DOI: 10.34286/1995-4646-2020-71-2-55-61
УДК 621.315.001.13-192 Материал поступил в редакцию 18.02.20.

Т. Б. ЛЕЩИНСКАЯ, *доктор техн. наук, профессор*
С. И. БЕЛОВ, *канд. техн. наук, доцент*
П. С. ПЕТРОВ, *аспирант*
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», Российская Федерация, г. Москва

TAMARA B. LESHINSKAY, *Advanced Doctor in Engineering Sciences, Professor*
SERGEY I. BELOV, *Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor*
PAVEL S. PETROV, *Postgraduate*
Russian Timiryazev State Agrarian University, Russian Federation, Moscow

УТОЧНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 10 КВ

REFINEMENT OF RELIABILITY INDICATORS BASED ON THE BAYESIAN APPROACH IN DESIGNING 10 KV AIR LINES

Аннотация. *Рассмотрен современный уровень надежности распределительных воздушных линий 10 кВ и уточнение показателей надежности на основе байесовского подхода при проектировании. Данная тема является актуальной, так как недостоверность отечественной статистики о повреждаемости сельских сетей видна из сопоставления ее с зарубежными данными, относящимися к таким же сетям. Кроме того, анализ литературных данных по надежности электрических сетей показывает, что приводимые в различных источниках показатели отличаются большим разбросом и описываются различными законами распределения. Авторами поставлена задача – уточнение показателей надежности на основе байесовского подхода. Данная методика и сопутствующие расчеты подробно представлены в статье. Результатом исследования является то, что приведенная методика повышает достоверность расчетов по надежности распределительных воздушных линий 10 кВ, а также может быть использована при уточнении показателей надежности других элементов электрической сети, таких как трансформаторы, шинные конструкции, пункты автоматического секционирования и резервирования и др. Полученные средние значения показателей надежности будут в этом случае обладать большей степенью точности по сравнению с приводимыми в литературе.*
Ключевые слова: *энергетика, электроснабжение, надежность, распределительные сети, методика, байесовский подход, техническое обслуживание, ремонт.*

Abstract*. The current reliability level of 10 kV distribution air lines and the refinement of reliability indicators based on the Bays approach to design are considered. This topic is relevant, since the inaccuracy of domestic statistics on the damage to rural networks is visible from comparing it with foreign data related to the same networks. In addition, the analysis of literature data on the reliability of electric networks shows that the indicators given in various sources differ in a wide range and are described by various distribution laws. The authors set the task – the refinement of reliability indicators based on the Bayesian approach. This technique and related calculations are presented in detail in the article. The result of the study is that the methodology increases the reliability of calculations on the reliability of 10 kV overhead distribution lines, and can also be used to clarify the reliability indicators of other elements of the electric network, such as transformers, bus structures, automatic sectioning*

and backup points, etc. the average values of reliability indicators in this case will have a greater degree of accuracy compared to those given in the literature.
Keywords: *energy, power supply, reliability, distribution networks, methodology, Bayesian approach, maintenance, repair.*

На стадии проектирования систем электроснабжения при составлении схем перспективного развития энергетики краев, областей и республик, при решении задач планирования для больших регионов или всей страны в целом необходимо заранее знать показатели надежности элементов электрической сети. Однако предварительный их расчет может быть неточным вследствие недостатка информации о конкретной, полученной в ходе реконструкции или строительства электрической сети, а средние статистические данные обычно получены для страны в целом или больших ее регионов.

С другой стороны, сугубо экспертная оценка также имеет неточность, вызванную субъективностью знаний о рассматриваемой электрической сети. Поэтому для уточнения показателей надежности электрической сети на стадии проектирования возможно применение байесовского подхода, основанного на взаимном учете статистических и экспертных данных. В данной статье иллюстрируется применение разработанной методики для уточнения статистических и литературных данных о надежности ВЛ 10 кВ в Российской Федерации.

Полнота и качество удельных показателей распределительных воздушных линий напряжением 10 кВ характеризуется объемом исследуемого массива данных. Базой для их получения являются статистические материалы об отключениях, собираемые в районах электрических сетей и обобщаемые в энергосистемах. Затем на основе их анализа разрабатываются директивные материалы, содержащие усредненные данные по надежности электрических сетей [1]. Последние характеризуются неполнотой и недостаточной достоверностью числовых значений.

Это подтверждается результатами ряда исследований, например, приведенными в работе Ф. А. Гиндулина и Н. А. Дульзона [2], где показано, что отчетные данные, в первую очередь частота повреждений различного оборудования, отражают не более 10…30 % фактических значений. Недостоверность отечественной статистики о повреждаемости сельских сетей видна из сопоставления ее с зарубежными данными, относящимися к таким же сетям. Так, в «Указаниях по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными электроустановками» [3], для ВЛ 10 кВ рекомендуется принимать 7,62 повреждений (всех видов) на 100 км линии в год. Но это достаточно высокий уровень надежности и, как показывают расчеты, при таких показателях повреждаемости повышать надежность чаще всего нецелесообразно. В то же время во Франции [4] в сетях среднего напряжения 170 повреждений (всех видов) на 100 км линии в год, в Польше [4] – несколько сотен, в том числе 40 устойчивых.

Кроме того, анализ литературных данных по надежности электрических сетей (таблица 1) показывает, что приводимые в различных источниках показатели отличаются большим разбросом и описываются различными законами распределения. Например, в работе В. А. Фролова [5] показано, что длительность отключений в литературных источниках занижена примерно в 2,5 раза, а их число – в 4,5 раза.

Такое положение в значительной мере объясняется отсутствием необходимой связи между фактическим уровнем надежности электроснабжения потребителей и объемом средств, выделяемых на его повышение. Электросетевые предприятия до последнего времени по ряду причин не были заинтересованы в выявлении истинного положения. Вероятно, в результате постепенного перехода к договорным отношениям с потребителями об уровне надежности это положение изменится.

Можно утверждать, что уровень надежности, характеризуемый частотой и длительностью отключений электроснабжения потребителей вместе с количеством недоотпущенной электроэнергии, является неопределенной величиной, значение которой обусловлено качеством заводского

Таблица 1 – Показатели надежности и технического обслуживания воздушных линий напряжением 10 кВт

Номер пункта	ω_{min}, откл/год·км	ω_{max}, откл/год·км	ω, откл/год·км	δ_{ω}, откл/год·км	τ_{min}, ч/откл	τ_{max}, ч/откл	τ, ч/откл	$\delta\tau$, ч/откл	μ, откл/год·км	$t^{пл}$, ч/откл
1	–	–	0,25	–	–	–	4,2	–	0,12	0,12
2	–	0,05	–	–	–	5,0	–	–	0,2	0,2
3	0,02	0,25	–	–	4,8	12,0	–	–	–	–
4	0,02	0,25	–	–	4,8	12,0	–	–	–	–
5	0,02	0,025	0,0225	0,0015	4,0	5,0	4,5	0,29	–	–
6	–	–	0,04	–	–	–	4,2	–	0,065	0,065
7	0,075	0,088	0,0812	–	2,53	2,99	2,75	–	–	–
8	0,107	0,159	0,133	0,015	5,41	6,11	5,8	0,6	0,052	0,052
9	–	–	0,82	–	–	–	1,4	–	–	–
10	0,303	0,481	0,392	0,0306	3,36	6,2	4,28	0,4	–	–
11	–	–	0,12	–	–	–	3,0	–	–	–
12	–	–0,2	0,02	–	–	–	5,0	–	0,04	0,04
13	0,02	0,088	–	–	5	12	–	–	0,2	0,2
14	0,075	2,256	0,0812	–	2,53	2,99	2,75	–	–	–
15	0,066	–	–	–	2,8	6,0	–	–	–	–

Примечание: В таблице приняты следующие буквенные обозначения: ω – частота отказов, τ – время восстановления, μ – частота плановых отключений, $\tau_{пл}$ – средняя продолжительность планового ремонта, δ – среднеквадратическое отклонение.

изготовления электрооборудования, совершенством строительства и монтажа, качеством обслуживания, влиянием погодных условий, случайными причинами, а также значениями электрических нагрузок, которые, в свою очередь, являются неопределенными величинами.

Неопределенность информации о показателях надежности является нежелательным фактором, влияние которого необходимо свести к минимуму. Получение дополнительной информации, снижающей в какой-то степени эту неопределенность, не во всех случаях позволяет полностью ее устранить из-за существования объективной неточности наших знаний.

Поэтому для получения более достоверных данных о показателях надежности электроснабжения в условиях неопределенности целесообразно использовать все имеющиеся источники информации: литературные данные, статистические и экспертные оценки, а также их обобщенные характеристики.

Из работы Т. Б. Лещинской [6] известно, что при наличии объективных статистических данных следует отдавать им предпочтение перед экспертными оценками, а также объединять несколько видов информации.

Далее приводится методика получения показателей надежности распределительных электрических линий одновременно по литературным и статистическим данным (в целом для Российской Федерации) на основе байесовского подхода.

Байесовский подход при обработке статистической информации основан на интерпретации истинных параметров модели, отличающейся от классического подхода. При классическом подходе исходят из того, что истинные параметры не являются случайными, а случайны их оценки, полученные в результате наблюдений. При байесовском подходе истинные параметры модели трактуются шире. Считается, что физический объект подвержен непрерывным, случайным воздействиям и изменениям и это приводит к случайному характеру его параметров. Поэтому для этих параметров вводятся неслучайные оценки, достаточно близко к ним приближающиеся. Предположение о случайном характере параметров модели непосредственно приводит к использованию теоремы Байеса [7]. Эта теорема для непрерывных случайных величин может быть представлена в виде

$$P\left(\frac{\theta}{Y}\right) \sim P(\theta) \times P\left(\frac{Y}{\theta}\right),$$

где символ «~» означает пропорциональность; $P\left(\frac{\theta}{Y}\right)$ – апостериорная функция

плотности распределения вероятностей неопределенного фактора (θ, т. е. частота и продолжительность отключений электроснабжения потребителей) при данной эмпирической информации относительно Y; $P(\theta)$ – априорная функция плотности распределения вероятностей для вектора θ; $P\left(\frac{Y}{\theta}\right)$ – функция правдоподобия от θ.

Суть байесовского подхода заключается в том, что объединяя при помощи теоремы Байеса априорную функцию плотности распределения вероятностей вектора параметров (в рассматриваемом случае результат обработки литературных данных) с информацией выборки (в нашем случае статистическими данными ОРГРЭС (фирма по организации и рационализации районных электрических станций и сетей) об отключениях в распределительных сетях), получают апостериорную функцию плотности распределения. Данные об отключениях, полученные из литературных источников, здесь трактуются как эвристические, субъективные, экспертные оценки.

При этом введение субъективных вероятностей не отрицает наличия в них определенной меры объективности, так как субъективное мнение эксперта базируется на его прошлом, неформализованном опыте. Субъективные вероятности в какой-то мере всегда отражают информацию об объективном состоянии, хотя и полученную в различных условиях и основанную на индивидуальном опыте исследования.

Байесовский подход является одним из возможных подходов, обеспечивающих учет такого ценного элемента, как индивидуальный опыт человека.

Априорная информация о параметрах надежности распределительных воздушных линий 10 кВ, полученная по литературным данным (издания различных лет и авторов), приведенная в таблице 1, обработана на основе методов математической статистики и представлена гистограммой и кривой аппроксимации на рисунке 1 для удельной частоты отказов, а на рисунке 2 – для продолжительности одного внезапного отключения.

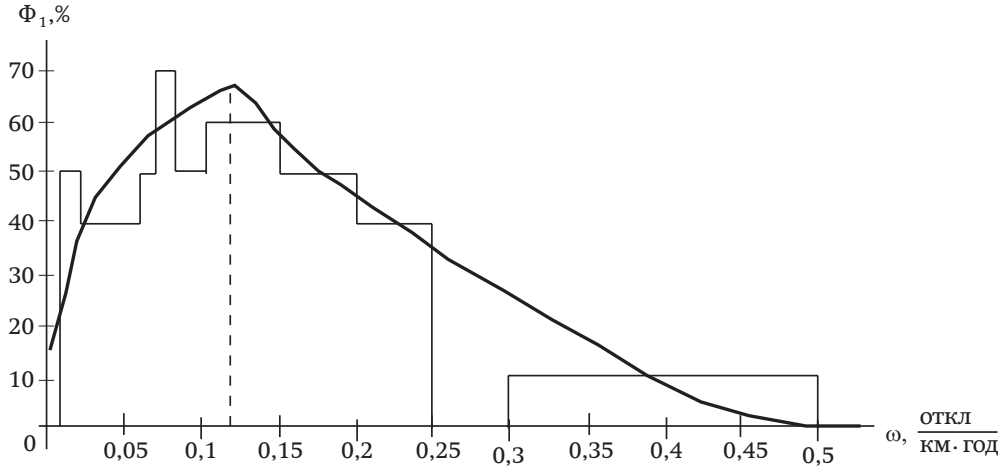

Рисунок 1 – Теоретическая кривая функции принадлежности и гистограмма удельной частоты отказов ВЛ 10 кВ, построенная по литературным данным

Figure 1 – Theoretical curve of the membership function and a histogram of the specific failure frequency of 10 kV overhead lines constructed from published data

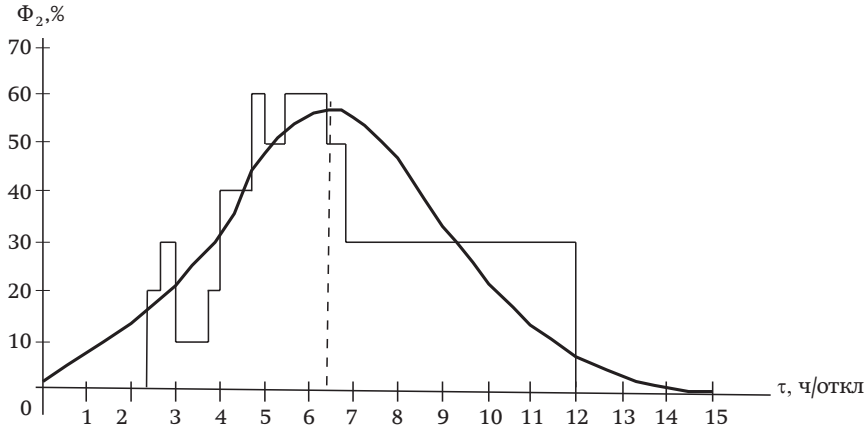

Рисунок 2 – Теоретическая кривая функции принадлежности и гистограмма продолжительности одного внезапного отключения ВЛ 10 кВ, построенная по литературным данным

Figure 2 – Theoretical curve of the membership function and a histogram of the duration of one sudden shutdown of a 10 kV overhead line, constructed from published data

Таблица 2 – Коэффициенты «тесноты связи» уравнений и статистических зависимостей

Показатель	Вид функции	
	$\Phi_1 = f(\omega)$	$\Phi_2 = f(\omega)$
Стандартная ошибка показателя асимметрии	0,6607	0,6373
Стандартная ошибка показателя эксцесса	1,279	1,232
Коэффициент множественной корреляции	0,9933	0,9320
Стандартная ошибка оценки коэффициента множественной корреляции	0,006635	0,04965
Коэффициент множественной детерминации	0,9867	0,8686
Стандартная ошибка оценки	4,373	9,775
Отношение Фишера	27,40	4,441
Число степеней свободы	4	7

Теоретическая кривая функции принадлежности частоты отказов ВЛ 10 кВ ($\Phi_1 = \Phi(\omega)$) и имеет вид

$$\Phi_2 = 11,06 + 1161\omega - 8523\omega_2 + 21920\omega_3 - $$
$$- 17760\omega_4 - 10150\omega_5 + 13320\omega_6,$$

а функция принадлежности одного внезапного отключения распределительной линии ($\Phi_2 = f(\tau)$), изображенная на рисунке 2, представлена формулой

$$\Phi_2 = 0,5814 - 13,44 \times \tau + 10,43 \times$$
$$\times \tau_2 - 1,421 \times \tau_3 + 0,05237 \times \tau_4.$$

Оценка качества аппроксимации была проведена на основе показателей, приведенных в таблице 2. Из их анализа видно, что уравнения $\Phi_1 = \Phi(\omega)$ и $\Phi_2 = f(\tau)$ с достаточной для практических и теоретических расчетов точностью описывают статистические зависимости.

Исследованием функций $\Phi_1 = \Phi(\omega)$ и $\Phi_2 = f(\tau)$ на экстремум определены «литературные» значения математических ожиданий удельной частоты отказов и продолжительности одного внезапного отключения ВЛ 10 кВ в Российской Федерации:

$$\overline{\omega} = 0,101 \text{ откл/год} \times \text{км};$$

$$\overline{\tau} = 6,1 \text{ ч/откл.}$$

Среднеквадратические отклонения этих показателей соответственно равны:

$\delta_\omega = 0,024$ откл/год х км;

$\delta_\tau = 1,449$ ч/откл.

Для определения средних «статистических» показателей надежности ВЛ 10 кВ рассмотрены данные ОРГРЭСа за 1987–1996 годы. В ходе их анализа установлено, что интегральный показатель надежности электроснабжения изменяется с течением времени очень слабо (таблица 3, рисунок 3).

Поэтому с достаточной для практики и теории точностью можно принять математическое ожидание показателей надежности распределительных линий и их среднеквадратические отклонения равными:

$$\overline{\omega} = 0,073 \text{ откл/год х км};$$

Таблица 3 – Значения интегрального показателя надежности распределительных линий в период с 1987 по 1996 годы

Год	Интегральный показатель надежности электроснабжения, о. е.
1987	0,6374
1988	0,6846
1989	0,6682
1990	0,6665
1991	0,6780
1992	0,6778
1993	0,6701
1994	0,6702
1995	0,6702
1996	0,6750

$\overline{\tau} = 4,6$ ч/откл.;

δ_ω = 0,017 откл/год х км;

δ_τ = 1,093 ч/откл.

Таким образом, показатели надежности по литературным источникам и полученные путем обработки статистического материала ОРГРЭСа отличаются друг от друга. Поэтому для получения апостериорной информации о показателях надежности распределительных воздушных линий необходимо объединить эти виды информации, как уже упоминалось, на основе байесовского подхода.

Апостериорное распределение при известных характеристиках m_1, m_2, δ_1^2, δ_2^2, согласно теореме Байеса, имеет вид [7]

$$g_y\left(\frac{Y}{X}\right) = \exp\left\{-\left(Y - \frac{\delta_1^2 m_2 + \delta_2^2 m_1}{\delta_1^2 + \delta_2^2}\right)\Bigg| \Bigg[2 \times \left(\frac{\delta_1^2 \times \delta_2^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2}\right)\Bigg]\right\}. \quad (1)$$

где m_1, m_2 – соответственно математическое ожидание априорной и дополнительной информации; δ_1^2, δ_2^2 – соответственно дисперсия априорной и дополнительной информации; X – информация, полученная в результате дополнительных наблюдений;

$g_y\left(\frac{Y}{X}\right)$ – плотность вероятности переменной Y при условии равенства переменной X ее значению χ.

Из уравнения (1) следует, что математическое ожидание M и дисперсия δ^2 апостериорного распределения при известных характеристиках распределений априорного и дополнительного равны

$$M = \frac{\delta_1^2 m_2 + \delta_2^2 m_2}{\delta_1^2 + \delta_2^2}; \quad (2)$$

$$\delta^2 = \frac{\delta_1^2 \delta_2^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2}. \quad (3)$$

Таким образом, уточненные данные с помощью формул (2) и (3) значения математических ожиданий показателей надежности и их среднеквадратические отклонения соответственно равны:

$\overline{\omega} = 0,846$ откл/год х км;

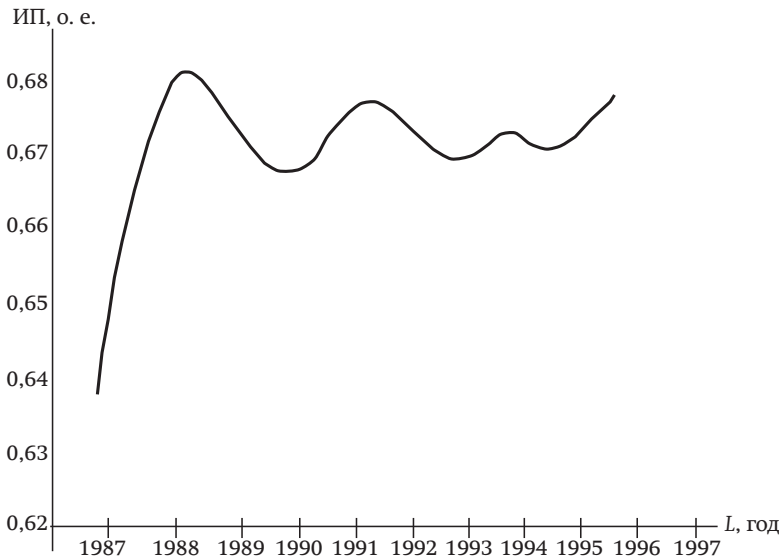

Рисунок 3 – Характер изменения интегрального показателя надежности ВЛ 10 кВ в период с 1987 по 1997 годы

Figure 3 – The nature of the change in the integrated reliability indicator of overhead lines 10 kV in the period from 1987 to 1997

$\overline{\tau} = 5,245$ ч/откл.;
δ_{ω} = 0,0139 откл/год х км;
δ_{τ} = 0,8725 ч/откл.

Приведенная методика может быть также использована при уточнении показателей надежности других элементов электрической сети, таких как трансформаторы, шинные конструкции, пункты автоматического секционирования и резервирования и др. Полученные средние значения показателей надежности будут в этом случае обладать большей степенью точности по сравнению с приводимыми в литературе. Однако их точность повысится с уменьшением длины рассматриваемой распределительной сети 10 кВ в связи с возможностью получения более точных и конкретных статистических данных показателей надежности элементов электрической сети, например, для районов электрических сетей по сравнению с энергосистемой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по определению экономической эффективности средств повышения надежности в сельских электрических сетях. М. : Сельэнергопроект, 1985. 130 с.
2. **Гиндулин Ф. А, Дульзон Н. А.** В качестве исходной информации об аварийных отключениях ЛЭП 10 кВ // Известия вузов. Энергетика. 1984. № 5. С. 41–44.
3. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными электроустановками. М. : Союзтехэнерго, 1985. 19 с.
4. **Прусс В. Л., Тисленко В. В.** Повышение надежности сельских электрических сетей. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
5. Надежность электроснабжения / Под ред. И. А. Сыромятникова. Л. : Энергия, 1967. 272 с.
6. **Лещинская Т. Б.** Методы выбора стратегий развития систем электроснабжения сельских районов: автореф. дис. … доктора техн. наук: 05.20.02 / Лещинская Тамара Борисовна. М. : ВИЭСХ, 1990. 25 с.
7. **Хей Дж.** Введение в методы байесовского статистического вывода. М. : Финансы и статистика, 1987. 335 с.

REFERENCES

1. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ekonomicheskoj effektivnosti sredstv povysheniya nadezhnosti v sel'skih elektricheskih setyah* [Guidelines for determining the economic efficiency of reliability enhancement tools in rural electric networks]. M. : Sel'energoproekt, 1985. 130 p.
2. **Gindulin F. A, Dul'zon N. A.** *V kachestve iskhodnoj informacii ob avarijnyh otklyucheniyah LEP 10 kV* [As initial information on emergency power line outages 10 kv] // Izvestiya vuzov. Energetika. 1984. № 5. pp. 41–44.
3. *Ukazaniya po primeneniyu pokazatelej nadezhnosti elementov energosistem i raboty energoblokov s paroturbinnymi elektroustanovkami* [Guidelines for the use of reliability indicators for power system elements and the operation of power units with steam turbine electrical installations]. M. : Soyuztekhenergo, 1985. 19 p.
4. **Pruss V. L., Tislenko V. V.** *Povyshenie nadezhnosti sel'skih elektricheskih setej* [Improving the reliability of rural electricity networks]. L. : Energoatomizdat, 1989. 208 p.
5. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya* [Power Reliability] / Pod red. I. A. Syromyatnikova. L. : Energiya, 1967. 272 p.
6. **Leshchinskaya T. B.** *Metody vybora strategij razvitiya sistem elektrosnabzheniya sel'skih rajonov* [Methods for choosing strategies for the development of rural electricity supply systems]: Avtoref. dis. … dokt. tekhn. nauk: 05.20.02 / Leshchinskaya Tamara Borisovna. M. : VIESKH, 1990. 25 p.
7. **Hej Dzh.** *Vvedenie v metody bajesovskogo statisticheskogo vyvoda* [Introduction to Bayesian Statistical Inference Methods]. M. : Finansy i statistika, 1987. 335 p.

***Лещинская Тамара Борисовна**, доктор техн. наук, профессор*
Тел. 8-926-416-18-23, E-mail: tamara.leschinskaya@gmail.com

***Белов Сергей Иванович**, канд. техн. наук, доцент*
E-mail: sbelov-@mail.ru

***Петров Павел Сергеевич**, аспирант*
E-mail: petrov_ps@inbox.ru