

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ELECTROMECHANICS,
ELECTROENERGETICS
AND ELECTRICAL EQUIPMEN

УДК 621.311.16

Расчет нагрузочных потерь электрической энергии вероятностно-статистическим методом*

Н.А. ЖИЛИНА¹, А.В. ЛЫКИН²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант, e-mail: nadejda_88-88@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, к. т. н., доцент, e-mail: anat.lykin@gmail.com

Расчет потерь электрической энергии необходим для оценки нормативов технологических потерь и для разработки мероприятий по снижению потерь в электрических сетях. В данной статье излагаются основные положения вероятностно-статистического метода, основанного на вероятностном потокораспределении, для расчета потерь электрической энергии с учетом корреляционных зависимостей между мощностями узлов. В работе предложена модель электропотребления, которая описывает исходные данные для узлов нагрузки электрической сети за суточный, месячный и годовой интервалы времени. Метод может быть использован для расчета потерь электрической энергии в высоковольтных сетях напряжением 110 кВ и выше и распределительных сетях с неоднородными суточными графиками нагрузок. Вероятностно-статистический метод расчета нагрузочных потерь электрической энергии снимает главное допущение традиционных методов – введение одинакового интегрирующего множителя в формуле потерь для всех элементов электрической сети, а также позволяет учесть разнородность нагрузок узлов сети и корреляционные связи между мощностями нагрузок узлов.

Ключевые слова: электрические сети, электрическая энергия, потери, вероятностно-статистический метод, вероятностное потокораспределение, расчеты потерь мощности, корреляция между нагрузками узлов, суточные графики нагрузки

ВВЕДЕНИЕ

Расчет потерь электрической энергии всегда наталкивался на отсутствие полной и в той или иной мере достоверной информации о графиках электрических нагрузок, количестве потребленной электрической энергии по узлам схемы сети, коммутационных состояний схемы электрической сети и др. Современные автоматизированные информационно-измерительные системы постепенно снимают эту проблему и позволяют определять потери электрической энергии в темпе процесса за небольшие интервалы времени. Однако во многих случаях расчет нагрузочных потерь по-прежнему требует определенных усилий в части дополнений, замещений и допущений для восполнения части информации о режимах потребления электрической энергии за расчетный интервал времени. При этом полученная модель электропотребления может быть использована для расчета потерь как за прошедшие интервалы времени работы электрических сетей (по факту), так и за будущие (прогнозные) интервалы.

Все практические методы расчета нагрузочных потерь электрической энергии (далее просто потерь) имеют главное допущение, основанное на принятии какого-то так называемого интегрирующего множителя [1] одинаковым для всех элементов расчетной схемы сети. При

* Статья получена 15 ноября 2013 г. Повторно после исправлений 23 декабря 2013 г

этом для оценки интегрирующего множителя используется график нагрузки центра питания электрической сети или суммарный график основных потребителей в сети. Это во многом упрощает расчет потерь и точность расчета можно повышать, например, увеличением количества интервалов времени, на которые разбивается основной расчетный интервал. Для каждого интервала определяется свой интегрирующий множитель. Такой подход приемлем для относительно однородных (схожих по конфигурации) графиков нагрузки потребителей и радиально-магистральной (разомкнутой) схемы электрической сети.

В настоящей работе приводятся основные положения расчета потерь электрической энергии вероятностно-статистическим методом (ВСМ), в котором нет общих интегрирующих множителей и некоторых допущений, принятых в традиционных методах.

1. ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Расчет потерь электрической энергии производится по формуле

$$\Delta W = M[\Delta P] T_p, \quad (1)$$

где $M[\Delta P]$ – математическое ожидание потерь мощности или средние потери мощности ΔP_{cp} в электрической сети; T_p – расчетный период времени.

Расчет средних потерь в ВСМ для одной ветви схемы сети выполняется по формуле [2]

$$M[\Delta P_{ij}] = G_{ij} \left[\left(m_{U'_i} - m_{U'_j} \right)^2 + D_{U'_i} + D_{U'_j} - 2 \operatorname{cov}(U'_i, U'_j) + \left(m_{U''_i} - m_{U''_j} \right)^2 + D_{U''_i} + D_{U''_j} - 2 \operatorname{cov}(U''_i, U''_j) \right], \quad (2)$$

где i, j – номера узлов, примыкающих к ветви; G_{ij} – активная проводимость ветви (вещественная часть комплекса проводимости, полученного как величина обратная комплексу сопротивления ветви); U', U'' – вещественная и мнимая составляющие комплекса напряжений в узлах, отмеченные индексами номеров узлов i и j ; m и D – символы математического ожидания и дисперсии переменной, записанной как их индексы.

Суммарные средние потери мощности в сети определяются как сумма средних потерь по всем ветвям схемы сети. Похожий подход к расчету потерь электрической энергии изложен в [3].

Таким образом, вычислению средних потерь мощности предшествует расчет режима электрической сети в вероятностной постановке (вероятностное потокораспределение) – вычисление математических ожиданий и ковариаций напряжений узлов электрической сети [4–8].

Математическая модель установившегося режима электрической сети, состоящей из n узлов, для числовых характеристик мощностей (исходные данные) и напряжений в узлах (искомые величины) записывается в виде [2]

$$\sum_{j=0}^{n-1} \left\{ \begin{aligned} &G_{ij} \left[m_{U'_i} m_{U'_j} + \operatorname{cov}(U'_i, U'_j) \right] - B_{ij} \left[m_{U'_i} m_{U''_j} + \operatorname{cov}(U'_i, U''_j) \right] + \\ &+ B_{ij} \left[m_{U''_i} m_{U'_j} + \operatorname{cov}(U''_i, U'_j) \right] + G_{ij} \left[m_{U''_i} m_{U''_j} + \operatorname{cov}(U''_i, U''_j) \right] \end{aligned} \right\} = m_{P,i}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^{n-1} \left\{ \begin{aligned} &-B_{ij} \left[m_{U'_i} m_{U'_j} + \operatorname{cov}(U'_i, U'_j) \right] - G_{ij} \left[m_{U'_i} m_{U''_j} + \operatorname{cov}(U'_i, U''_j) \right] + \\ &G_{ij} \left[m_{U''_i} m_{U'_j} + \operatorname{cov}(U''_i, U'_j) \right] - B_{ij} \left[m_{U''_i} m_{U''_j} + \operatorname{cov}(U''_i, U''_j) \right] \end{aligned} \right\} = m_{Q,i},$$

где m_{P_i} и m_{Q_i} – математические ожидания мощностей в узлах сети; G_{ij} и B_{ij} – элементы матрицы узловых проводимостей (активная и реактивная составляющие); $m_{U'_i}, m_{U'_j}, m_{U''_i}, m_{U''_j}$ – ма-

тематические ожидания вещественной и мнимой составляющих комплексов напряжений в узлах i и j ; $\text{cov}(U'_i, U'_j)$, $\text{cov}(U'_i, U''_j)$, $\text{cov}(U''_i, U'_j)$, $\text{cov}(U''_i, U''_j)$ – ковариации между составляющими напряжений в узлах i и j , и

$$\mathbf{J} \text{cov}(\mathbf{U}', \mathbf{U}'') \mathbf{J}^T = \text{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}), \quad (4)$$

где \mathbf{J} – матрица Якоби системы уравнений (3); $\text{cov}(\mathbf{U}', \mathbf{U}'')$ – ковариационная матрица составляющих комплексов напряжений в узлах; $\text{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q})$ – ковариационная матрица мощностей в узлах, рассчитанная для расчетного периода T_p .

Исходными данными для расчета, кроме параметров сети, являются математические ожидания и ковариационная матрица мощностей в узлах. Эти два элемента составляют модель электропотребления за расчетный интервал времени в рассчитываемой сети.

Система уравнений (3), (4) решается одновременно, в результате чего получаются математические ожидания и ковариационная матрица составляющих комплексов напряжений в узлах. Они необходимы для вычисления потерь электроэнергии по формулам (1) и (2).

Следует отметить особенность записи уравнений (2)–(4) через вещественные и мнимые составляющие напряжений в узлах сети U' , U'' в так называемой форме декартовых координат представления векторов комплексных переменных уравнений установившегося режима. Это позволяет записать уравнения для математических ожиданий (2) и (3) вполне корректно без использования приема линеаризации, что невозможно при использовании полярной формы записи уравнений.

2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Изменение нагрузок электрической системы во времени взаимосвязано вследствие циклических закономерностей, обусловленных суточными, недельными и годовыми периодами. Как правило, электрическая сеть располагается в одном часовом поясе и передает электрическую энергию в соответствии с единым суточным циклом. Поэтому суточные графики всех потребителей электрической сети следует рассматривать на одном временном интервале.

Недельные периоды характеризуются пониженным потреблением электрической энергии в выходные дни. Наличие праздничных дней также меняет электропотребление и конфигурации суточных графиков нагрузки. Годовой период для большинства нагрузок характеризуется летним снижением электропотребления.

Для расчетов потерь электрической энергии за расчетный интервал времени T_p , равный суткам, месяцу или году, следует учитывать не только изменения каждой нагрузки в отдельности, но и стохастические связи между ними.

В случае полных измерений мощностей нагрузок с заданной дискретностью по времени за весь интервал T_p в каждом узле электрической сети модель электропотребления получается без введения особых условий и по известным формулам для математических ожиданий и ковариационной матрицы мощностей узлов для статистической выборки объемом N . Измерения, необходимые для расчетов потерь электрической энергии, выполняют не для мгновенных, а усредненных значений на интервале дискретности – интегральные измерения, и обычно на часовом интервале. Таким образом, мощность нагрузки представляется графиком среднечасовых значений за время T_p .

В этом случае нет необходимости проводить расчеты сразу за весь расчетный интервал специальными расчетными методами, имеющими погрешности моделирования. Вполне приемлемо и корректно выполнить N расчетов по среднечасовым данным о нагрузках. Этот подход и используется при наличии автоматизации измерений в темпе процесса.

В нашем случае исходной предпосылкой является отсутствие полных измерений по нагрузкам узлов. Предполагается, что известны только годовые и месячные объемы потребления электроэнергии нагрузками сети и их графики характерных суток. Кроме того, нужны данные о характере суточного и недельного потребления электрической энергии потребителями.

Рассмотрим одну из возможных моделей электропотребления. Для этого необходимо принять несколько допущений. Вначале рассмотрим один узел нагрузки электрической сети и расчетный интервал T_p , равный одному месяцу.

На основе измерений или по типовым графикам нагрузки потребителей, подключенных к узлу сети, определим характерный суточный график нагрузки рабочего и нерабочего дня. Примем эти графики одинаковыми для соответствующих дней всего расчетного месяца, будем иметь n_p рабочих и n_n нерабочих суточных графиков нагрузки ($n_p + n_n = n$ – число дней в месяце).

Для модели электропотребления нужно получить математические ожидания и дисперсии мощностей нагрузок для расчетного интервала. Для суточных интервалов времени числовые характеристики получаем по выборкам из 24 значений для рабочего m_p , D_p и нерабочего m_n , D_n дней.

Числовые характеристики мощности нагрузки месячного интервала m_M , D_M определим через числовые характеристики для суточных интервалов. Это можно сделать по месячному графику среднечасовых значений мощностей, составленному из n_p и n_n суточных графиков, или по формулам

$$m_M = \frac{n_p m_p + n_n m_n}{n}; \quad D_M = \frac{n_p D_p + n_n D_n}{n} + D_{M(c)}, \quad (5)$$

где $D_{M(c)}$ – дисперсия мощности нагрузки для месячного интервала, полученная по выборке из n среднесуточных значений (математических ожиданий за суточные интервалы).

Если преобразовать месячный график среднесуточных значений в график по продолжительности, то получится двухступенчатый график, одна ступень величиной m_p объемом n_p рабочих и другая m_n объемом n_n значений. Тогда будем иметь

$$D_{M(c)} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{c,i}^2}{n} - m_M^2 = \frac{n_p m_p^2 + n_n m_n^2}{n} - m_M^2, \quad (6)$$

где $m_{c,i}$ – математическое ожидание мощности нагрузки за i -е сутки.

Таким образом,

$$m_M = \frac{n_p m_p + n_n m_n}{n}; \quad D_M = \frac{n_p D_p + n_n D_n}{n} + \frac{n_p m_p^2 + n_n m_n^2}{n} - m_M^2. \quad (7)$$

Для другого месяца эти формулы будут аналогичными, однако характеристики суточного графика рабочего и выходного дня, а также их количество станут иными.

Если представить, что для всех 12 месяцев года получены $m_{M,i}$, $D_{M,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 12$), то для расчетного интервала равного году дисперсию можно определить по дисперсиям всех двенадцати месяцев с учетом их различия в количестве дней:

$$m_\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^{12} n_i m_{M,i}}{n_\Gamma}; \quad D_\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^{12} n_{M,i} D_{M,i}}{n_\Gamma} + D_{\Gamma(M)}, \quad (8)$$

где $D_{M,i}$ – дисперсия мощности нагрузки за i -й месяц; $D_{\Gamma(M)}$ – дисперсия мощности нагрузки за год, рассчитанная по среднemesячным значениям; n_Γ – число дней в году.

В [9] показано, что при допущении одинаковых дисперсий суточных графиков нагрузки, а также одинаковых дисперсиях месячных графиков дисперсия годового графика может быть получена как сумма

$$D_\Gamma = D_c + D_{M(c)} + D_{\Gamma(M)}, \quad (9)$$

где D_c – дисперсия суточного графика нагрузки; $D_{M(c)}$ – дисперсия мощности нагрузки для месячного интервала, рассчитанная по среднесуточным значениям; $D_{\Gamma(M)}$ – дисперсия мощности нагрузки за год, рассчитанная по среднemesячным значениям.

Соотношения (5)–(8) позволяют получить дисперсию годового графика нагрузки для различающихся суточных графиков по месяцам года.

Модель электропотребления для нескольких узлов включает в себя и ковариации между мощностями нагрузок узлов. Для определения матрицы ковариаций мощностей узлов за годовой период также возможно использование соотношений (5)–(8):

$$\begin{aligned} \text{cov}(\mathbf{P}_\Gamma, \mathbf{Q}_\Gamma) &= \frac{1}{n_\Gamma} \sum_{i=1}^{12} n_{M,i} \text{cov}(\mathbf{P}_{M,i}, \mathbf{Q}_{M,i}) + \text{cov}(\mathbf{P}_{\Gamma(M)}, \mathbf{Q}_{\Gamma(M)}), \\ \text{cov}(\mathbf{P}_{M,i}, \mathbf{Q}_{M,i}) &= \frac{1}{n_{M,i}} \left(n_{p,i} \text{cov}(\mathbf{P}_{p,i}, \mathbf{Q}_{p,i}) + n_{n,i} \text{cov}(\mathbf{P}_{n,i}, \mathbf{Q}_{n,i}) \right) + \\ &+ \text{cov}(\mathbf{P}_{M(c),i}, \mathbf{Q}_{M(c),i}), \\ \text{cov}(\mathbf{P}_{M(c),i}, \mathbf{Q}_{M(c),i}) &= \frac{1}{n_i} \left(n_{p,i} \mathbf{m}_{p,i} \mathbf{m}_{p,i}^T + n_{n,i} \mathbf{m}_{n,i} \mathbf{m}_{n,i}^T \right) - \mathbf{m}_{M,i} \mathbf{m}_{M,i}^T, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\text{cov}(\mathbf{P}_\Gamma, \mathbf{Q}_\Gamma)$ – ковариационная матрица мощностей нагрузок для годового расчетного интервала; $\text{cov}(\mathbf{P}_{M,i}, \mathbf{Q}_{M,i})$ – ковариационная матрица мощностей нагрузок для i -го месяца; $\text{cov}(\mathbf{P}_{\Gamma(M)}, \mathbf{Q}_{\Gamma(M)})$ – ковариационная матрица мощностей нагрузок для годового интервала, полученная по среднемесячным значениям.; $\text{cov}(\mathbf{P}_{p,i}, \mathbf{Q}_{p,i})$ и $\text{cov}(\mathbf{P}_{n,i}, \mathbf{Q}_{n,i})$ – ковариационные матрицы мощностей нагрузок соответственно рабочих и нерабочих суток i -го месяца; $\text{cov}(\mathbf{P}_{M(c),i}, \mathbf{Q}_{M(c),i})$ – ковариационная матрица мощностей нагрузок для i -го месячного интервала, полученная по среднесуточным значениям; $\mathbf{m}_{p,i}$, $\mathbf{m}_{n,i}$, $\mathbf{m}_{M,i}$ – вектора математических ожиданий мощностей нагрузок соответственно рабочих и нерабочих суток и всего i -го месяца.

В практических расчетах математические ожидания мощностей нагрузок оцениваются по измеренным объемам отпущенной по узлам сети электрической энергии (активной и реактивной). Ковариационная матрица мощностей нагрузок за расчетный интервал равный году может быть построена на основе типовых (измеренных) суточных графиков с учетом месячных и годовых вариаций по методике, изложенной в [10] на основе коэффициента охвата, характерного для разных случаев.

Исследования, выполненные на основе экспериментальных расчетов различных схем электрических сетей [10], показывают значительное снижение погрешности расчета потерь по ВСМ по сравнению с методом средних нагрузок. При этом результаты расчетов показывают существенное влияние так называемого смещения математического ожидания напряжения в узлах вследствие использования в уравнениях установившегося режима центральных моментов второго порядка, уравнение (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вероятностно-статистический метод расчета нагрузочных потерь электрической энергии снимает главное допущение традиционных методов – введение одинакового интегрирующего множителя в формуле потерь для всех элементов электрической сети, а также позволяет учесть разнородность нагрузок узлов сети, корреляционные связи между мощностями нагрузок узлов и рассчитывать математические ожидания потерь мощности при реверсивных потоках мощности и энергии по линиям электропередачи.

Использование вероятностно-статистического метода целесообразно для замкнутых сетей 110...220 кВ и распределительных сетей 6...35 кВ с разнородными нагрузками. Этот метод может быть использован для повышения точности расчета потерь в темпе процесса на часовых и получасовых интервалах для учета изменений потоков мощности по элементам сети на этих интервалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практ. расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- [2] Лыкин А.В., Жилина Н.А., Нестерова А.Н. Расчёт потерь электрической энергии в электрических сетях вероятностно-статистическим методом // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. всерос. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 17–19 нояб. 2010 г.: в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – Т. 1. – С. 314–318.
- [3] Паздерин А.В. Расчет технических потерь электроэнергии на основе решения задачи энергораспределения // Электр. станции. – 2004. – № 12. – С. 44–49.
- [4] Манусов В.З., Лыкин А.В. Вероятностный анализ установившихся режимов электрических систем / В.З. Манусов // Электричество. – 1981. – № 4. – С. 7–13.
- [5] Borkowska B. Probabilistic Load Flow // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1974. – Vol. PAS-93, № 3. – P. 752–755.
- [6] Allan R.N., Borkowska B. and Grigg C.Y. Probabilistic analysis of power flows // Proc. of the Institution of Electrical Engineers (London). – 1974. – Vol. 121, № 12. – P. 1551–1556.
- [7] Dopazo J.F., Klitin J.F., and Sasson A.M. Stochastic load flows // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1975. – Vol. PAS-94, № 2. – P. 299–309.
- [8] Leite da Silva A.M., Arienti V.L., and Allan R.N. Probabilistic load flow considering dependence between input nodal powers // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. – 1984. – Vol. PAS-103, № 6. – P. 1524–1530.
- [9] Лыкин А.В., Жилина Н.А. Определение параметров математической модели энергопотребления узлов электрической сети в расчетах потерь электрической энергии // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. III междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 22–26 окт. 2012 г.: в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 398–402.
- [10] Лыкин А.В., Жилина Н.А., Нестерова А.Н. Исследование погрешностей в расчете потерь электрической энергии вероятностно-статистическим методом // Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах»: тез. докл., г. Новосибирск, 21–24 сент. 2011 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 46–47.

Жилина Надежда Анатольевна, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – методы и модели для расчётов потоков и потерь электроэнергии. Имеет 5 публикаций. E-mail: nadejda_88-88@mail.ru

Лыкин Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование установившихся режимов электроэнергетических систем. Имеет более 50 научных публикаций. E-mail: anat.lykin@gmail.com

Calculations of electric energy power losses by the probabilistic-statistical method*

N.A. ZHILINA¹, A.V. LYKIN²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD student, e-mail: nadejda_88-88@mail.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor, e-mail: anat.lykin@gmail.com*

Calculations of electric energy losses are needed to estimate a standardized technological loss of power and to reduce power losses of distribution systems. This paper proposes the main propositions of the probability-statistical method based on the probabilistic load flow for calculating the losses of electric energy with regard to the dependence between nodal powers. The paper presents a model of energy consumption, which describes the basic data of the power supply for daily, monthly and yearly intervals. The method can be used for power losses calculations on the high voltage transmission network at voltages above 110 kV, and distribution network with the non-uniform daily load profiles. The probabilistic-statistical method for calculating load losses of electric energy removes the main assumption of the traditional methods, namely, the introduction of the same integrating factor in the loss formula for all elements of the electrical network, and allows taking into account the heterogeneity of nodes in the network load and correlation between nodal powers.

Keywords: electrical network, electric energy, losses, probabilistic-statistical method, probabilistic load flow, power losses calculations, correlation between the nodal powers, daily load profiles

* Manuscript received November 15, 2013. Again after patch 23 December 2013.

REFERENCES

- [1] Zhelezko Iu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. Rukovodstvo dlia prakt. raschetov* [The loss of electricity. Reactive power. Power quality: a Guide for practical calculations]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
- [2] Lykin A.V., Zhilina N.A., Nesterova A.N. Raschet poter' elektricheskoi energii v elektricheskikh setiakh veroiatnostno-statisticheskim metodom [Calculation of electric power losses in electric networks of probabilistic-statistical method]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Power industry through the eyes of youth. Proc. of the all-Russian sci.-techn. conf.]. Ekaterinburg, 2010, vol. 1, pp. 314-318.
- [3] Pazderin A.V. Raschet tekhnicheskikh poter' elektroenergii na osnove resheniia zadachi energoraspredeleniia [The calculation of technical losses of electricity on the basis of the decision of tasks dispatch]. *Elektricheskie stantsii – Electric stations*, 2004, no. 12, pp. 44-49.
- [4] Manusov V.Z., Lykin A.V. Veroiatnostnyi analiz ustanovivshikhsia rezhimov elektricheskikh system [Probabilistic analysis of steady-state regimes of electric systems]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1981, no. 4, pp. 7-13.
- [5] Borkowska B. Probabilistic Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, vol. PAS-93, no. 3, pp. 752-755.
- [6] Allan R.N., Borkowska B. and Grigg C.Y. Probabilistic analysis of power flows. *Proc. of the Institution of Electrical Engineers (London)*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1551-1556.
- [7] Dopazo J.F., Klitin J.F., and Sasson A.M. Stochastic load flows. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1975, vol. PAS-94, no. 2, pp. 299-309.
- [8] Leite da Silva A.M., Arienti V.L., and Allan R.N. Probabilistic load flow considering de-pendence between input nodal powers. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1984, vol. PAS-103, no. 6, 1984, pp. 1524–1530.
- [9] Lykin A.V., Zhilina N.A. Opredelenie parametrov matematicheskoi modeli energopotrebleniia uzlov elektricheskoi seti v raschetakh poter' elektricheskoi energii [Determination of parameters of the mathematical model of power units of electric networks in the calculation of losses of electric energy]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. III mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Power industry through the eyes of youth. Proc. of the International Scientific-Technical Conference], 2012, vol. 2, pp. 398-402.
- [10] Lykin A.V., Zhilina N.A., Nesterova A.N. Issledovanie pogreshnostei v raschete poter' elektricheskoi energii veroiatnostno-statisticheskim metodom [Study of errors in calculation of losses of electric energy probabilistic-statistical method]. *Mezhdunarodnaia molodezhnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Upravlenie, informatsiia i optimizatsiia v elektroenergeticheskikh sistemakh». Tez. dokl.* [International youth research & technical conference «Management, information and optimization of electric power systems». The abstracts]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 46-47.