

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ГРАМА – ШМИДТА И КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В.С. Павлюков, С.В. Павлюков

Рассмотрена задача точного определения потерь энергии в электрических сетях. Для обеспечения указанной цели при существующем характере разнородности нагрузок в сетях приведены их представления в виде произведения средних значений соответствующих режимных параметров (мощностей, токов) за период T и функций времени, средние значения которых на отрезке времени $(0, T)$ равны единице. Показано получение универсальной модели, характеризующей узловые режимные параметры в пространстве ортогонального базиса. Предложены математические модели определения потерь электрической энергии на базе эффективного подхода, использующего коэффициенты распределения. Достоинства применения матриц коэффициентов распределения при различных режимных параметрах (узловых мощностях, токах) для развития теории методов определения потерь электроэнергии заключаются в ее универсальности как матрицы обобщенных параметров, формирование которой возможно с использованием других матриц – узловых сопротивлений, контурных проводимостей, а также элементов теории графов, численных методов и др. Применение данных моделей позволяет заменить до настоящего времени громоздкие способы и методы учета потерь мощности и энергии, базирующиеся на сложных итерационных процедурах, на более простые алгоритмически и точные. По результатам анализа данных, полученных при значимых нагрузках узлов схемы сети, определение потерь электроэнергии в пространстве ортогонализации базиса задачи является точным и не имеет методической погрешности, что подтвердилось расчетом суммирования потерь на часовых ступенях графиков узловых режимных параметров схемы электрической сети.

Ключевые слова: матрица коэффициентов распределения, потери мощности и энергии, ортогональный базис.

Введение

Для электроэнергетики России одной из первоочередных задач является задача снижения технологических потерь электрической энергии, которые составляют до 10–15 %. В наметившихся условиях интеграционных процессов и возрастающих интересов к интеллектуальным технологиям возникают требования к развитию более совершенных методов управления режимами электроэнергетических систем и поиску эффективных подходов, алгоритмов для решения задачи определения потерь мощности или энергии.

Актуальность

В теории управления электроэнергетическими системами до настоящего времени разработанные методы, алгоритмы в основном связаны с задачей анализа, определения потерь мощности [1–4]. Но в условиях разнородности нагрузок узлов электрических сетей существующие методы не обеспечивают получения точных результатов [5]. Поэтому для решения подобной задачи необходимо продолжить исследования и ожидать появления новых математических моделей и алгоритмов на базе определения потерь электрической энергии.

Постановка задачи

Исходя из указанного состояния задачи, при развитии новых отношений между производством, транспортом и потребителями электроэнергии предлагается рассматривать определение потерь

как распределение потоков энергии в схеме электрической системы за некоторый интервал времени, нежели рассматривать данную задачу в среде распределения потоков мощности на основе узловых матриц Y или Z [6, 7], как это наблюдается в отечественной и зарубежной практике.

Методика определения потерь электроэнергии

Для разработки задачи предлагается представить режимные параметры электрических сетей в виде нагрузок узлов i , моделируемых вектором графиков полных мощностей

$$\mathbf{s}(t) = \left[s_i(t) \right] = \left[p_i(t) + jq_i(t) \right], \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $p_i(t) = p_i f_i^p(t)$, $q_i(t) = q_i f_i^q(t)$ – соответственно функции времени активных и реактивных мощностей; p_i, q_i – соответствующих средних величин; $f_i^p(t), f_i^q(t)$, – базовых функций узловых нагрузок, нормированных по средним значениям

$$\begin{aligned} p_i(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T p_i(t) dt, \quad \frac{1}{T} \int_0^T f_i^p(t) dt = 1; \\ q_i(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T q_i(t) dt, \quad \frac{1}{T} \int_0^T f_i^q(t) dt = 1; \end{aligned} \quad (2)$$

n – число независимых узлов сети.

Величины p_i как интегральные характеристики для реализации моделей узловых нагрузок (1) рекомендуется определять, используя показания счетчиков энергии или по зарегистрированным данным диспетчерской ведомости, хранящимся в базах данных оперативно-информационных комплексов энергообъектов. Функции $f_i^p(t)$ наиболее целесообразно моделировать типовыми (отраслевыми) графиками активных мощностей, функции же $f_i^q(t)$ можно воспроизводить по графикам $f_i^p(t)$ с учетом изменения значений коэффициентов мощности в узлах сети.

Для получения более универсальной узловой модели определения потерь электроэнергии предложено рассматривать физические процессы в сетях в пространстве ортогонального базиса к исходному. Последний образуют $s_i(t)$ как линейно независимые функции. Набор некоторых функций $h_i^p(t)$ образует ортогональный базис. Исходный неортогональный базис преобразуется в ортогональный с применением процесса ортогонализации Грама-Шмидта [8].

В данном процессе каждая последующая координатная ось, получаемая при помощи выражения

$$h_i^p(t) = f_i^p(t) - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_{ij}^p h_j^p(t), \quad (3)$$

формируется как ортогональная ко всем предыдущим уже ортогональным осям $h_i^p(t)$. Значения неопределённых множителей λ_{ij}^p определяются из следующего равенства

$$\int_0^T h_i^p(t) h_j^p(t) dt = \int_0^T f_i^p(t) h_j^p(t) dt - \lambda_{ij}^p \int_0^T h_j^p(t) h_j^p(t) dt = 0,$$

как

$$\lambda_{ij}^p = \frac{\int_0^T f_i^p(t) h_j^p(t) dt}{\int_0^T h_j^p(t) h_j^p(t) dt}. \quad (4)$$

В качестве первой координаты ортогонального базиса может быть выбрана любая функция из набора $f_i^p(t)$, например, $f_1^p(t)$. Для преобразования ортогональных функций $h_i^p(t)$ в ортонормированные следует каждую из них разделить на ее норму

$$v_i^p(t) = h_i^p(t) / \|h_i^p\| = h_i^p(t) / \sqrt{\int_0^T (h_i^p(t))^2 dt}. \quad (5)$$

На основании выражения (5) математические операции определения вектора-функции

$\mathbf{F}^p(t) = [f_i^p(t)]$ сводятся к следующим матричным операциям от времени t

$$\mathbf{F}^p(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{21}^p & 1 & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \\ \lambda_{n1}^p & \lambda_{n2}^p & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \|h_1^p\| & \dots & \\ & \|h_2^p\| & \dots \\ & & \dots & \\ & & & \|h_n^p\| \end{bmatrix} \mathbf{V}^p(t) = \Lambda^p \mathbf{H}^p \mathbf{V}^p(t), \quad (6)$$

где Λ^p – нижняя треугольная с единицами на главной диагонали матрица множителей λ_{ij}^p (3); \mathbf{H}^p – диагональная матрица норм $\|h_i^p\|$ функций $h_i^p(t)$,

$$\|h_i^p\| = \sqrt{\int_0^T (h_i^p(t))^2 dt}. \quad (7)$$

Вектор-функция полных нагрузок (1) узлов с учетом выражения (6) принимает вид

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{p}(t) + j\mathbf{q}(t) = \mathbf{p} \Lambda^p \mathbf{H}^p \mathbf{V}^p(t) + j\mathbf{q} \Lambda^q \mathbf{H}^q \mathbf{V}^q(t). \quad (8)$$

Связь вектора напряжений с нагрузками узлов обеспечивается на основе уравнений в форме баланса мощностей в окрестности средних значений узловых напряжений на отрезке времени T и с использованием формулы (8) представляется следующей матричной записью

$$\mathbf{U}(t) = \underline{J}^{-1} (\mathbf{p} \Lambda^p \mathbf{H}^p \mathbf{V}^p(t) - j\mathbf{q} \Lambda^q \mathbf{H}^q \mathbf{V}^q(t)), \quad (9)$$

где \underline{J} – матрица Якоби, элементы которой вычисляются в указанной окрестности узловых напряжений схемы электрической сети.

Потери электрической энергии в элементах сети, среднечасовое значение на фазу которых за период $[0, T]$ на основе выражения связи (9), определяются

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{U}^T(t) \mathbf{G} \mathbf{U}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{s}^T(t) \mathbf{B} \mathbf{s}(t) dt = \sum_{i=1}^n B_{ii}^p + \sum_{i=1}^n B_{ii}^q, \quad (10)$$

где $[B_{ii}^p] = \mathbf{B}^p = \mathbf{H}^p (\Lambda^p)^T \mathbf{p} (\underline{J}^{-1})^T \mathbf{G} \underline{J}^{-1} \mathbf{p} \Lambda^p \mathbf{H}^p$,

$[B_{ii}^q] = \mathbf{B}^q = \mathbf{H}^q (\Lambda^q)^T \mathbf{q} (\underline{J}^{-1})^T \cdot \mathbf{G} \underline{J}^{-1} \mathbf{q} \Lambda^q \mathbf{H}^q$ – квадратные обобщенные матрицы коэффициентов B_{ii}^p , B_{ii}^q формул потерь, \mathbf{G} – квадратная матрица

узловых проводимостей ветвей сети; T – признак транспонирования.

Потери электроэнергии при задании режимных параметров комплексными токами в узлах нагрузок $\mathbf{j}(t) = \mathbf{j}'(t) + j\mathbf{j}''(t)$ за расчетный период времени T моделируются выражением

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{E} &= \operatorname{Re} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{j}^T(t) \mathbf{Z} \mathbf{j}(t) dt \right] = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{K}^{J'}(t) \mathbf{B}^{J'} \mathbf{K}^{J'}(t) dt + \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{K}^{J''}(t) \mathbf{B}^{J''} \mathbf{K}^{J''}(t) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n B_{il}^{J'} \frac{1}{T} \int_0^T k_i^{J'}(t) k_l^{J'}(t) dt + \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n B_{il}^{J''} \frac{1}{T} \int_0^T k_i^{J''}(t) k_l^{J''}(t) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n B_{ii}^{J'} + \sum_{i=1}^n B_{ii}^{J''}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\left[B_{ii}^{J'} \right] = \mathbf{B}^{J'} = \mathbf{H}^{J'} \left(\Lambda^{J'} \right)^T \mathbf{j}^T \mathbf{R} \mathbf{j}' \Lambda^{J'} \mathbf{H}^{J'}, \quad (12)$$

$$\left[B_{ii}^{J''} \right] = \mathbf{B}^{J''} = \mathbf{H}^{J''} \left(\Lambda^{J''} \right)^T \mathbf{j}^T \mathbf{R} \mathbf{j}'' \Lambda^{J''} \mathbf{H}^{J''} - \quad (13)$$

квадратные матрицы формул потерь.

На основе другой модели

$$\left[J_i(t) \right] = \mathbf{J}(t) = \left[J_i f_i(t) \right], \quad (14)$$

которая представляет вектор-функцию узловых токов, рассмотренных через средние значения модулей токов J_i за период T и функций времени $f_i(t)$, среднее значение каждой из которых на интервале времени $(0, T)$ равно единице, также предложен метод определения потерь электроэнергии. Значения режимных параметров J_i определяются по потреблению электроэнергии в узлах сети. В зависимости от условий задачи потери могут определяться при номинальных, средних значениях напряжений или диспетчерских данных для соответствующих суток. Функции $f_i(t)$ воспроизводятся по графикам $f_i^p(t)$ с учетом изменения значений коэффициентов мощности в узлах сети (возможно использовать средневзвешенные коэффициенты или коэффициенты в соответствии с расчетом поточного распределения мощностей в нормальном режиме, режимах для характерных суток).

Токораспределение в ветвях сети с использованием узловых нагрузок (14) определяется формулой

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{C} \mathbf{J}(t), \quad (15)$$

где $\mathbf{C} = \left[c_{ij} \right]$ – обобщенная матрица коэффициентов распределения узловых токов по ветвям схемы питающей сети.

Для данной модели в качестве базиса исходного пространства рассматриваются линейно независимые функции $f_i(t)$. Пусть ряд некоторых других функций, допустим $h_i(t)$, образуют ортогональный базис. Используя преобразования аналогичные (3)-(6), вектор-функция $\left[f_i(t) \right] = \mathbf{F}(t)$ запишется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{21} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|h_1\| & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \|h_2\| & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \|h_n\| \end{bmatrix} \mathbf{K}(t) = \\ &= \Lambda \mathbf{H} \mathbf{K}(t). \end{aligned} \quad (16)$$

В формуле (16) вектор-функция $\mathbf{K}(t) = \left[k_i(t) \right]$ – обозначает набор ортонормированных функций $k_i(t)$.

С использованием формулы (16) выражение (15) позволяет получить вектор токораспределения для схемы электрической сети в следующей матричной форме

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{C} \Lambda \mathbf{H} \mathbf{K}(t). \quad (17)$$

Потери электроэнергии в питающей сети за период T определяются выражением

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{E} &= \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{I}^T(t) \mathbf{R}_B \mathbf{I}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{K}^T(t) \mathbf{B}^J \mathbf{K}(t) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij}^J \frac{1}{T} \int_0^T k_i(t) k_j(t) dt = \sum_{i=1}^n B_{ij}^J. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь \mathbf{R}_B – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей схемы сети; \mathbf{B}^J – квадратная обобщенная матрица коэффициентов B_{ij} формулы потерь,

$$\mathbf{B}^J = \mathbf{H} (\Lambda)^T \mathbf{J} \mathbf{R} \Lambda \mathbf{H}, \quad (19)$$

\mathbf{R} – обобщенная матрица узловых сопротивлений сети, $\mathbf{R} = \mathbf{C}^T \mathbf{R}_B \mathbf{C}$.

Потери электроэнергии \mathcal{E} определяются суммой диагональных элементов матрицы \mathbf{B}^J , поскольку скалярные произведения ортонормированных функций $k_i(t)$ равны [8]. Данный подход можно использовать для оценки распределения потерь электроэнергии в схемах электрических сетей, а не мощностей, которые учитываются при решении многих задач и описаны в разных литературных источниках [9, 10].

Экспериментальные исследования

Модель определения потерь электроэнергии с ортогонализацией базиса задачи была апробирована на примере схемы экспериментальной электрической сети со следующими исходными данными: 0 – балансирующий узел; режимные параметры (токовые нагрузки) имеют следующие характеристики:

$$\text{первый узел} - J_1(t) = J_1 f_1(t) = 10 \begin{bmatrix} 0,5 \\ 1,0 \\ 0,5 \end{bmatrix}, \text{А};$$

$$\text{второй узел} - J_2(t) = J_2 f_2(t) = 20 \begin{bmatrix} 0,3 \\ 0,8 \\ 0,5 \end{bmatrix}, \text{А};$$

$$\text{третий узел} - J_3(t) = J_3 f_3(t) = 20 \begin{bmatrix} 0,2 \\ 1,0 \\ 0,5 \end{bmatrix}, \text{А};$$

схемные параметры (величины сопротивлений ветвей и их топологические связи): $R_{01} = 4 \text{ Ом}, R_{12} = 2 \text{ Ом}, R_{13} = 3 \text{ Ом}.$

Ортогональный план (базис) для данной задачи определяется функциями времени $h_1(t), h_2(t)$ и $h_3(t).$

Не останавливаясь на подробностях промежуточных действий, мы получаем результат с использованием обобщенной матрицы коэффициентов формулы потерь (19)

$$\mathbf{B}^J = \mathbf{H} \mathbf{A}^T \mathbf{J} \mathbf{R} \mathbf{J} \mathbf{A} \mathbf{H} = \dots = \begin{bmatrix} 68046,9 & 8255,2 & 2840,0 \\ 8251,6 & 1020,0 & 363,6 \\ 2838,5 & 362,3 & 168,0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Матрица \mathbf{B}^J имеет размеры, определяемые числом узлов (независимых) схемы электрической сети. Следовательно, результаты расчетов потерь в этом случае несут узловой характер, полученный с помощью матричного аппарата.

В работе [10] приводится описание определения и процесса расчета потерь мощности в схеме электрической сети на базе матрицы $\mathbf{Z}.$ Представленный процесс назван «матричным распределением потерь мощности в электрических сетях», что скорее всего будет обозначать определение потерь мощности на базе узлового метода с использованием обобщенной матрицы узловых сопротивлений $\mathbf{Z}.$

Небольшая асимметрия значений элементов (20) получилась за счёт округлений до второго знака после запятой норм $\|h_1\|$ и $\|h_3\|$ диагональной матрицы $\mathbf{H}.$ Потери электроэнергии в схеме сети вычисляются как

$$\Delta \mathcal{E} = \sum_{i=1}^3 B_{ii} = (68046,9 + 1020,0 + 168,0) = 69,2 \text{ кВт/ч}. \quad (21)$$

При значимых нагрузках узлов сетей метод определения потерь электроэнергии с ортогонализацией базиса задачи является точным и не имеет методической погрешности, что подтвердилось расчетом суммирования потерь на часовых ступенях графиков токов ветвей «в» схемы электрической сети ($v = \overline{1,3}$). Действительно,

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} &= \sum_v I_v^2(t) r_v = \sum_v r_v \sum_{t=1}^{24} I_v^2(t) = \\ &= (4 \cdot (13^2 + 36^2 + 20^2) + 2 \cdot (6^2 + 16^2 + 10^2) + \\ &+ 3 \cdot (2^2 + 10^2 + 5^2)) \cdot 8 \cdot 0,001 = \\ &= 69,04 \text{ кВт/ч}. \end{aligned} \quad (22)$$

Из сопоставления результатов расчета потерь $\Delta \mathcal{E}$ методом с ортогонализацией базиса и суммированием потерь энергии на ступенях графиков нагрузок следует, что значения потерь электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ совпадают с методом ортогонализации базиса.

Практическая значимость

Особенностью данной задачи является применение таких моделей определения потерь электроэнергии, которые обеспечивают независимую от разнородности узловых нагрузок точность определения потерь (21)–(22) в схемах электрических сетей.

Заключение

Рассмотренные модели определения потерь электроэнергии на отрезке времени $T,$ позволяющие распределить потери электроэнергии, а не мощности, по узлам (потребителям), являются актуальными в условиях развития отечественного электроэнергетического рынка.

Используя коэффициенты матрицы $\mathbf{C},$ можно визуализировать распределение потерь в схеме сети между узлами потребления и производства электроэнергии.

При значимых нагрузках в узлах схем электрических сетей модели определения потерь электроэнергии за время T с ортогонализацией базиса задачи являются точными, что подтверждают соответствующие результаты эксперимента (21) и (22).

Литература

1. Бондаренко, А.М. Регулирование режимов работы энергетического объединения по перетокам мощности и поддержания нормального уровня частоты / А.М. Бондаренко, А.Н. Комаров // *Электричество.* – 1994. – № 5.
2. *Электрические системы. Электрические сети* / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.; под ред. В.А. Веникова и В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998. – 512 с.
3. Гамм, А.З. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергети-

ческой системе / А.З. Гамм, И.И. Голуб // *Электричество*. – 2003. – № 3. – С. 9–16.

4. *Transmission loss allocation: F Comparison of Different Practical Algorithms* / F.J. Conejo, J.M. Arroyo, N. Alguacil, F.L. Guijarro // *IEEE Trans. Power Syst.* – 2002. – Vol. 17. – Aug. – P. 571–576.

5. Паниковская, Т.Ю. К вопросу о распределении потерь между участниками рынка электроэнергии / Т.Ю. Паниковская, С.А. Тихонов // *Технологии управления режимами энергосистем XXI века*. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. – С. 182–187.

6. Арзамасцев, Д.А. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес. – М.: Высшая школа, 1989. – 127 с.

7. Conejo, F.J. Z-bus loss allocation / F.J. Conejo, Galiana, I. Kockar // *IEEE Trans. Power Syst.* – 2001. – Vol. 16. – Feb. – P. 105–110.

8. Стренг, Г. *Линейная алгебра и ее применение* / Г. Стренг. – М.: Мир, 1980. – 454 с.

9. *Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем* / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

10. *Матричное распределение потерь мощности в электрических сетях* / В.П. Обоскалов, И.Л. Кирпикова, К.Ю. Коробейников, А.В. Кирпиков // *Энергосистема: Управление, качество, безопасность: в 2 т.* – Екатеринбург: Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2008. – Т. 2. – С. 228–233.

Павлюков Валерий Сергеевич, кандидат технических наук, кафедра «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел: +7(351)267-92-41, e-mail: pws1938@mail.ru

Павлюков Сергей Валерьевич, выпускник кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел: +7(351)267-92-41, e-mail: pws1938@mail.ru

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2013, vol. 13, no. 1, pp. 46–51**

Modeling Loss in an Electrical Grid with Usage Apparat Gram-Schmidt and on Distribution Coefficients

V.S. Pavlyukov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, pws1938@mail.ru

S.V. Pavlyukov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, pws1938@mail.ru

The problem of accurate determination of the energy losses in electric networks. To ensure this goal with the existing heterogeneity in the network loads are presenting them as a product of the mean values of the relevant operating parameters (power, current) for the period T and time functions, the averages for the time interval [0, T] is equal to one. Retrieves a universal model, which characterizes the nodal operational parameters, in the space of an orthogonal basis. The mathematical model for determining the loss of electricity and based on effective approach using the distribution coefficients. Advantages of the matrix coefficients of distribution at various regime parameters (nodal capacity, currents) for the development of the theory of methods for determining the energy losses, is in its universality as a matrix of generalized parameters, the formation of which is possible with the use of other matrices, such as the centers of resistance, contour conductivities and elements of graph theory, numerical methods, etc. The application of these models allow us to replace the dominant hitherto cumbersome ways and methods to integrate power and energy losses based on complex iterative procedures more simple and accurate. Analysis of data obtained with significant loads node network diagrams, determination of losses in the space orthogonalization of the basis of the problem is accurate and has a systematic error, which was confirmed by calculating the summation of losses on the hourly charts levels of nodal operation parameters design of the electrical network.

Keywords: distribution coefficients matrix, power and energy losses, orthogonal basis.

References

1. Bondarenko A.M., Komarov A.N. Regulirovanie Rezhimov Raboty Energeticheskogo Obединeniya po Peretokam Moshchnosti I Podderzhaniya Normalnogo Urovnya Chastoty. *Elektrichestvo*, 1994, no. 5, pp. 15–19.
2. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A., Stroeva V.A. i dr. *Elektricheskie Sistemy. Elektricheskie Seti*. Moscow, 1988, 512 p.
3. Gamm F.Z., Golub I.I. Adresnost Peredachi Aktivnykh Moshchnostey v Elektroenergeticheskoy Sisteme, *Elektrichestvo*, 2003, no. 3, pp. 9–16.
4. Conejo, A.J.; Arroyo, J.M.; Alguacil, N.; Guijarro, A.L. Transmission loss allocation: F Comparison of Different Practical Algorithms, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, pp. 571–576, 2002.
5. Panikovskaya T.YU., Tikhonov S.A. K Voprosu o Raspredelenii Tekhnicheskikh Poter Mezhd Uchastnikami Rynka Elektroenergii, *Tekhnologii upravleniya rezhimami energosistem XXI veka*, Novosibirsk, 2006, pp. 182–187.
6. Arzamastsev D.A., Lipes A.V. *Snizhenie Tekhnologicheskogo Raskhoda Energii v Elektricheskikh Setyakh*, Moscow, 1989, 127 p.
7. Conejo, F.J.; Galiana, F.D.; Kockar, I. Z-bus loss allocation, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 105–110, Feb 2001.
8. Streng G. *Lineynaya Algebra i ye Primenenie*. Moscow, 1980, 454 p.
9. Vorotnitskiy V.E., Zhelezko Y.S., Kazantsev V.N. *Poteri Elektroenergii v Elektricheskikh Setyakh Energosistem*, Moscow, 1983, 368 p.
10. Oboskalov V.P., Kirpikova I.L., Korobeynikov K.YU., Kirpikov A.V. Matrichnoe Raspredelenie Poter Moshchnosti v Elektricheskikh Setyakh, *Energosistema: Upravlenie, Kachestvo, Bezopasnost*, Ekaterinburg, 2008, vol. 2, pp. 228–233.

Поступила в редакцию 13.02.2013 г.