

УДК 621.315

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.11

Е.В. Тумаева, С.С. Кузин, И.Ф. Афлятунов, Т.Г. Макусева

Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Нижнекамск, Россия

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Нефтехимические, нефтеперерабатывающие предприятия, шинные заводы характеризуются большими производственными площадями, имеют в основном радиальные схемы электропитания, по которым запитывается огромное количество асинхронных двигателей напряжением 0,4 кВ мощностью до 200 кВт. Их запитывают медными или алюминиевыми кабелями, которые с учетом их длины имеют значительное активное сопротивление. В связи с этим потери активной мощности при передаче электроэнергии к асинхронным двигателям приобретают ощутимые значения, и возникает необходимость решить задачу по их уменьшению. **Цель исследования:** снижение потерь активной мощности в кабельных линиях 0,4 кВ на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях. **Методы:** предлагается решить задачу оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности в радиальной схеме электропитания путем оптимального распределения между компенсирующими устройствами реактивной мощности заданной величины. Рассмотрена однолинейная схема электропитания группы насосов технологической установки нефтеперерабатывающего завода, составлена математическая модель задачи оптимизации по критерию минимума активных потерь, образующихся при протекании реактивной мощности, в кабельных линиях 0,4 кВ. Математическая модель включает в себя целевую функцию, граничные условия и ограничения. Приведен анализ возможных способов решения системы линейных алгебраических уравнений по числу математических операций для нахождения оптимальных значений величин реактивной мощности. **Результаты:** решена задача оптимизации по критерию минимума активных потерь в кабельных линиях радиальной схемы электропитания группы насосов технологической установки, получены оптимальные значения реактивной мощности конденсаторных установок, подключенных к асинхронным двигателям и обеспечивающих заданный коэффициент мощности на секции шин. Рассчитаны потери активной мощности в кабельных линиях, питающих асинхронные двигатели, при оптимальном распределении мощности конденсаторных установок для различных режимов нагрузки двигателей. **Практическая значимость:** решение задачи оптимального распределения устройств компенсации реактивной мощности приводит к снижению активных потерь в радиальной схеме электропитания насосов технологической установки, а также в силовых трансформаторах и вышестоящих элементах схемы электропитания, что приводит в конечном итоге к снижению себестоимости выпускаемой продукции. Разработана принципиальная схема автоматизированного электротехнического комплекса группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств для группы насосов технологической установки.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, кабельные линии, радиальные схемы электропитания, индивидуальная компенсация реактивной мощности, оптимальное значение реактивной мощности, оптимизационная задача, минимум потерь активной мощности, метод множителей Лагранжа.

E.V. Tumaeva, S.S. Kuzin, I.F. Aflyatunov, T.G. Makuseva

Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russian Federation

SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMAL POWER DISTRIBUTION OF INDIVIDUAL COMPENSATING DEVICES FOR A GROUP OF ASYNCHRONOUS MOTORS FOR A STABLE OPERATING MODE AND FOR A GRINDLY VARIABLE LOAD

Petrochemical, oil refineries, tire factories are characterized by large production areas, they have mainly radial power supply circuits, through which a huge number of 0.4 kV asynchronous motors with a power of up to 200 kW are supplied. They are powered with copper or aluminum cables, which, given their length, have significant resistance. In this regard, the losses of active power during the transmission of electricity to asynchronous motors acquire tangible values, and it becomes necessary to solve the problem of reducing them. **The purpose of the study:** reduction of active power losses in 0.4 kV cable lines at petrochemical and oil refineries. **Methods:** it is proposed to solve the optimization problem according to the criterion of minimum active power losses in the radial power supply scheme by means of optimal distribution of reactive power of a given value between compensating devices. A single-line diagram of the power supply of a group of pumps of a technological unit of an oil refinery is considered, a mathematical model of the optimization problem is compiled according to the criterion of the minimum active losses generated during the flow of reactive power in 0.4 kV cable lines. The mathematical model includes an objective function, boundary conditions and constraints. The analysis of possible ways of solving a system of linear algebraic equations by the number of mathematical operations for finding the optimal values of reactive power values is presented. **Results:** the optimization problem was solved according to the criterion of the minimum active losses in the cable lines of the radial power supply of the group of pumps of the technological unit, the optimal values of the reactive power of the capacitor units connected to asynchronous motors and providing the given power factor on the bus sections were obtained. Losses of active power in cable lines supplying asynchronous motors are calculated with optimal power distribution of capacitor units for various modes of motor load. **Practical significance:** solving the problem of optimal distribution of reactive power compensation devices leads to a decrease in active losses in the radial power supply circuit of the pumps of the technological unit, as well as in power transformers and higher elements of the power supply circuit, which ultimately leads to a decrease in the cost of manufactured products. A schematic diagram of an automated electrical complex for a group of asynchronous electric motors with an optimal power distribution of compensating devices for a group of pumps of a technological unit has been developed.

Keywords: asynchronous motor, cable lines, radial power supply circuits, individual reactive power compensation, optimal reactive power value, optimization problem, minimum active power losses, Lgrange multiplier method.

Введение. Крупные нефтехимические и нефтеперерабатывающие предприятия Республики Татарстан, такие как «Нижнекамскнефтехим», «Танеко», «Нижнекамскшина» и др., в основном используют радиальные схемы электроснабжения. Это связано с необходимостью обеспечения надежного электроснабжения, так как внеплановый простой электрооборудования вызывает массовый недоотпуск дорого-

стоящей продукции. Рост тарифов на электроэнергию заставил энергетиков предприятий искать пути снижения себестоимости продуктов нефтепереработки, поэтому задача снижения потерь мощности при передаче электроэнергии для нефтехимических, нефтеперерабатывающих предприятий, а также шинных заводов стала весьма актуальной [9–10]. Традиционным способом снижения потерь электроэнергии является установка компенсирующих устройств реактивной мощности. На перечисленных выше предприятиях в настоящее время устройства компенсации реактивной мощности устанавливаются в цеховых трансформаторных подстанциях на стороне 0,4 кВ, тем самым разгружая силовые трансформаторы и вышестоящие линии электропередачи 6/10 кВ. При этом кабельные линии 0,4 кВ, питающие электроустановки, остаются загруженными избыточной реактивной мощностью [1–8]. В случае, если длина кабельных линий 0,4 кВ незначительна, то потери в них также незначительны. Однако на указанных выше предприятиях технологические цеха имеют большие размеры и несколько этажей. С учетом способа прокладки кабелей длина питающих кабелей 0,4 кВ может достигать 200–400 м. Учитывая взрывоопасную среду, на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях основными приводными двигателями являются асинхронные двигатели, обычно работающие в режиме неполной загрузки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента мощности. В стремлении повысить коэффициент мощности непосредственно у асинхронных двигателей был рассмотрен вариант установки конденсаторных батарей непосредственно у двигателей, что также приводит к снижению потерь мощности в кабельных линиях. В целях получения наилучшего результата возникла идея использовать задачу оптимального распределения компенсирующих устройств в системах электроснабжения, рассмотренную в [11]. Патентный поиск и обзор публикаций по данной тематике показали, что комплексно задачу оптимального распределения мощности индивидуальных компенсирующих устройств для группы асинхронных двигателей пока никто не рассматривал. В статье предлагается использовать современные устройства компенсации реактивной мощности непосредственно у асинхронных двигателей, являющихся источниками реактивной мощности, разгружая тем самым и питающие кабельные линии 0,4 кВ. Значения реактивной мощности конденсаторных установок определяются в результате решения оптимизационной

задачи, использующей критерий – минимум активных потерь в кабельных линиях 0,4 кВ.

Постановка оптимизационной задачи. Ставится научная задача минимизировать потери активной мощности в кабельных линиях 0,4 кВ для радиальной схемы электроснабжения группы асинхронных двигателей путем решения оптимизационной задачи, в результате чего получаем оптимальное распределение реактивной мощности компенсирующих устройств между заданным количеством асинхронных двигателей.

Потери активной мощности при передаче электроэнергии потребителю определяются по формуле:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R, \quad (1)$$

где P – протекающая по линии активная мощность, Вт; Q – протекающая по линии реактивная мощность, Вар; U – напряжение питания линии, В; R – сопротивление линии электропередачи, Ом.

Если у потребителя установить компенсирующее устройство ($Q_k \neq 0$), то потери мощности уменьшаются до величины

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} R. \quad (2)$$

Таким образом, с помощью устройств компенсации реактивной мощности можно снизить потери активной мощности в схеме электроснабжения и, следовательно, улучшить технико-экономические показатели применяемой схемы электропитания [14–16].

Из выражений (1), (2) видно, что потери мощности ΔP имеют две составляющие: потери от протекания по линии активной мощности P и потери от протекания по линии реактивной мощности Q , т.е. $(Q - Q_k)$. С учетом того, что компенсация реактивной мощности влияет только на вторую составляющую потерь, в работе рассматриваем только потери активной мощности от протекания по кабельным линиям реактивной мощности. Для рассматриваемого участка системы электроснабжения требуемая суммарная мощность компенсирующих устройств Q_k задается с помощью коэффициента мощности, который должен быть обеспечен в заданной точке. В этом случае определенную требуемую реактивную мощность Q_k следует оптимальным образом распределить внутри рассматриваемой радиальной схемы электроснабжения.

Математическая модель задачи оптимизации состоит из целевой функции, ограничений и граничных условий. Целевая функция – это математическая запись критерия оптимальности, т.е.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 \frac{R_i}{U^2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Q_{ki} – искомые значения мощностей конденсаторных установок; n – число источников реактивной мощности. Анализ выражения целевой функции показывает, что она является нелинейной, поэтому задача оптимизации также нелинейная.

Ограничением является требуемое значение величины реактивной мощности Q_k , необходимое для обеспечения заданного коэффициента мощности,

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k. \quad (4)$$

Граничные условия определяют диапазон изменения значений реактивной мощности конденсаторных установок, применительно к рассматриваемой задаче они должны быть неотрицательными:

$$Q_{ki} > 0. \quad (5)$$

Простейшими нелинейными оптимизационными задачами являются задачи безусловной оптимизации. В них экстремальное значение целевой функции находится без ограничений и граничных условий. В нашем случае имеем задачу условной оптимизации. Нелинейные оптимизационные задачи могут быть решены градиентными методами, такими как метод скорейшего спуска, градиентный метод с постоянным шагом, метод покоординатного спуска, метод проектирования градиента, но все они предполагают значительный объем вычислений. Отличительным достоинством метода Лагранжа является возможность решить задачу условной оптимизации через более простую задачу безусловной оптимизации [17].

Решение задачи оптимизации. Рассмотрим решение задачи условной оптимизации для радиальной схемы электроснабжения группы насосов технологической установки, работающих в продолжительном режиме с постоянной и плавно меняющейся нагрузкой. Приводные асинхронные электродвигатели насосов M_1, M_2, M_3, M_4 , которые потребляют реактивную мощность Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , запитываются с помощью кабельных линий от распределительного пункта напряжением

$U = 380$ В. Примем значения активных сопротивлений линий, питающих асинхронные двигатели, равными R_1, R_2, R_3, R_4 . Однолинейная схема электроснабжения технологической установки показана на рис. 1. В помещении, где установлено насосное оборудование, есть возможность подключить к каждому асинхронному двигателю устройство компенсации реактивной мощности (УКРМ) Q_{ki} .

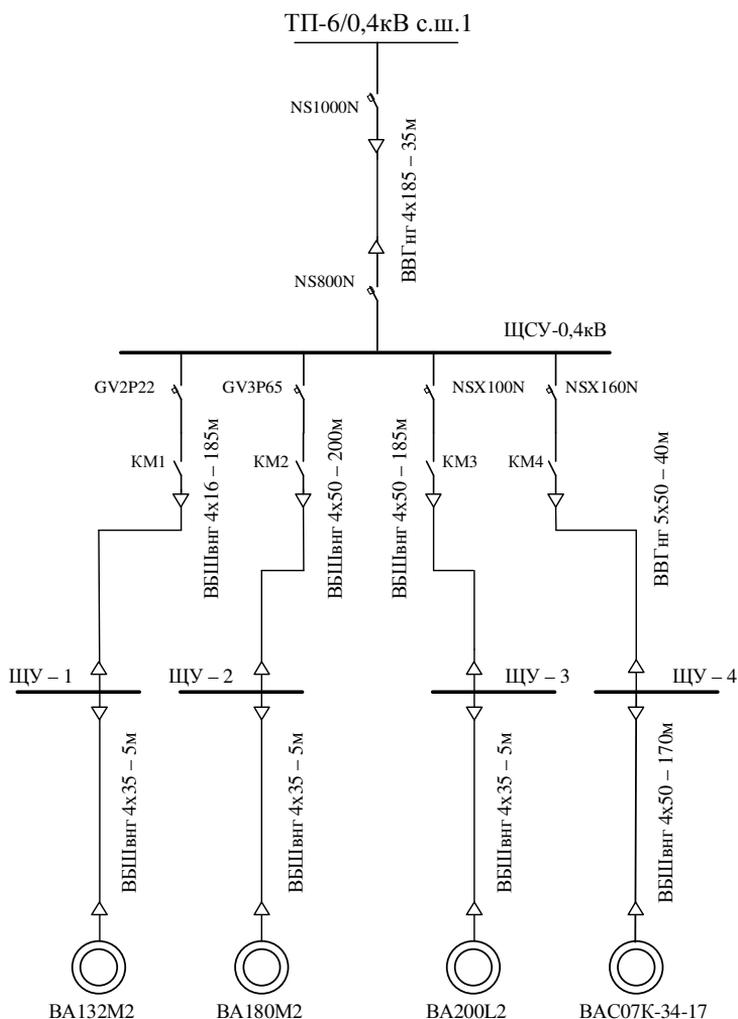


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения приводных двигателей

Найдем оптимальное распределение заданной суммарной мощности компенсирующих устройств Q_k , соответствующей $\text{tg}\phi = 0,35$ на шинах ЩСУ-0,4 кВ, между четырьмя асинхронными двигателями.

В качестве критерия оптимальности используем минимум потерь активной мощности от протекания реактивной мощности в радиальной схеме электроснабжения группы насосов технологической установки.

Целевая функция представляет собой потери активной мощности при протекании по кабельным линиям реактивной мощности:

$$\Delta P = (Q_1 - Q_{к1})^2 \frac{R_1}{U^2} + (Q_2 - Q_{к2})^2 \frac{R_2}{U^2} + (Q_3 - Q_{к3})^2 \frac{R_3}{U^2} + (Q_4 - Q_{к4})^2 \frac{R_4}{U^2} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Ограничение, при котором будем находить относительный минимум целевой функции, имеет вид:

$$Q_{к1} + Q_{к2} + Q_{к3} + Q_{к4} - Q_{к} = 0. \quad (7)$$

Составленная функция Лагранжа:

$$L = \frac{1}{U^2} \left[(Q_1 - Q_{к1})^2 R_1 + (Q_2 - Q_{к2})^2 R_2 + (Q_3 - Q_{к3})^2 R_3 + (Q_4 - Q_{к4})^2 R_4 \right] + \lambda (Q_{к1} + Q_{к2} + Q_{к3} + Q_{к4} - Q_{к}) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Для нахождения минимума функции L вычисляются ее частные производные и приравниваются к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial Q_{к1}} = -\frac{2}{U^2} R_1 (Q_1 - Q_{к1}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к2}} = -\frac{2}{U^2} R_2 (Q_2 - Q_{к2}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к3}} = -\frac{2}{U^2} R_3 (Q_3 - Q_{к3}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{к4}} = -\frac{2}{U^2} R_4 (Q_4 - Q_{к4}) + \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = Q_{к1} + Q_{к2} + Q_{к3} + Q_{к4} - Q_{к} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В результате решения полученной системы линейных уравнений (9) находим оптимальные значения реактивных мощностей компенсирующих устройств $Q_{к1}$, $Q_{к2}$, $Q_{к3}$, $Q_{к4}$, а также множитель Лагранжа λ , затем находим минимум активных потерь ΔP от протекания по линиям реактивной мощности.

Система уравнений (9) является системой линейных алгебраических уравнений. Решение систем линейных алгебраических уравнений

полностью исследовано. Для решения систем линейных уравнений (СЛУ), где число неизвестных равняется числу уравнений, применяются формулы Крамера и матричный метод, а также метод Гаусса. В качестве ограничений матричных методов отметим отличие от нуля определителя основной матрицы, так как в противном случае система уравнений решений не имеет. В отличие от этих методов метод Гаусса может быть применен к системам линейных уравнений с произвольным числом уравнений и неизвестных. Он наиболее универсален и практически не имеет ограничений. При определителе, стремящемся к нулю, можно получить плохо обусловленную систему, для решения которой разработан очень эффективный метод, называемый регуляризацией. Количество арифметических операций в методе Гаусса зависит от размерности системы, при больших n ($n > 100$) общее количество операций примерно равно $2/3n^3$.

Для решения СЛУ методом Крамера необходимо найти $(n+1)$ определитель n -го порядка и еще произвести n делений. При решении матричным методом приходится находить один определитель n -го порядка, n^2 определителей $(n-1)$ порядка и произвести n^2 делений. Как видим, для этих двух методов характерно большое количество операций, которое резко возрастает с увеличением числа n .

Итак, каждый из рассмотренных методов решения систем линейных уравнений предусматривает неоднократное выполнение одних и тех же операций с различным числом данных. Поэтому используемые математические операции можно без особых трудностей представить в виде алгоритмов и перевести на определенный язык программирования. Хотим отметить, что недостатком метода Гаусса в сравнении с методом Крамера является то, что решение системы уравнений получается последовательно, после нахождения каждого неизвестного. В методе Крамера неизвестные величины находятся сразу в результате нахождения двух соответствующих определителей.

Тем не менее метод Гаусса лёгок в программировании по сравнению с матричным методом, который так же позволяет найти массив неизвестных путём умножения матриц, но он сложен в плане создания правильных условий в процессе программирования. Анализируя методы решения системы уравнения (9), авторы пришли к выводу, что

в случае решения задачи оптимизации для числа объектов более пяти, следует использовать метод Гаусса для закладывания алгоритма решения в микроконтроллер. Это позволит повысить быстродействие системы управления при переходных процессах.

Решая полученную систему уравнений, например методом Крамера, находятся определители пятого порядка:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2R_2}{U^2} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{2R_3}{U^2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} Q_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2R_2}{U^2} Q_2 & \frac{2R_2}{U^2} & 0 & 0 & 1 \\ \frac{2R_3}{U^2} Q_3 & 0 & \frac{2R_3}{U^2} & 0 & 1 \\ \frac{2R_4}{U^2} Q_4 & 0 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} & 1 \\ Q_k & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} & \frac{2R_1}{U^2} Q_1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2R_2}{U^2} Q_2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2R_3}{U^2} Q_3 & \frac{2R_3}{U^2} & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2R_4}{U^2} Q_4 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} & 1 \\ 1 & Q_k & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \Delta_3 = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} & 0 & \frac{2R_1}{U^2} Q_1 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2R_2}{U^2} & \frac{2R_2}{U^2} Q_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{2R_3}{U^2} Q_3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} Q_4 & \frac{2R_4}{U^2} & 1 \\ 1 & 1 & Q_k & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad (10)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} & 0 & 0 & \frac{2R_1}{U^2} Q_1 & 1 \\ 0 & \frac{2R_2}{U^2} & 0 & \frac{2R_2}{U^2} Q_2 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{2R_3}{U^2} & \frac{2R_3}{U^2} Q_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} Q_4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & Q_k & 0 \end{vmatrix}; \Delta_5 = \begin{vmatrix} \frac{2R_1}{U^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2R_1}{U^2} Q_1 \\ 0 & \frac{2R_2}{U^2} & 0 & 0 & \frac{2R_2}{U^2} Q_2 \\ 0 & 0 & \frac{2R_3}{U^2} & 0 & \frac{2R_3}{U^2} Q_3 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2R_4}{U^2} & \frac{2R_4}{U^2} Q_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & Q_k \end{vmatrix}.$$

После этого определяем оптимальные значения мощностей УКРМ $Q_{к1}, Q_{к2}, Q_{к3}, Q_{к4}$:

$$Q_{к1} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; Q_{к2} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; Q_{к3} = \frac{\Delta_3}{\Delta}; Q_{к4} = \frac{\Delta_4}{\Delta}; \lambda = \frac{\Delta_5}{\Delta}. \quad (11)$$

При решении задачи оптимального распределения заданной суммарной реактивной мощности между компенсирующими устройствами в математической модели необходимо учитывать следующие факторы. Как правило, на предприятиях нефтехимической отрасли асинхронные двигатели работают продолжительно с неполной загрузкой. В связи с этим необходимо знать величины активной и реактивной мощностей двигателей с учетом коэффициента загрузки. Кроме того, при определении активных сопротивлений R_i должны быть учтены все элементы трехфазной линии электропередачи на участке от двигателя до шин ЩСУ-0,4 кВ [18–20].

Решение задачи оптимального распределения мощности компенсирующих устройств по критерию минимума потерь в линиях 0,4 кВ при обеспечении $\text{tg}\phi = 0,35$ на шинах ЩСУ-0,4 кВ получено для четырех случаев: номинального режима работы технологической насосной (табл. 1), фактического режима работы (табл. 2) и для плавно изменившейся нагрузки двигателей максимальной (табл. 3) и минимальной мощности (табл. 4). Изменение коэффициента загрузки приводного двигателя в задаче оптимизации приводит к тому, что изменяется фактическая потребляемая реактивная мощность, что приводит к изменению оптимальных значений мощности компенсирующих устройств.

Таблица 1

Технические характеристики асинхронных двигателей

№ п/п	Тип	I_n , А	K_3	P_ϕ , кВт	$\text{tg}\phi_\phi$	Q_ϕ , кВар	$Q_{\text{опт}}$, кВар
1	ВА180М2	52,9	1	32,58	0,51	16,70	4,7
2	ВА132М2	20,2	1	12,30	0,54	6,64	0,3
3	ВА200L2	77,3	1	48,14	0,48	23,31	10,8
4	ВАС07К-37-14	76,3	1	40,66	0,83	33,69	19,1

Таблица 2

Технические характеристики асинхронных двигателей

№ п/п	Тип	I_n , А	K_3	P_ϕ , кВт	$\text{tg}\phi_\phi$	Q_ϕ , кВар	$Q_{\text{опт}}$, кВар
1	ВА180М2	52,9	0,73	23,8	0,61	14,54	7,1
2	ВА132М2	20,2	0,8	9,74	0,62	6,00	1,7
3	ВА200L2	77,3	0,86	41,3	0,53	21,74	13,4
4	ВАС07К-37-14	76,3	0,7	28,16	1,01	28,45	21,2

Таблица 3

Технические характеристики асинхронных двигателей

№ п/п	Тип	I_n , А	K_3	P_{Φ} , кВт	$\text{tg}\varphi_{\Phi}$	Q_{Φ} , кВар	$Q_{\text{опт}}$, кВар
1	BA180M2	52,9	0,73	23,80	0,61	14,54	9,5
2	BA132M2	20,2	0,8	9,74	0,62	6,00	2,9
3	BA200L2	77,3	0,3	14,93	1,19	17,84	15,3
4	VAC07K-37-14	76,3	0,7	28,16	1,01	28,45	23,6

Таблица 4

Технические характеристики асинхронных двигателей

№ п/п	Тип	I_n , А	K_3	P_{Φ} , кВт	$\text{tg}\varphi_{\Phi}$	Q_{Φ} , кВар	$Q_{\text{опт}}$, кВар
1	BA180M2	52,9	0,73	23,80	0,61	14,54	7,6
2	BA132M2	20,2	0,35	4,34	1,18	5,10	1,9
3	BA200L2	77,3	0,86	41,31	0,53	21,74	13,9
4	VAC07K-37-14	76,3	0,7	28,16	1,01	28,45	21,6

Результаты. Для указанных выше четырех случаев загрузки асинхронных двигателей были рассчитаны потери в линиях 0,4 кВ для схемы электроснабжения, приведенной на рис. 1, от протекания реактивных токов для случая оптимального распределения компенсирующих устройств непосредственно у асинхронных двигателей $\Delta P_{Q_{\text{опт}}}$, от протекания реактивных токов без устройств компенсации реактивной мощности ΔP_Q , а также суммарные активные потери в линиях 0,4 кВ без компенсации реактивной мощности ΔP_{Σ} . Результаты расчета приведены в табл. 5. Очевидно, что применение результатов решения рассмотренной оптимизационной задачи позволит значительно снизить потери от протекания реактивных токов и суммарные потери в целом.

Таблица 5

Результаты расчета потерь в линиях 0,4 кВ

Режим загрузки АД	$\Delta P_{Q_{\text{опт}}}$, кВт	ΔP_Q , кВт	ΔP_{Σ} , кВт
1-й случай – номинальная нагрузка	1,21	4,19	12,65
2-й случай – фактический режим работы	0,71	3,99	7,98
3-й случай – минимальная нагрузка АД наибольшей мощности	0,38	3,88	4,78
4-й случай – минимальная нагрузка АД наименьшей мощности	0,64	3,96	7,59

Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что значительно снижаются потери активной мощности от протекания реактивной мощности и, как следствие, снижаются активные

потери в линиях 0,4 кВ, силовых трансформаторах и вышестоящих элементах системы электроснабжения в целом.

В настоящее время авторами разрабатывается автоматизированный электротехнический комплекс группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств в рамках работ по целевому Гранту, предоставленному ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан», и проводятся исследования снижения активных потерь при передаче электроэнергии по протяженным кабельным линиям к электроприводам производственных механизмов.

На рис. 2 представлена принципиальная схема разработанного автоматизированного электротехнического комплекса группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств для группы насосов технологической установки. Элементы автоматизированного комплекса по их назначению можно разделить на функциональные группы. Блоки измерения БИ1 – БИ5 выполняют измерительную функцию. Основная их задача – измерение значений линейных напряжений и фазного тока на каждом из потребителей, а также на шинах распределительного устройства. На основе измерений формируются выходные данные – действующие значения фазного тока и потребляемой потребителями трехфазной реактивной мощности.

Собранная блоками измерения информация по цифровой шине данных передается на следующий блок БСД – блок сбора данных, который выполняет функцию систематизации и упорядочения данных. Также наличие блока БСД позволяет легко и быстро наращивать количество электроприемников и компенсирующих устройств в электротехническом комплексе. Блок сбора данных передает систематизированные данные на блок БРМ – блок расчета требуемой мощности конденсаторных батарей. Данный блок выполняет функцию обработки данных, производя расчет величины мощности конденсаторных батарей каждого электроприемника, участвующего в комплексе. Результаты расчетов в виде управляющего задания через блок БСД передаются на УКРМ – устройства компенсации реактивной мощности, выполняющие исполнительную функцию – компенсацию реактивной мощности.

Роль блока БРМ может взять на себя персональный компьютер. При небольшом количестве электроприемников в группе функции блока сбора данных БСД и блока расчета реактивной мощности БРМ могут быть объединены в одном устройстве.

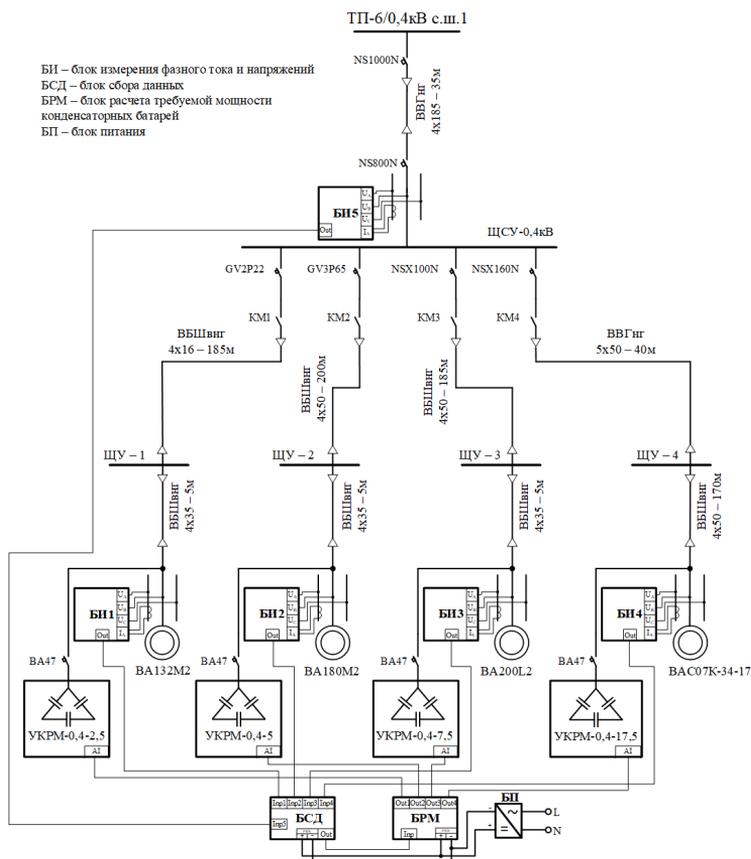


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизированного электротехнического комплекса группы асинхронных электродвигателей с оптимальным распределением мощности компенсирующих устройств

Более того, существует возможность реализации комплекса на основе существующей системы АСКУЭ, в которой телеметрия собирает информацию с каждого потребителя с помощью многофункциональных измерительных приборов, далее эта информация собирается на УСПД, а функции блока БРМ выполняются на автоматизированном рабочем месте (АРМ) диспетчера.

Библиографический список

1. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 234 с.
2. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.

3. Радкевич В.Н., Тарасова М.Н. Оценка снижения потерь активной мощности в трансформаторах при установке батарей низковольтных конденсаторов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 5. – С. 27–37.

4. Радкевич В.Н., Тарасова М.Н. Оценка степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 1. – С. 5–13.

5. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практ. расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

7. Киреева Э.А., Юнес Т., Айюби М. Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 320 с.

8. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Высшая школа, 1990. – 363 с.

9. Тумаева Е.В., Кузин С.С. Минимизация потерь активной мощности в кабельных линиях электропередачи 0,4 кВ на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки // Вестник Чуваш. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 154–160.

10. Tumaeva E.V., Kuzin S.S., Gavrillov E.N. Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0,4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643. – No. 1. – 012100.

11. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 128 с.

12. Ашманов С.А., Тимохов А.В. Теория оптимизации в задачах и упражнениях: учеб: пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 448 с.

13. Тумаева Е.В., Попов А.В. Алгоритм расчета оптимальных токов моментного вентильного двигателя в установившемся режиме работы // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2011. – Т. 46. – № 19. – С. 86–91.

14. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

15. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: метод. пособие для курсового проектирования. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2010. – 214 с.

16. Климов Г.Н. Элементы энергоснабжения в электроснабжении промышленных предприятий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 187 с.

17. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях // Вопросы электромеханики. – 2014. – № 1. – С. 43–50.

18. Белявский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 6. – С. 66–69.

19. Ефременко В.М., Белявский Р.В. О влиянии параметров асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности и потери электрической энергии // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 76–79.

20. Zatsepin E.P. Informational and measuring system for EAF // Сталь. – 2004. – № 3. – С. 23–27.

References

1. Kabyshev A.V. Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriatii [Compensation of reactive power in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2012, 234 p.

2. Zhelezko Iu.S. Kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Reactive power compensation and power quality improvement]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 224 p.

3. Radkevich V.N., Tarasova M.N. Otsenka snizheniia poter' aktivnoi moshchnosti v transformatorakh pri ustanovke batarei nizkovol'tnykh kondensatorov [Assessment of reducing active power losses in transformers when installing low-voltage capacitor banks]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2014, no. 5, pp. 27-37.

4. Radkevich V.N., Tarasova M.N. Otsenka stepeni snizheniia poter' aktivnoi moshchnosti v liniiah elektroperedachi pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Assessment of the degree of reduction of active power losses in power lines with reactive power compensation]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 5-13.

5. Kudrin B.I. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii* [Power supply to industrial enterprises]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2006, 672 p.

6. Zhelezko Iu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlia prakticheskikh raschetov* [Power losses. Reactive power. Power Quality: Manual for Practical Calculations]. Moscow: ENAS, 2009, 456 p.

7. Kireeva E.A., Iunes T., Aiiubi M. *Avtomatizatsiia i ekonomiia elektroenergii v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniia* [Automation and energy savings in industrial power supply systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1998, 320 p.

8. Lipkin B.Iu. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii i ustanovok* [Power supply to industrial enterprises and installations]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1990, 363 p.

9. Tumaeva E.V., Kuzin S.S. *Minimizatsiia poter' aktivnoi moshchnosti v kabel'nykh liniiax elektroperedachi 0,4 kV na predpriatiiakh neftekhimii i neftepererabotki* [Minimization of active power losses in 0,4 kV cable power lines at petrochemical and oil refining enterprises]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 154-160.

10. Tumaeva E.V., Kuzin S.S., Gavrilov E.N. *Minimization of active capacity losses in cable power lines of 0,4 kV using optimally distributed compensating devices at petrochemical and oil refining enterprises. IOP Conference Series: Materials Science and Engeneering*, 2019, vol. 643, no. 1, 012100.

11. Kostin V.N. *Optimizatsionnye zadachi elektroenergetiki* [Optimization tasks of the electric power industry]. Saint Petersburg: Severo-Zapadnyi gosudarstvennyi zaochnyi tekhnicheskii universitet, 2006, 128 p.

12. Ashmanov S.A., Timokhov A.V. *Teoriia optimizatsii v zadachakh i uprazhneniiax* [Optimization Theory in Tasks and Exercises]. Saint Petersburg: Lan', 2012, 448 p.

13. Tumaeva E.V., Popov A.V. *Algoritm rascheta optimal'nykh tokov momentnogo ventil'nogo dvigatel'ia v ustanovivshemsia rezhime raboty* [Algorithm for calculating the optimal currents of the torque valve motor in the steady state operation]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, vol. 46, no. 19, pp. 86-91.

14. Krasnik V.V. *Avtomaticheskie ustroistva po kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v elektrosetiakh predpriatii* [Automatic devices for reactive power compensation in electrical networks of enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 136 p.

15. Shekhovtsov V.P. Raschet i proektirovanie skhem elektrosnabzheniia [Calculation and design of power supply diagrams]. Moscow: Forum: INFRA-M, 2010, 214 p.

16. Klimov G.N. Elementy energosnabzheniia v elektrosnabzhenii promyshlennykh predpriatii [Elements of power supply in power supply of industrial enterprises]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2008, 187 p.

17. Karagodin V.V., Rybakov D.V. Optimizatsiia razmeshcheniia ustroystv kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setiakh [Optimization of placement of reactive power compensation devices in electrical distribution networks]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2014, no. 1, pp. 43-50.

18. Beliavskii R.V. Analiz vliianiia koefitsienta zagruzki asinkhronnykh dvigatelei na potreblenie reaktivnoi moshchnosti [Analysis of the influence of the load factor of induction motors on the consumption of reactive power]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 6, pp. 66-69.

19. Efremenko V.M., Beliavskii R.V. O vlianii parametrov asinkhronnykh dvigatelei na potreblenie reaktivnoi moshchnosti i poteri elektricheskoi energii [On the influence of the parameters of asynchronous motors on the consumption of reactive power and the loss of electrical energy]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 76-79.

20. Zatsepin E.P. Informational and measuring system for EAF. *Stal'*, 2004, no. 3, pp. 23-27.

Сведения об авторах

Тумаева Елена Викторовна (Нижнекамск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Электротехника и энергообеспечение предприятий» Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета (423578, Нижнекамск, пр. Строителей, 47, e-mail: e.tumaeva@mail.ru).

Кузин Станислав Сергеевич (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68, e-mail: stanislav_kuzin@mail.ru).

Афлятунов Ильдар Фаатович (Нижнекамск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и энергообеспечение предприятий» Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета (423578, Нижнекамск, пр. Строителей, 47, e-mail: aif_69@inbox.ru).

Макусева Татьяна Гавриловна (Нижнекамск, Россия) – кандидат педагогических наук, доцент цикла физико-математических дисциплин Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета (423578, Нижнекамск, пр. Строителей, 47, e-mail: makuseva2008@yandex.ru).

About authors

Tumaeva Elena Viktorovna (Nizhnekamsk, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute (branch) of the Kazan National Research Technological University (423578, Nizhnekamsk, 47, Stroiteley ave., e-mail : e.tumaeva@mail.ru).

Kuzin Stanislav Sergeevich (Kazan, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Electric Drive and Electrical Engineering, Kazan National Research Technological Institute (420015, Kazan, 68, Karl Marx str., e-mail: stanislav_kuzin@mail.ru).

Aflyatunov Ildar Faatovich (Nizhnekamsk, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute (branch) of the Kazan National Research Technological University (423578, Nizhnekamsk, 47, Stroiteley ave., e-mail: aif_69@inbox. ru).

Makuseva Tatyana Gavrilovna (Nizhnekamsk, Russian Federation) is a Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the cycle of physical and mathematical disciplines of the Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) of the Kazan National Research Technological University (423578, Nizhnekamsk, 47, Stroiteley ave., e-mail: makuseva2008@yandex.ru).

Получено 07.10.2020