

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е.И. Грачева, И.И. Ильясов, А.Н. Алимова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье представлено сравнительное исследование и анализ некоторых наиболее распространенных методов расчета потерь электроэнергии с выявлением основных достоинств и недостатков, присущих каждому из рассматриваемых методов. Предложена классификация основных детерминированных и вероятностно-статистических методов оценки потерь электроэнергии в зависимости от способа получения исходных данных, используемой математической модели и от режима получения исходных данных. Определены области использования методов расчета потерь в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчета. Выявлены основные особенности и разработаны рекомендации по применению вероятностных и детерминированных методов.

Ключевые слова: потеря электроэнергии, детерминированный метод, вероятностно-статистический метод, достоинство и недостаток, погрешность расчета.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-62-71

THE COMPARATIVE ANALYSIS AND RESEARCH OF METHODS OF CALCULATION OF LOSSES OF THE ELECTRIC POWER IN THE SYSTEMS OF ELECTRICAL POWER SUPPLY OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES

E.I. Gracheva, I.I. Ilyasov, A.N. Alimova

Kazan state energetic university, Kazan, Russia

Abstract: In article the comparative research and the analysis of some most widespread methods of calculation of losses of the electric power with detection of the main merits and demerits inherent in each of the considered methods is provided. Classification of the mains determined, and probable statistical techniques of a loss estimate of the electric power depending on a method of receiving basic data is offered, to the used mathematical model and from the mode of receiving basic data. The fields of use of methods of calculation of losses depending on the initial information, the accepted assumptions and the possible expected calculation errors are defined. The key features are revealed and recommendations about application of the probable and determined methods are developed.

Keywords: loss of the electric power, the determined method, probable statistical technique, advantage and shortcoming, calculation error.

Введение

В связи с развитием рыночных отношений в области электроэнергетики значимость проблемы определения потерь электроэнергии заметно возросла, так как стоимость потерь является одной из составляющих тарифа на электроэнергию (ЭЭ). Точное определение уровня потерь ЭЭ является одной из важных составляющих общего комплекса энергосберегающих мероприятий на промышленном предприятии.

Цель анализа состоит в выявлении основных достоинств и недостатков некоторых методов определения потерь ЭЭ в сетях промышленного электроснабжения, а также в классификации данных методов в зависимости от объема исходной информации и режима ее получения.

Сравнительный анализ методов расчета потерь электроэнергии

Задачей исследования является сравнительный анализ методов определения потерь ЭЭ, составление их классификации, выявление достоинств и недостатков данных методов, выдача рекомендаций по применению тех или иных методов расчёта, а также определение области применения рассмотренных методов определения потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчёта.

На данный момент можно выделить следующие два способа определения расходов ЭЭ в промышленных сетях 0,4 кВ – это расчётный и экспериментальный. Экспериментальный способ определения расхода ЭЭ не пользуется популярностью, так как имеет ряд недостатков [2; 3]:

- для достижения результата необходима установка значительного количества измерительных комплексов (ИК);
- трудоемкость процесса получения информации;
- длительность исследований;
- неустойчивость результатов при модернизации оборудования;
- относительно большие материальные затраты;
- необходимость обработки полученных данных;
- погрешность измерительных приборов и ИК;
- погрешность снятия показаний (человеческий фактор).

Таким образом, широкое распространение получили расчётные методы определения нагрузочных потерь ЭЭ. Предлагаемая классификация методов расчёта потерь ЭЭ показана на рис.

Классификация методов расчёта потерь электроэнергии

Выделяют детерминированные и вероятностно-статистические методы расчёта потерь ЭЭ в сетях промышленного электроснабжения 0,4 кВ. К детерминированным относятся следующие методы.

Метод поэлементного расчёта [1] использует следующую формулу:

$$\Delta W_H = 3 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k R_i \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2,$$

где k – число элементов сети; I_{ij} – токовая нагрузка элемента сопротивлением R_i в момент времени j ; Δt – периодичность опроса датчиков, фиксирующих токовые нагрузки элементов.

Исходная информация поступает по данным телеизмерений. Наиболее сложной и неоднозначной проблемой формирования исходной информации является определение независимых параметров текущего режима сети, что связано с проблемой оснащения устройствами телеметрии всех потребителей ЭЭ. То есть реализация поэлементного расчёта в реальном времени возможна только в случае автоматизации расчёта потерь мощности и

ЭЭ в сетях 0,4 кВ. Однако данный метод позволяет получить наиболее достоверные результаты, так как учитывает характер изменения параметров режима.

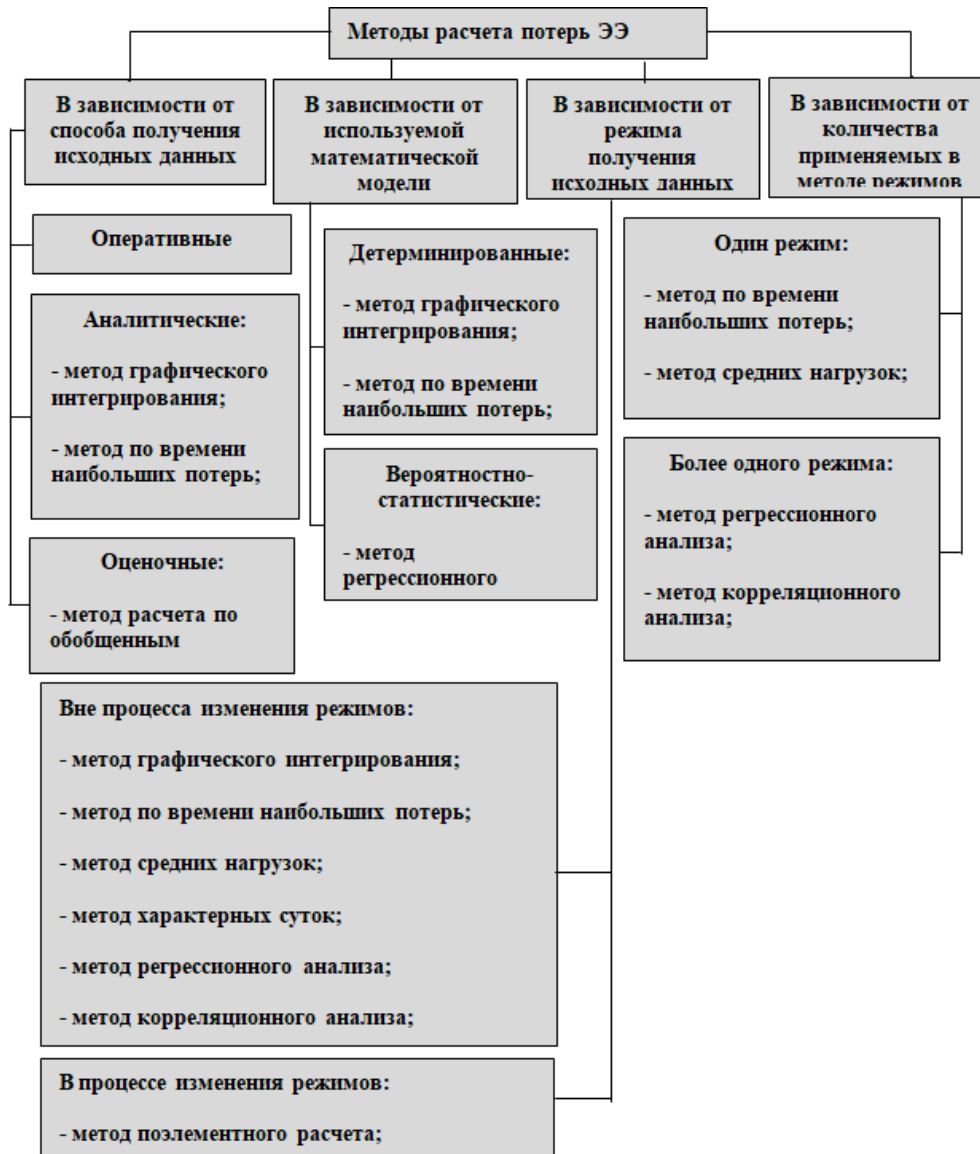


Рис. Классификация методов расчета потерь электроэнергии

Метод по времени наибольших потерь τ [1–3] использует следующую формулу:

$$\Delta W_H = \tau \cdot \Delta P_{нб},$$

где ΔP – потери мощности в режиме максимальной нагрузки сети; τ – время наибольших потерь.

Этот метод основан на расчёте потерь мощности в одном режиме максимальной нагрузки и умножения значения на число часов максимальных потерь τ . Значение τ рассчитывается по графику нагрузки. Процесс расчёта данным методом не связан по

времени с реальным режимом сети, что позволяет решать задачи анализа потерь, выбора мероприятий по их снижению, разработке нормативной характеристики потерь ЭЭ.

Метод средних нагрузок [4]. Данный метод является одним из информационно-достоверных методов определения потерь ЭЭ. Технологически он близок к методу τ и исходит из определения потерь мощности только в одном режиме средних нагрузок. Потери ЭЭ определяются по формуле

$$\Delta W_H = T \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot k_{\Phi}^2,$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ – потери мощности в сети при средних нагрузках узлов (или сети в целом) за время T ; k_{Φ} – коэффициент формы графика мощности или тока.

Метод характерных суток [4]. Данный метод использует те же данные, что и метод средних нагрузок, а также данные замеров суточных графиков нагрузки в узлах в зимний и(или) летний день контрольных замеров. Потери ЭЭ определяются по следующей формуле:

$$\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_{\text{ни}}^C \cdot D_{\text{эки}},$$

где m – число характерных суток, потери ЭЭ за каждым из которых, рассчитанные по известным значениям графика нагрузки в узлах сети, составляют $\Delta W_{\text{ни}}^C$; $D_{\text{эки}}$ – эквивалентная продолжительность в году i -го характерного графика (число суток).

Достоинством данного метода является достоверность исходной информации, так как данные посуточного энергопотребления регистрируются на уровне диспетчерской службы.

Метод расчёта по обобщенным параметрам сети [1]. Данный метод заключается в расчёте потерь ЭЭ на основе зависимостей потерь от суммарной длины и количества линий, а также суммарной мощности, полученных на основе проектной документации или статистических данных.

$$\Delta W_F = 9,3 \cdot \frac{W_F^2 \cdot (1 + \text{tg}^2 \varphi) \cdot k_{\Phi}^2 \cdot L_F}{N_F \cdot D \cdot F} \cdot k_{\text{нec}} \cdot k_{\text{отв}} \cdot k_L \cdot k_N,$$

где ΔW_F – суммарная энергия, отпускаемая в N_F линии сечением головных участков F и суммарной длиной L_F за D дней; k_{Φ}^2 – коэффициент формы графика нагрузки; k_N – повышающий коэффициент, учитывающий неодинаковость плотностей тока на головных участках различных линий; k_L – коэффициент, учитывающий влияние на потери распределенности нагрузок вдоль линии; $k_{\text{нec}}$ – коэффициент увеличения потери явления с несимметричной нагрузкой фаз; $k_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий наличие ответвлений.

Среди вероятностно-статистических можно выделить следующие наиболее распространённые методы определения потерь ЭЭ:

Метод регрессионного анализа [3]. В данном методе необходим исходный объем статистической информации о потерях и воздействующих факторах, также необходимы параметры элементов сети и параметры режима. Расчёт потерь ЭЭ производится на основании суммирования почасовых значений потерь мощности и определяется по выражению

$$\Delta W_{\Delta T} = \sum_{i=1}^{\Delta T / \Delta t} \Delta P_i \cdot \Delta t = b_0 \cdot \Delta t + \sum_{k=1}^{\Phi} b_k \cdot W_k + \sum_{k=1}^{\Phi} b_{kk} \cdot \sum_{i=1}^{\Delta T / \Delta t} P_{ki}^2 \cdot \Delta t_i,$$

где $\Delta W_{\Delta T}$ – потери ЭЭ за время ΔT ; Δt – интервал замера, обычный равный одному часу; W_k – ЭЭ за период ΔT для k -го фактора, входящего в уравнение регрессии; ΔP_i – потери мощности в i -й час; P_{ki} – мощность для k -го фактора в i -й час расчётного периода; b_0, b_k, b_{kk} – коэффициенты уравнения регрессии; Φ – число факторов.

Метод регрессионного анализа позволяет получить уравнения регрессии, связывающие потери с воздействующими факторами. Недостатком является то, что информация о параметрах режима является неполной и ограниченно-достоверной (аппаратура, на которой производятся замеры, даёт определённую погрешность; замеры производятся не одновременно на всех подстанциях).

Метод корреляционной связи [3]. Исходными данными являются основные влияющие факторы, их число, статистические данные. Данный метод основан на уравнении корреляционной связи:

$$\Delta W = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_m \cdot X_m + \varepsilon,$$

где m – число основных влияющих факторов; X – влияющие факторы; ε – доля потерь ЭЭ, зависящая от второстепенных факторов.

Данный метод позволяет выявить четыре-пять основных влияющих факторов. Влияя на данные значимые факторы (т.е. проводя мероприятия по снижению потерь ЭЭ), можно добиться снижения потерь ЭЭ.

Метод случайной выборки [3]. Потери ЭЭ во всех N линиях определяют по формуле

$$M[\Delta W_N] = M[\Delta W_1] \cdot N,$$

где $M[\Delta W_1]$ – математическое ожидание потерь в одной линии.

Данный метод используется, например, при необходимости определения суммарных потерь в N линиях на основании непосредственного расчёта потерь только в части из них. При этом общее число линий называют генеральной совокупностью, а рассчитываемую часть – выборкой. Задача формулируется следующим образом: определить минимальный объём выборки, достаточный для определения математического ожидания потерь с заданной точностью и достоверностью.

Достоинства и недостатки некоторых методов определения потерь ЭЭ представлены в табл. 1 [5; 6].

Таблица 1

Достоинства и недостатки методов расчёта потерь		
Метод расчёта потерь электроэнергии	Достоинства	Недостатки
Детерминированные методы		
<p>Метод поэлементного расчёта</p> $\Delta W_H = 3 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^k R_i \sum_{j=1}^{T/\Delta t} I_{ij}^2$	<p>Позволяет учитывать характер изменения параметров режима, а также позволяет получить наиболее достоверные результаты</p>	<p>Необходимо оснащение устройствами всех потребителей ЭЭ, невозможен учет фактического сопротивления проводов</p>
<p>Метод по времени наибольших потерь</p> $\Delta W_H = \tau \cdot \Delta P_{нб}$	<p>Позволяет решать задачи анализа потерь, выбора мероприятий по их снижению, разработки нормативных характеристик потерь ЭЭ</p>	<p>Низкая достоверность в определении τ</p>

<p>Метод средних нагрузок $\Delta W_H = T \cdot \Delta P_{\text{ср}} \cdot k_{\Phi}^2,$</p>	<p>Позволяет учесть форму графика нагрузки</p>	<p>Необходимо оснащение устройствами телеметрии всех потребителей ЭЭ</p>
<p>Метод характерных нагрузок $\Delta W_H = \sum_{i=1}^m \Delta W_{ni}^C \cdot D_{\text{эки}},$</p>	<p>Достоверность исходной информации</p>	<p>Расчет возможен только при наличии телеинформации о нагрузках</p>
<p>Метод расчета по обобщенным параметрам сети $\Delta W_F = 9,3 \cdot \frac{W_F^2 \cdot (1 + \text{tg}^2 \varphi) \cdot k_{\Phi}^2 \cdot L_F}{N_F \cdot D \cdot F} \cdot k_{\text{нсс}} \cdot k_{\text{отв}} \cdot k_L \times k_N,$</p>	<p>Позволяет охарактеризовать схемы сетей количественными показателями, легко определяемыми на основе объективных данных</p>	<p>Идеализированная схема не всегда соответствует реальной и её анализ более трудоёмок, чем ввод реальной схемы в компьютер для проведения точного расчета</p>
<p>Вероятностно-статистические методы</p>		
<p>Метод регрессионного анализа $\Delta W_{\Delta T} = \sum_{i=1}^{\Phi} \frac{\Delta T}{\Delta t} \Delta P_i \cdot \Delta t = b_0 \cdot \Delta t + \sum_{k=1}^{\Phi} b_k \cdot W_k + \sum_{k=1}^{\Phi} b_{kk} \cdot \sum_{i=1}^{\Phi} \frac{\Delta T}{\Delta t} P_{ki}^2 \cdot \Delta t_i,$</p>	<p>Позволяет получить уравнение регрессии, связывающее потери с воздействующими факторами</p>	<p>Информация о параметрах режима является неполной и ограничена достоверной</p>
<p>Метод случайной выборки $M[\Delta W_N] = M[\Delta W_1] \cdot N,$</p>	<p>Отсутствие необходимости в какой бы то ни было информации обо всех схемах, кроме тех, которые включены в выборку</p>	<p>Большой объем выборки, требуемый для удовлетворения заданных условий точности определения потерь ЭЭ</p>
<p>Метод корреляционной связи $\Delta W = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_m \cdot X_m + \varepsilon,$</p>	<p>Позволяет выявить 4–5 основных влияющих факторов</p>	<p>Сложность и большой объем математических операций, не позволяет наметить конкретные мероприятия по снижению потерь ЭЭ</p>

В ходе анализа некоторых методов определения потерь ЭЭ в низковольтных сетях промышленного электроснабжения выявлены достоинства и недостатки. Причиной таких результатов является недостоверность получения исходной информации, а также сложные математические вычисления, которые могут привести к значительной погрешности. Среди прочих причин можно выделить также то, что методы не учитывают все влияющие факторы. В свою очередь, их учет может повысить точность расчета. Также в ходе анализа предложена классификация методов определения потерь ЭЭ.

Области применения и некоторые особенности детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь электроэнергии

Можно указать следующие области применения и некоторые особенности детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ.

1. В зависимости от используемой для расчета информации можно выделить среди детерминированных методов методы расчета по времени потерь, эквивалентирования и методы, основанные на поэлементном расчете сетей. Каждый из этих методов имеет свою область применения и точность расчета.

2. Использование методов по времени потерь требует большого количества исходных данных.

3. Методы эквивалентирования имеют погрешности при «сворачивании» схемы сети.

4. Метод $K_{МН}$ требует выполнения одновременных замеров напряжения и токов. Неучет конфигурации сети, распределения нагрузок, коэффициента мощности может приводить к дополнительным погрешностям результатов.

5. Методы поэлементного расчета позволяют достичь высокой точности расчетов и могут использоваться в качестве эталонных для исследования погрешностей приближенных методов. Однако для их практического применения требуется подготовка большого объема исходной информации, что возможно только на базе современных информационных технологий [7–9].

Вероятностно-статистические методы расчета позволяют получить определенные сведения о параметре, зависящем от комплекса других параметров. Причем аналитический вид искомой зависимости либо неизвестен, либо настолько сложен, что применение её в дальнейших расчетах может быть затруднено. В этом случае приходится использовать способы упрощенного, более наглядного представления зависимости. Естественным желанием является выявить оптимальные упрощения, вносящие как можно меньшую погрешность при как можно большей простоте и наглядности получаемой формулы.

При выборе метода решения задачи можно пользоваться следующими рекомендациями.

1. Если известен ряд значений результирующего параметра и соответствующие им значения факторов, от которых зависит результирующий параметр, а из физических представлений об их зависимости можно предположить её вид (линейная, квадратичная, полиномиальная и т.п.), то наилучшие значения коэффициентов этой зависимости выявляют методом наименьших квадратов.

2. При использовании метода наименьших квадратов предполагается, что зависимость строится от всех намеченных факторов. На практике может встречаться задача, в которой ряды значений результирующего параметра и факторов известны, однако неизвестно, все ли факторы оказывают существенное влияние на значение результирующего параметра и все ли их стоит учитывать в упрощенной зависимости. Выбор значимых факторов осуществляет аппарат факторного анализа. Существенным аспектом является то, что этот аппарат анализирует значимость только линейной связи. После выбора значимых факторов (они, как правило, удовлетворяют условию

независимости) значения коэффициентов линейной зависимости параметра от этих факторов определяют методом наименьших квадратов.

3. Если ряды соответствующих друг другу значений неизвестны, то возникает задача их получения. Если значения каждого ряда взаимно независимы, то получение этих значений не вызывает трудностей – необходимо произвести столько расчетов, сколько нужно для получения искомой величины с заданной точностью и достоверностью.

Например, если ставится задача выявления зависимости потерь в линиях разомкнутых сетей от суммарной длины участков линий и установленных коммутационных аппаратов на линии, то ясно, что потери в конкретной линии не зависят от количества коммутационных аппаратов в другой линии. Поэтому для каждой линии отдельно рассчитывают три величины: потери, суммарную длину участков и количество коммутационных аппаратов, из физических представлений устанавливают вид зависимости и затем определяют численные значения входящих в нее коэффициентов методом наименьших квадратов. Если однозначных представлений о виде зависимости нет, то может быть намечено несколько формул. Коэффициенты в каждой из них определяют методом наименьших квадратов, вычисляют среднеквадратические ошибки каждой формулы и выбирают формулу с наименьшими значениями ошибки.

4. В ряде задач факторы оказываются существенно зависимыми друг от друга, что не позволяет осуществлять их отдельный анализ.

Например, если необходимо выявить зависимость потерь ЭЭ в конкретной сети от нагрузок потребителей, то ясно, что зависимость их от нагрузки любого конкретного потребителя будет различной при различных нагрузках других потребителей. Необходимым условием этой задачи является учет взаимного влияния факторов. Использование же ограниченного количества расчетов, проведенных при сочетаниях, установленных волевым порядком, не гарантирует того, что эти сочетания достаточно хорошо отражают всю возможную совокупность сочетаний. В задачах такого рода следует применять метод планирования эксперимента, который как раз и определяет, какие сочетания значений факторов следует рассмотреть, чтобы выявить закономерности, характерные для всей совокупности сочетаний. К таким задачам относится и задача определения потерь ЭЭ в цеховых сетях, для которых характерно наличие большого числа параметров, влияющих на потери ЭЭ [5].

Как показали проведенные исследования [10], погрешности некоторых наиболее распространенных методов определения потерь ЭЭ могут достигать 50 и более процентов (табл. 2).

Таблица 2

Возможные погрешности методов определения потерь

Метод расчета	Погрешность расчета, %	Причины погрешности
Метод графического интегрирования	-28	Неучет нагрева проводов, сопротивлений аппаратов
По времени наибольших потерь τ	-39	Неточность определения величины τ
По методу эквивалентных преобразований	-46	Принцип эквивалентирования
По методу 2 τ	-29	Неточность определения $\Delta R_{нб}$, $\Delta R_{нм}$
По среднеквадратичным нагрузкам	+21	Неучет формы графика нагрузки
По уравнению регрессии	+4	Неточность определения коэффициентов полинома

На данном этапе развития энергетической отрасли вышеперечисленные методы определения потерь ЭЭ не удовлетворяют современным требованиям. Точное определение уровня потерь ЭЭ и мероприятия, направленные на их снижение в распределительных сетях

промышленных предприятий, являются самыми важными составляющими рационального использования энергетических ресурсов [11–13].

Выводы

Проведено сравнительное исследование и анализ некоторых методов расчета потерь электроэнергии с обнаружением основных достоинств и недостатков, присущих каждому из рассмотренных методов. Предложена классификация методов расчета потерь электроэнергии. Определены области использования методов расчета потерь в зависимости от исходной информации, принятых допущений и возможных ожидаемых погрешностей расчета. Разработаны рекомендации по применению вероятностно-статистических и детерминированных методов.

Литература

1. Грачева Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях. Казань: КГЭУ, 2004. 127 с.
2. Федоров О.В., Дарьенков А.Б. Энергосберегающая политика: монография. М.: КноРус, 2015. 294 с.
3. Федоров О.В. Аспекты ресурсообеспечения новых технологических укладов: монография, М.: ИНФРА-М, 2017. Научная мысль. 166 с.
4. Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А. О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. 2014. С. 330–332.
5. Аполлонский С.М., Куклев Ю.С. Надежность и эффективность электрических аппаратов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2011. 443 с.
6. Graovac D., Katic V., Rufner A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. № 4. P. 32–38.
7. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. № 1. P. 37–42
8. Guo Xian, Guo He, Cheng Haozhong, et al. Optimal Architecture Planning of Microgrid Considering User Outage Costs. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014. № 29 (8).P. 301–306.
9. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. № 1. P. 40–46.
10. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
11. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. 2017. 167 с.
12. Дарьенков А.Ф. Пути повышения надежности энергосбережения страны // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 83. № 3. 214 с.
13. Федоров О.В., Татарских Б.Я., Якушева А.М. Приоритетные отрасли новых технологических укладов: монография. М.: КноРус, 2016. 280 с.
14. Esmaeilian H.R., Fadaeinedjad R. “Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation,” IEEE Syst. J., IEEE, 2014. P. 1–10.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ильясов Ильдар Ильнурович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Алимова Алсу Нурхайдаровна – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Gracheva E.I. Poteri elektroenergii v nizkovol'tnykh setyakh. Kazan': KGEU. 2004. 127 s.
2. Energoberegayushchaya politika. O.V. Fedorov, A.B. Dar'enkov. Moskva, 2015. Monografiya. M.: KnoRus, 2015. 294 s.
3. Aspekty resursoobespecheniya novykh tekhnologicheskikh ukладov. O.V. Fedorov. Monografiya. 2M.: INFRA-M 2017 Nauchnaya mysl'. 166 s.
4. Nemtsev A.G., Fedorov O.V., Shestakova L.A. O vibratsii elektrodvigatelyei pri nalichii vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v napryazhenii istochnika pitaniya // Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 v 2-kh tomakh. 2014. S. 330–332.
5. Apollonskii S.M. Nadezhnost' i effektivnost' elektricheskikh apparatov: uchebnoe posobie / S.M. Apollonskii, Yu.V. Kuklev. SPb.: Lan', 2011. 443 s.
6. Graovac D., Katic V., Rufer A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. № 4. P. 32–38.
7. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. № 1. P. 37–42
8. Guo Xian, Guo He, Cheng Haozhong, et al. Optimal Architecture Planning of Microgrid Considering User Outage Costs. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014. № 29 (8).P. 301–306.
9. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. № 1. P. 40–46.
10. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
11. Gracheva E.I., Naumov O.V. Poteri elektroenergiii i effektivnost' funktsionirovaniya oborudovaniya tsekhovykh setei, 2017. 167 s.
12. Dar'enkov A.F. Puti povysheniya nadezhnosti energoberezheniya strany // Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2012. T. 83. № 3. 214 s.
13. Fedorov O.V., Tatarskikh B.Ya., Yakusheva A.M. Prioritetnye otrasli novykh tekhnologicheskikh ukладov: monografiya. M.: KnoRus, 2016. 280 s.
14. Esmailian H.R., Fadaeinedjad R. “Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation,” IEEE Syst. J., IEEE, 2014. P. 1–10.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna – doctor of engineering sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Ilyasov Ildar Inurovich – postgraduate student of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Alimova Alsu Nurkhaydarovna – graduate student of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Поступила в редакцию

22 февраля 2018 года.