери активной мощности и обеспечить более стабильный режим работы электрической сети предприятия.

Следовательно, выражение для баланса реактивной мощности можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{n-1} Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q - Q_p \pm Q_b = 0, \quad (4)$$

где Q_b – балансирующая реактивная мощность, кВар, которую можно определить из выражения (5):

$$\pm Q_b = Q_p - (\sum_{i=1}^{n-1} Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q). \quad (5)$$

где, знак « $\pm$ » интерпретируется следующим образом: если в цехе наблюдается недостаток реактивной мощности, используется знак « $-$ »; в нормальном режиме применяется знак « $+$ ».

Подход, отраженный формулой (3), можно применить для определения оптимального распределения реактивной мощности между цехами внутри предприятия, исходя из условия минимума потерь активной мощности. Для нахождения экстремума функции (3) необходимо приравнять нулю частные производные реактивной мощности от общих потерь активной мощности через независимые переменные n :

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = 0, i = 1, \dots, n.$$

Дифференцируя (6) с учетом (8), получим:

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} + \left(\frac{\partial \Delta P_b}{\partial Q_b} \right) \left(\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} \right) = 0.$$

Поскольку реактивная мощность балансирующего ИРМ является функцией, зависящей от переменной Q_b , то ее можно выразить как:

$$\Delta p_i = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i}.$$

В соответствии с методом Лагранжа, оптимальное распределение достигается при условии равенства относительного прироста потерь активной мощности [6]:

$$\Delta p_i = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_1} + \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i}.$$

После дифференцирования уравнения (8) путем подстановки значения производной $\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} = -1$ получаем:

$$\Delta p_i + \Delta p_b \left(\frac{\partial Q_b}{\partial Q_i} \right) = 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

Для обеспечения оптимальности режимов работы на предприятиях должно выполняться равенство относительных приростов потерь активной мощности:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_n = \Delta p_b. \quad (6)$$

Из (6) следует, что критерием оптимальности является равенство относительных приростов потерь активной мощности.

Метод неопределенных множителей Лагранжа для расчета потерь активной мощности. Эффективность метода Лагранжа при оптимизации давно подтверждена в многочисленных исследованиях, особенно в решении сложных задач нелинейного математического программирования. Метод Лагранжа для оптимального выбора и распределения устройств компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий обладает несколькими ключевыми преимуществами:

1. Учет ограничений – метод позволяет учитывать технические и экономические ограничения системы, что обеспечивает оптимизацию работы сетей без превышения предельных значений.
2. Гибкость – может быть адаптирован к различным условиям при решении задачи минимизации потерь и стоимости компенсации.
3. Минимизация затрат – оптимизирует количество и расположение устройств компенсации, снижая эксплуатационные расходы и потери энергии.
4. Динамическая адаптация – учитывает изменения в сети, что важно для промышленных процессов с переменной нагрузкой.

5. Взаимодействие устройств компенсации – позволяет учитывать взаимодействие различных устройств, что делает решение более точным и эффективным.

6. Повышение надежности – помогает повысить стабильность работы сети и снизить риски перегрузок.

Применение данного метода в рассматриваемой задаче обосновано тем, что он обеспечивает точное соблюдение условий баланса реактивной мощности и минимизацию потерь активной мощности в системе электроснабжения. Таким образом, метод Лагранжа обеспечивает эффективное и экономичное управление компенсацией реактивной мощности, повышая надежность и снижая затраты на энергоснабжение предприятий [24, 25].

Предположим, что существует целевая функция $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, экстремум которой определен в виде:

$$\left. \begin{aligned} W_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ W_2(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Вместо экстремума функции $F(X_1, \dots, X_n)$ определяется условие экстремума специально построенной функции Лагранжа, включая целевую функцию и уравнения связи. Функция Лагранжа приобретает следующий вид:

$$\Phi = F + \sum_{i=1}^{i=k} \lambda_i W_i.$$

Фиксированные множители λ_i называются неопределенными множителями Лагранжа. Экстремум определяется путем дифференцирования функции по независимым переменным ($X_1, \dots, X_n$) и приравнивания ее частных производных нулю. Интерполяционное выражение Лагранжа описывает произвольную кривую как полином n -й степени:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)} \cdot y_0 + \\ &+ \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} \cdot y_1 + \\ &+ \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_3) \dots (x - x_n)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) \dots (x_2 - x_n)} \cdot y_2 + \dots \\ &\dots + \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_0)(x_n - x_1) \dots (x_n - x_{n-1})} \cdot y_n. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F(x) &= a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \\ &+ a_{n-2} \cdot x^{n-2} + \dots + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0. \end{aligned} \quad (9)$$

С использованием выражений (8) и (9) можно аппроксимировать произвольную кривую, что позволяет моделировать потери активной мощности в различных условиях. Для аппроксимации потерь активной мощности достаточно применять полином 2-й степени (10), поскольку квадратичная

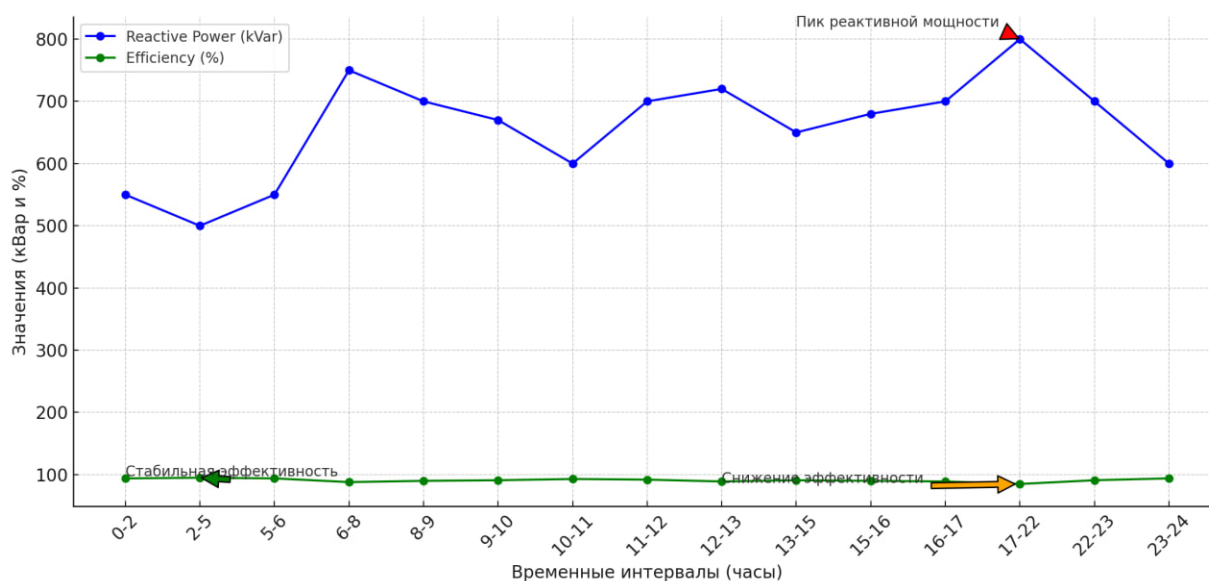


Рисунок. Изменения реактивной мощности (1) и эффективности оборудования (2)
Figure. Changes in reactive power (1) and equipment efficiency (2)

Наоборот, в стабильные периоды, такие как с 2 до 5 часов, уровень реактивной мощности остаётся низким, что позволяет поддерживать высокую эффективность оборудования на уровне 95 %. Это подчёркивает важность управления реактивной мощностью для обеспечения стабильной работы энергосистемы.

Для повышения энергоэффективности рекомендуется оптимизировать работу конденсаторных батарей, особенно в часы пиковых нагрузок, и применять устройства компенсации реактивной мощности. Такой подход позволит снизить потери и обеспечить стабильность работы оборудования на предприятиях с непрерывным производственным циклом.

Практический расчет потерь электроэнергии на хлопкоочистительном предприятии «BCT Cluster Agrokompleks» для их минимизации

Хлопкоочистительное предприятие «BCT Cluster Agrokompleks» потребляет значительные объёмы электроэнергии, обеспечивающей работу технологического оборудования, систем освещения и вентиляции. Помимо активной мощности, им необходима и реактивная мощность, которая используется для создания магнитных полей в электродвигателях, трансформаторах и другом оборудовании.

Потребление реактивной мощности на хлопкоочистительном предприятии «BCT Cluster Agrokompleks» связано с работой мощных электродвигателей в устройствах для очистки, сортировки и упаковки хлопка. Для поддержания стабильности напряжения и предотвращения потерь энергии необходима компенсация реактивной мощности. Вопросы оптимального выбора и распределения устройств компенсации на таком предприятии осо-

бенно актуальны, поскольку неправильная компенсация приводит к снижению эффективности, увеличению затрат и энергетическим потерям. Оптимизация компенсации позволяет повысить коэффициент мощности, улучшить стабильность работы электросети и снизить эксплуатационные расходы.

На предприятии установлены КБ суммарной мощностью 825 кВар. Конденсаторные батареи устанавливаются в соответствии со значениями потребляемой реактивной мощности в номинальных режимах работы цехов предприятия. Также при разных режимах работы, например, минимальной или максимальной нагрузке в конденсаторах, появляются избыточные потери активной мощности.

Таблица 1. Параметры конденсаторных батарей, установленных на предприятии

Table 1. Parameters of capacitor banks installed at the enterprise

Номер группы Group number	Марка Brand	Количество конденсаторных батарей Number of capacitor banks	Напряжение, В Voltage, V	Мощность, кВар Power, kvar
№ 1	УКРМ-0,4-25-5	10	400	250
№ 2	УКРМ-0,4-25-5	14	400	350
№ 3	УКРМ-0,4-25-5	9	400	225

Измерениями и расчетами найдены потери активной мощности, соответствующие значению реактивной мощности, вырабатываемой каждой группой КБ. Измеренные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Мощности конденсаторных батарей, установленных в цехах предприятия

Table 2. Capacity of capacitor banks installed in workshops of the enterprise

Группа/Group					
1		2		3	
Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW	Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW	Q, кВАр/kVAr	ΔP, кВт/kW
100	5,95	150	8,74	75	5,12
150	9,73	250	16,26	150	10,32
250	20,29	350	25,78	225	18,89

Приведенные в табл. 3 данные получены по графику электрической нагрузки, построенному по суточному потреблению предприятием реактивной мощности. По нему рассчитаны оптимальные значения потребления активной мощности.

Полиномиальное определение зависимости потерь активной мощности от реактивной мощности батареи конденсаторов $\Delta P_i(Q_i)$ с использованием интерполяционного выражения Лагранжа

Потери активной мощности для групп КБ в цехах завода можно рассчитать, используя следующие выражения:

$$\begin{aligned}\Delta P_I(Q_I) &= \frac{(Q^I - 150)(Q^I - 250)}{(100 - 150)(100 - 250)} \cdot 5,95 + \\ &+ \frac{(Q^I - 100)(Q^I - 250)}{(150 - 100)(150 - 250)} \cdot 9,73 + \\ &+ \frac{(Q^I - 100)(Q^I - 150)}{(250 - 100)(250 - 150)} \cdot 20,29 = \\ &= 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875; \\ \Delta P_{II}(Q_{II}) &= \frac{(Q^{II} - 250)(Q^{II} - 350)}{(150 - 250)(150 - 350)} \cdot 8,74 + \\ &+ \frac{(Q^{II} - 150)(Q^{II} - 350)}{(250 - 150)(250 - 350)} \cdot 16,26 + \\ &+ \frac{(Q^{II} - 150)(Q^{II} - 250)}{(350 - 250)(350 - 150)} \cdot 25,78 = \\ &= 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205; \\ \Delta P_{III}(Q_{III}) &= \frac{(Q^{III} - 150)(Q^{III} - 225)}{(75 - 150)(75 - 225)} \cdot 5,12 + \\ &+ \frac{(Q^{III} - 75)(Q^{III} - 225)}{(150 - 75)(150 - 225)} \cdot 10,32 +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&+ \frac{(Q^{III} - 75)(Q^{III} - 150)}{(225 - 75)(225 - 150)} \cdot 18,89 = \\ &= 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3.\end{aligned}$$

В результате получены следующие полиномиальные зависимости потерь активной мощности групп конденсаторных батарей в цехах предприятия:

$$\Delta P_I(Q_I) = 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875;$$

$$\Delta P_{II}(Q_{II}) = 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205;$$

$$\Delta P_{III}(Q_{III}) = 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3.$$

Математическая модель скалярной оптимизации

Задачу минимизации потерь активной мощности в электрических сетях предприятия можно решить выявлением оптимального распределения реактивной мощности КБ между цехами предприятия.

Целевая функция в модели оптимизации имеет вид:

$$F = \Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_i(Q_i) + \Delta P_{II}(Q_{II}) + \dots + \Delta P_n(Q_n)) \rightarrow \min.$$

Для предприятия «BCT Cluster Agrokompleks»:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_I(Q_I) + \Delta P_{II}(Q_{II}) + \Delta P_{III}(Q_{III}) \rightarrow \min,$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\Sigma} &= 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + 1,3875 + \\ &+ 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 1,205 + \\ &+ 0,0003Q^{III^2} + 0,0018Q^{III} + 3,3 = \\ &= 5,8925 + 0,0002Q^{I^2} + 0,0256Q^I + \\ &+ 0,0001Q^{II^2} + 0,0352Q^{II} + 0,0003Q^{III^2} + \\ &+ 0,0018Q^{III} \rightarrow \min.\end{aligned}$$

Уравнения зависимости потерь активной мощности от реактивной мощности, генерируемой КБ, можно представить как:

$$\Delta P_i(Q_i) = a_{0i} + a_{1i}Q_i + a_{2i}Q_i^2;$$

$$\begin{cases} \Delta P_1(Q_1) = a_{01} + a_{11}Q_1 + a_{21}Q_1^2 \\ \Delta P_2(Q_2) = a_{02} + a_{12}Q_2 + a_{22}Q_2^2 \\ \Delta P_3(Q_3) = a_{03} + a_{13}Q_3 + a_{23}Q_3^2 \end{cases}$$

Таблица 3. Суточное потребление предприятием реактивной мощности по интервалам

Table 3. Daily consumption of reactive power by the enterprise by intervals

Интервал, ч Interval, h	0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q _Σ , кВАр/kVAr	550	500	550	750	700	670	600	700	720	650	680	700	800	700	600

$$\begin{cases} \Delta P_I(Q_I) = 1,3875 + 0,0256Q^I + 0,0002Q^{I^2} \\ \Delta P_{II}(Q_{II}) = 1,205 + 0,0352Q^{II} + 0,0001Q^{II^2} \\ \Delta P_{III}(Q_{III}) = 3,3 + 0,0018Q^{III} + 0,0003Q^{III^2} \end{cases}$$

При решении задачи накладываются следующие ограничения:

а) *ограничение в виде неравенства* (автономное ограничение) устанавливает допустимые пределы изменения реактивной мощности КБ:

$$Q_{\min}^i \leq Q^i \leq Q_{\max}^i;$$

$$\begin{cases} Q_{\min}^I \leq Q^I \leq Q_{\max}^I \\ Q_{\min}^{II} \leq Q^{II} \leq Q_{\max}^{II} \\ Q_{\min}^{III} \leq Q^{III} \leq Q_{\max}^{III} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 100 \leq Q^I \leq 250 \\ 150 \leq Q^{II} \leq 350 \\ 75 \leq Q^{III} \leq 225 \end{cases}$$

б) *ограничение в виде равенства* суммарной реактивной нагрузки предприятия заданной расчетной мощности Q_p :

$$\sum_{i=1}^n Q_{KB} + Q_{пот} + \Delta Q = Q_p.$$

Суточный график электрической нагрузки по реактивной мощности, представленный в табл. 3, показывает, что величина потребления реактивной мощности в течение суток состоит из 15 интервалов. Для оптимального распределения реактивной нагрузки между КБ в каждый интервал суток необходимо, в первую очередь, обеспечить баланс:

$$550 = Q_I^I + Q_{II}^I + Q_{III}^I; 500 = Q_I^{II} + Q_{II}^{II} + Q_{III}^{II};$$

$$550 = Q_I^{III} + Q_{II}^{III} + Q_{III}^{III};$$

$$750 = Q_I^{IV} + Q_{II}^{IV} + Q_{III}^{IV}; 700 = Q_I^V + Q_{II}^V + Q_{III}^V;$$

$$670 = Q_I^{VI} + Q_{II}^{VI} + Q_{III}^{VI};$$

$$600 = Q_I^{VII} + Q_{II}^{VII} + Q_{III}^{VII}; 700 = Q_I^{VIII} + Q_{II}^{VIII} + Q_{III}^{VIII};$$

$$720 = Q_I^{IX} + Q_{II}^{IX} + Q_{III}^{IX};$$

$$650 = Q_I^X + Q_{II}^X + Q_{III}^X; 680 = Q_I^{XI} + Q_{II}^{XI} + Q_{III}^{XI};$$

$$700 = Q_I^{XII} + Q_{II}^{XII} + Q_{III}^{XII};$$

$$800 = Q_I^{XIII} + Q_{II}^{XIII} + Q_{III}^{XIII};$$

$$700 = Q_I^{XIV} + Q_{II}^{XIV} + Q_{III}^{XIV}; 600 = Q_I^{XV} + Q_{II}^{XV} + Q_{III}^{XV}.$$

Оптимальное распределение реактивной нагрузки на конденсаторные батареи

Полиномиальное представление уравнений потерь активной мощности в КБ выглядит так:

$$\Delta P_i(Q_i) = a_{0i} + a_{1i}Q_i + a_{2i}Q_i^2;$$

$$\Delta P_I(Q_I) = 1,3875 + 0,0256Q^I + 0,0002Q^{I^2};$$

$$\Delta P_{II}(Q_{II}) = 1,205 + 0,0352Q^{II} + 0,0001Q^{II^2};$$

$$\Delta P_{III}(Q_{III}) = 3,3 + 0,0018Q^{III} + 0,0003Q^{III^2}.$$

Сравнительные показатели потребления активной мощности определены дифференцированием уравнений, описывающих потребление, соответствующее мощностям КБ. Они представляют собой изменение активной мощности вследствие потерь в цехе, где размещена i -я КБ, при изменении реактивной нагрузки каждого цеха предприятия на величину dQ_i :

$$\Delta p_i(Q_i) = \frac{\partial \Delta P_i(Q_i)}{\partial Q_i} = a_{1i} + 2a_{2i}Q_i$$

$$\begin{aligned} \Delta p_I(Q_I) &= 0,0256 + 2 \cdot 0,0002Q^I \\ &= 0,0256 + 0,0004Q^I; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{II}(Q_{II}) &= 0,0352 + 2 \cdot 0,0001Q^{II} \\ &= 0,0352 + 0,0002Q^{II}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{III}(Q_{III}) &= 0,0018 + 2 \cdot 0,0003Q^{III} \\ &= 0,0018 + 0,0006Q^{III}. \end{aligned}$$

Анализ результатов расчетов (табл. 4, 5) показал, что выбор оптимальной комбинации КБ обеспечивает не только улучшение технико-экономических показателей предприятия, но и снижение активных потерь мощности (рисунок).

При выборе оптимального состава КБ по методу Лагранжа общие потери электроэнергии за счёт оптимальной выработки реактивной мощности в течение суток определяется следующим образом:

$$\Delta W_{\Sigma i} = \sum (\Delta P_i \cdot t_{np}).$$

$$\Delta W_{1\Sigma} = 5,95 \cdot 6 + 9,73 \cdot 2 + 11,99 \cdot 2 + 5,95 \cdot 1 + 11,99 \cdot 1 + 9,73 \cdot 1 + 11,99 \cdot 4 + 20,29 \cdot 5 + 11,99 \cdot 1 + 5,95 \cdot 1 = 274,16 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{2\Sigma} = 14,19 \cdot 6 + 25,78 \cdot 2 + 20,77 \cdot 4 + 25,78 \cdot 1 + 20,77 \cdot 4 + 25,78 \cdot 5 + 20,77 \cdot 2 = 499,08 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\Delta W_{3\Sigma} = 15,66 \cdot 6 + 18,89 \cdot 2 + 15,66 \cdot 2 + 12,8 \cdot 1 + 15,66 \cdot 1 + 18,89 \cdot 1 + 15,66 \cdot 4 + 18,89 \cdot 5 + 15,66 \cdot 1 + 12,8 \cdot 1 = 395,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

После оптимизации режимов работы КБ общие потери электроэнергии в течение суток при компенсации реактивной мощности равны:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum W_{i\Sigma} = 274,16 + 499,08 + 395,96 = 1169,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

До применения предложенной модели и методов оптимизации потери электроэнергии на предприятии составляли 1560 кВт·ч [6]. При следовании рекомендациям, основанным на расчетах по предложенной модели, удастся снизить потери электроэнергии на 391 кВт·ч.

Таблица 4. Распределение мощностей реактивной нагрузки между КБ на предприятии

Table 4. Distribution of reactive load power between capacitor banks at the enterprise

Расчетное время, кВАр Estimated time, kVAr	Интервал/Interval														
	0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q_{Σ}	525	525	525	725	675	675	575	675	725	675	675	675	825	675	575
Q_1	100	100	100	150	175	175	100	175	150	175	175	175	250	175	100
Q_2	225	225	225	350	300	300	300	300	350	300	300	300	350	300	300
Q_3	200	200	200	225	200	200	175	200	225	200	200	200	225	200	175

Таблица 5. Потери активной мощности ΔP_i как функция реактивных нагрузок Q_i для каждого интервала времени по методу Лагранжа

Table 5. Active power losses ΔP_i as a function of reactive loads Q_i for each time interval using the Lagrange method

Расчетное время Estimated time		Интервал/Interval														
		0–2	2–5	5–6	6–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–15	15–16	16–17	17–22	22–23	23–24
Q_{Σ} , кВАр, kVAr		525	525	525	725	675	675	575	675	725	675	675	675	825	675	575
Группа/Group	1	Q_1 , кВАр, kVAr	100	100	100	150	175	175	100	175	150	175	175	250	175	100
		ΔP_1 , кВт, kW	5,95	5,95	5,95	9,73	11,99	11,99	5,95	11,99	9,73	11,99	11,99	20,29	11,99	5,95
	2	Q_2 , кВАр, kVAr	225	225	225	350	300	300	300	300	350	300	300	350	300	300
		ΔP_2 , кВт, kW	14,19	14,19	14,19	25,78	20,77	20,77	20,77	20,77	25,78	20,77	20,77	25,78	20,77	20,77
	3	Q_3 , кВАр, kVAr	200	200	200	225	200	200	175	200	225	200	200	225	200	175
		ΔP_3 , кВт, kW	15,66	15,66	15,66	18,89	15,66	15,66	12,80	15,66	18,89	15,66	15,66	18,89	15,66	12,80
		ΔP_{Σ} , кВт, kW	35,8	35,8	35,8	54,4	48,42	48,42	39,52	48,42	54,4	48,42	48,42	64,96	48,42	39,52

Заключение

Результаты исследования и их апробации на предприятии «ВСТ Cluster Agrokompleks» можно обобщить в следующем виде:

1. Предложенный авторами метод оптимального выбора и распределения устройств компенсации реактивной мощности учитывает специфику непрерывных производственных процессов, что позволяет адаптировать решения к реальным условиям эксплуатации. Использование метода Лагранжа обеспечивает эффективное решение задач нелинейного программирования с учётом ограничений на параметры оборудования и режимы работы. Экспериментальные данные демонстрируют снижение потерь активной мощности до 25 %, улучшение коэффициента мощности и снижение энергозатрат. Модель проста для интеграции в существующие системы управления энергией, что делает её применимой и экономически выгодной для промышленных предприятий.
2. Разработанная математическая модель позволяет учитывать особенности непрерывных производственных процессов, анализировать суточные графики нагрузки и использовать метод Лагранжа для оптимизации распределения реактивной мощности. Это дает возможность минимизировать потери активной мощности и повысить энергоэффективность системы электрооборудования. Оптимизация величины реактивной мощности позволила уменьшить потери элек-

троэнергии на 391 кВт·ч по сравнению с величиной, достигнутой применяемыми ранее методами управления.

3. Результаты исследования и рекомендации, разработанные на их основе, могут применяться на других предприятиях с непрерывным характером производства. Ссылки на существующие работы, подтверждающие эффективность метода Лагранжа, дополнительно усиливают обоснованность его выбора. Они демонстрируют успешное применение метода в аналогичных задачах, таких как распределение нагрузки в энергосистемах, управление реактивной мощностью и оптимизация энергопотребления. Выбор метода Лагранжа для решения данной задачи является не только оправданным, но и наиболее подходящим с точки зрения точности, надежности и практической применимости [6].
4. Разработанная математическая модель станет основой для дальнейших исследований и практических разработок в области энергетической эффективности потребления электрической энергии промышленными предприятиями. Полученные результаты представляют собой важный шаг в направлении оптимизации объемов их энергопотребления. Практическая применимость и эффективность предложенной модели как важного инструмента для управления энергопотреблением подтверждены экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adhikari R., Agnihotri G. Optimal placement of reactive power compensators to reduce losses using genetic algorithm // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2013. – Vol. 44 (1). – P. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.001>
2. Azevedo G.M., Correia P.F. Optimal reactive power control in distribution networks using genetic algorithms // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 137. – P. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.023>
3. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 125–133. DOI: [10.18799/24131830/2023/12/4407](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4407)
4. A multi-objective optimization approach to improve reactive power dispatch considering voltage stability / A. Ebrahimi, S. Ghavidel, L. Li, J. Zhang // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2018. – Vol. 99. – P. 280–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.022>
5. Kirschbaum C., Verstege J. Reactive power control for loss minimization in smart grids with high penetration of renewable energy sources // *In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. IEEE PES. – 2012. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175715>
6. 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](https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423)
7. Li G., Zhang H., Bo R. A novel method to reduce power loss using distributed reactive power control // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – Vol. 61. – P. 188–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.021>
8. Liao H., Chuang C.S., Lu L. Hybrid ant colony optimization with particle swarm optimization for power losses minimization considering voltage stability in power system // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2012. – Vol. 7 (2). – P. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2012.7.2.246>
9. 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](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055038)
10. Naderi E., Abdollahzadeh H., Narimani H. A new modified teaching-learning algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete control variables // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2013. – Vol. 26 (10). – P. 2282–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.012>
11. Shahgholian G., Moghaddam M.P. Optimal reactive power dispatch for improving voltage profile and reducing power loss using a novel teaching-learning-based optimization algorithm // *Applied Soft Computing*. – 2018. – Vol. 64. – P. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.11.012>
12. Analysis and calculation of optimum parameters of electric arc furnace / I.U. Rakhmonov, K.M. Reymov, A.M. Najimova, V.Ya. Ushakov, B.T. Seytmuratov // *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/5/055048](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055048)
13. Zhu J., Wang J. Power loss minimization in industrial power systems with reactive power control // *In Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) IEEE*. – 2012. – P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2012.6373976>
14. Chao Y., Cheng L. Voltage control and reactive power optimization in distribution systems using a multi-objective approach // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2015. – Vol. 10 (5). – P. 2176–2185. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.5.2176>
15. 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](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055046)
16. Optimal reactive power dispatch with discrete control variables considering voltage stability / M. Mohammadi, R. Najafi, F. Khatami // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2013. – Vol. 45 (1). – P. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.012>
17. Rahmani-Andebili M. Adaptive robust optimization for reactive power management // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2016. – Vol. 31 (4). – P. 3184–3193. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2481898>
18. Research on the ablation resistance of TiC particle-reinforced aluminium-based composite coatings on armature surface / C. Fan, L. Zhang, N.N. Kurbonov, I.U. Rakhmonov, G. Wang // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14. – № 549. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14050549>
19. Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hannan M.A. Artificial bee colony based optimization technique for reactive power optimization // *Applied Soft Computing*. – 2015. – Vol. 13 (1). – P. 360–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.10.029>
20. Liu X., Tang G., Li S. Coordinated control of reactive power and voltage for active distribution networks using improved particle swarm optimization // *Frontiers in Energy Research*. – 2015. – Vol. 3 (2). – P. 45–57. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00045>
21. Zhang H., Liu G., Wu J. Reactive power optimization in distribution networks of new power systems based on multi-objective particle swarm optimization // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (12). – № 1234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123234>
22. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated Pt nanoparticles for fuel cells / K. Davletbaev, S.S. Chougule, J. Min, K. Ko, Y. Kim, H. Choi, Y. Choi, A.A. Chavan, B. Pak, I.U. Rakhmonov et al. // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – № 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
23. Chen C., Liu H. Optimal reactive power flow based on parallel particle swarm optimization algorithm // *Energy*. – 2018. – Vol. 150. – P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.034>
24. Wang J. et al. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2024. DOI: [10.1109/TDEI.2024.3456096](https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3456096)

25. Прогнозирование электропотребления с использованием метода главных компонент (PCA) / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731

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>

Нуъмон Низомиддинович Ниёзов, доктор философии по техническим наукам, доцент кафедры электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. nomon.niyozov_2422@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Комолиддин Бахриддинович Ниматов, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Каршинский инженерно-экономический институт, Узбекистан, 180100, г. Карши, ул. Мастакилик, 225. k.b.nimatov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4579-1160>

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, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова, 1. <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Фахриддин Бердиёр угли Омонов, доктор философии по техническим наукам, доцент, заведующий кафедрой Термезского инженерно-технологического института, Узбекистан, 190100, г. Термез, ул. И. Каримова, 288-А. faxriommonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0303-9704>

Камал Мамбеткаримович Реймов, доктор философии по техническим наукам, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан, 230100, г. Нукус, ул. Ч. Абдирова, 1. kamal_tstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2520-6422>

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

Поступила в редакцию: 11.06.2024

Поступила после рецензирования: 14.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Adhikari R., Agnihotri G. Optimal placement of reactive power compensators to reduce losses using genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 44 (1), pp. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.001>
2. Azevedo G.M., Correia P.F. Optimal reactive power control in distribution networks using genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 137, pp. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.023>
3. 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).
4. Ebrahimi A., Ghavidel S., Li L., Zhang J. A multi-objective optimization approach to improve reactive power dispatch considering voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 280–293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.02.022>
5. Kirschbaum C., Verstege J.A. Reactive power control for loss minimization in smart grids with high penetration of renewable energy sources. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES*, 2012. pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175715>
6. 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. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4423>
7. Li G., Zhang H., Bo R. A novel method to reduce power loss using distributed reactive power control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, vol. 61, pp. 188–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.021>
8. Liao H., Chuang C.S., Lu L. Hybrid ant colony optimization with particle swarm optimization for power losses minimization considering voltage stability in power system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2012, vol. 7 (2), pp. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2012.7.2.246>
9. 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.
10. Naderi E., Abdollahzadeh H., Narimani H. A new modified teaching-learning algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete control variables. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, vol. 26 (10), pp. 2282–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.012>

11. Shahgholian G., Moghaddam M.P. Optimal reactive power dispatch for improving voltage profile and reducing power loss using a novel teaching-learning-based optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 2018, vol. 64, pp. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.11.012>
12. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Najimova A.M., Ushakov V.Ya., Seytmuratov B.T. Analysis and calculation of optimum parameters of electric arc furnace. *Journal of Physics: Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055048.
13. Zhu J., Wang J. Power loss minimization in industrial power systems with reactive power control. *In Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) IEEE – 2012*, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2012.6373976>
14. Chao Y., Cheng L. Voltage control and reactive power optimization in distribution systems using a multi-objective approach. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2015, vol. 10 (5), pp. 2176–2185. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.5.2176>
15. 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.
16. Mohammadi M., Najafi R., Khatami F. Optimal reactive power dispatch with discrete control variables considering voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 45 (1), pp. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.012>
17. Rahmani-Andebili M. Adaptive robust optimization for reactive power management. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31 (4), pp. 3184–3193. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2481898>
18. Fan C., Zhang L., Kurbonov N.N., Rakhmonov I.U., Wang G. Research on the ablation resistance of tic particle-reinforced aluminium-based composite coatings on armature surface. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 549. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14050549>
19. Sulaiman M.H., Mohamed M.R., Hannan M.A. Artificial bee colony based optimization technique for reactive power optimization. *Applied Soft Computing*, 2015, vol. 13 (1), pp. 360–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.10.029>
20. Liu X., Tang G., Li S. Coordinated control of reactive power and voltage for active distribution networks using improved particle swarm optimization. *Frontiers in Energy Research*, 2015, vol. 3 (2), pp. 45–57. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00045>
21. Zhang H., Liu G., Wu J. Reactive power optimization in distribution networks of new power systems based on multi-objective particle swarm optimization. *Energies*, 2021, vol. 14 (12), no.1234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123234>
22. Davletbaev K., Chougule S.S., Min J., Ko K., Kim Y., Choi H., Choi Y., Chavan A.A., Pak B., Rakhmonov I.U. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated pt nanoparticles for fuel cells. *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, no. 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
23. Chen C., Liu H. Optimal reactive power flow based on parallel particle swarm optimization algorithm. *Energy*, 2018, vol. 150, pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.034>
24. Wang J. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3456096
25. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbanov N.N. Forecasting electricity consumption using the principal component analysis method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 334, no. 2, pp. 198–209. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731

Information about the authors

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

Numon N. Niyozov, PhD, Associate Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan. nomon.niyozov_2422@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

Komoliddin B. Nimatov, Senior Lecturer, Karshi Engineering and Economics Institute, 225, Mustakillik street, Karshi, 180100, Uzbekistan. k.b.nimatov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4579-1160>

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vyush@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Fakhriddin B. Omonov, PhD, Associate Professor, Termez Institute of Engineering and Technology, 288 A, Islam Karimov street, Termez, 190100, Uzbekistan. faxriomonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0303-9704>

Kamal M. Reymov, PhD., Associate Professor, Karakalpak State University, 1, Ch. Abdirov street, Nukus, 230100, Uzbekistan. kamal_tstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2520-6422>

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

Received: 11.06.2024

Revised: 14.01.2025

Accepted: 03.02.2025