

УДК 621.315.1/2

НИКИТИН АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ

E-mail: NikitinAntonV@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

**ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ СЕЛЬСКИХ ЛЭП
ПО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

В основе методик выбора оптимального сечения проводников сельских линий электропередачи лежит метод определения экономической плотности тока, разработанный еще в середине XX в. Несмотря на то что данный метод неоднократно совершенствовался, остается ряд задач, требующих дальнейшей актуализации. К таким задачам относятся: учет динамики затрат на ремонты и обслуживание линий в течение срока службы, совершенствование формы значений экономической плотности тока, позволяющее их использовать независимо от региональных технико-экономических показателей и динамики электрической нагрузки в течение расчетного периода. С учетом поставленных в работе задач разработана технико-экономическая модель. На основании данной модели рассчитаны значения экономической плотности тока для воздушных линий электропередачи 10 кВ с неизолированными проводами и проведено сравнение со значениями, представленными в действующей нормативно-технической документации. В результате сравнения выявлено, что полученные значения экономической плотности тока значительно (более чем в 2 раза) отличаются от существующих и зависят от большого числа параметров, характерных для конкретной электрической сети. В связи с этим предложено представлять значения экономической плотности тока в виде произведения переменной и постоянной составляющих. При этом постоянная составляющая может быть приведена в нормативных документах, а переменная должна рассчитываться при проектировании с учетом параметров конкретной электрической сети. Получены выражения составляющих экономической плотности тока, а также значения постоянной составляющей для сельских линий электропередачи современных конструкций.

Ключевые слова: выбор сечения проводника, сельские линии электропередачи, экономическая плотность тока, дисконтированные затраты.

Введение. Сельские линии электропередачи (ЛЭП) 10-35 кВ имеют большой удельный вес в системе электроснабжения страны (около 1,1 млн км) и в значительной степени оказывают влияние на качество электроэнергии и надежность её передачи.

В настоящее время сельские ЛЭП 10-35 кВ характеризуются низкой надежностью и высоким уровнем потерь электроэнергии. Одной из основных причин этого являются малые сечения проводников ЛЭП, в связи с чем выбор сечения является важной задачей.

Согласно [1], в основе методики выбора оптимального сечения проводника лежит поиск экономически целесообразного сечения по экономической плотности тока, которое определяется по выражению

$$F = \frac{I}{j_{\text{эк}}}, \quad (1)$$

где I – расчетный ток, А; $j_{\text{эк}}$ – нормированное значение экономической плотности тока для заданных

условий работы, А/мм². Выбранное экономическое сечение затем проверяется по другим условиям (по нагреву, допустимой потере напряжения, механической прочности и др.) и при необходимости корректируется.

Выражение (1) применимо в настоящее время, но требует актуализации, поскольку нормированные значения экономической плотности тока (ЭПТ), представленные в ПУЭ, устарели, в связи с тем что:

- использованы стоимостные показатели на электроэнергию и ЛЭП на уровне 40-50-х гг. XX в.;
- не учитывают динамику изменения основных технико-экономических показателей электрической сети во времени;
- не учитывается применение материалов и конструкций, используемых при сооружении современных ЛЭП (изолированные провода, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, воздушные линии 20-35 кВ в «габарите» 10 кВ);
- не учитывают современного требования к выбору сечения в ЛЭП проводника на весь срок службы (30-40 лет) [2];

– получены по критерию минимума приведенных затрат, тогда как в настоящее время в качестве основного экономического критерия применяется минимум дисконтированных затрат за расчетный период.

К настоящему времени ряд работ были посвящены определению значений ЭПТ в современных условиях. Так, в [3] разработана современная технико-экономическая модель ЛЭП по критерию минимума дисконтированных затрат, на основе которой получены значения ЭПТ для ВЛ 110-220 кВ, в работе [4] получены значения ЭПТ для ЛЭП 6-35 кВ. Тем не менее задача определения экономической плотности тока остается актуальной, поскольку в современных работах не отражен ряд важных проблем:

– в технико-экономических моделях ЛЭП не учитывается динамика затрат на ремонты и обслуживание во времени;

– форма, в которой приведены значения ЭПТ, не учитывает универсальность применения данных значений, поскольку они отражают лишь частный случай, характерный для определенной ЛЭП.

– значения ЭПТ приведены для токовой нагрузки в начале расчетного периода, что создает трудности при выборе оптимального сечения проводника на период эксплуатации, поскольку проверка сечения по нагреву и допустимым потерям напряжения рассчитывается исходя из нагрузки в конце расчетного периода.

Цель исследования – разработать технико-экономическую модель ЛЭП в современных условиях, на её основе получить выражение и значения экономической плотности тока в ЛЭП современных конструкций. Сравнить полученные значения с нормированными значениями ЭПТ, приведенными в ПУЭ.

Результаты и обсуждение. Выражение удельных дисконтированных затрат на сооружение и эксплуатацию ЛЭП, с учетом допущения об ограничении срока строительства одним годом, имеет вид [5]:

$$ДЗ = K + \sum_{t=1}^{T_{расч}} I_{(t)} \cdot (1 + E)^{1-t}, \quad (2)$$

где K – удельные единовременные капитальные вложения, тыс. руб.; $I_{(t)}$ – эксплуатационные издержки в год t , тыс. руб.; E – норма дисконта, о.е.; $T_{расч}$ – продолжительность расчетного периода, год.

Анализ данных по капитальным вложениям в ЛЭП одного класса напряжения показывает, что зависимость их стоимости от сечения проводов может быть представлена выражением [6-8]:

$$K = K'_\sigma \cdot l \cdot k_{cm} = (K'_\sigma + K''_\sigma \cdot F) \cdot l \cdot k_{cm}, \quad (3)$$

где K'_σ – базовая стоимость строительства, тыс. руб./км; K''_σ – постоянная составляющая базовой стоимости строительства, тыс. руб./км; K''_σ – коэффициент, учитывающий зависимость базовой стоимости строительства от сечения провода для ЛЭП, тыс. руб./км · мм²; F – сечение проводника, мм²; l – длина ЛЭП, км; k_{cm} – коэффициент пересчета стоимости строитель-

ства из базовых цен в текущие. Коэффициент пересчета рассчитывается по выражению [9]:

$$k_{cm} = k_{mp} \cdot k_{доп.з} \cdot k_{рез} \cdot k_{зон}, \quad (4)$$

где k_{mp} – коэффициент перехода от базовых цен к ценам текущего периода; $k_{доп.з}$ – коэффициент дополнительных затрат при строительстве на благоустройство, временные здания и сооружения, проектно-изыскательские работы и авторский надзор, прочие работы и затраты; $k_{рез}$ – коэффициент, учитывающий регионально-климатические условия осуществления строительства (отличия в конструктивных решениях) в регионах Российской Федерации по отношению к базовому району; $k_{зон}$ – коэффициент зонирования, учитывающий разницу в стоимости ресурсов в пределах одного региона.

Эксплуатационные издержки выразим как сумму ежегодных отчислений от капитальных вложений (на ремонты и обслуживание) и затрат, связанных с потерей электроэнергии, при этом показатели, изменяющиеся во времени, представим как произведение их значений в начале расчетного периода и коэффициента роста в год t :

$$I_{(t)} = \frac{(\alpha_{рем} + \alpha_{обс}) \cdot (K'_\sigma + K''_\sigma \cdot F) \cdot l \cdot k_{cm} \cdot k_{PC(t)} + 3 \cdot I_{(T)}^2 \cdot l \cdot r_0 \cdot \tau \cdot T_{кнэ} \cdot k_{PT(t)} \cdot \left(\frac{k_{PH(t)}}{k_{PH(T)}} \right)^2 + \Delta w_{my} \cdot l \cdot T_{кнэ} \cdot k_{PT(t)}, \quad (5)$$

где $\alpha_{рем}$, $\alpha_{обс}$ – нормы отчислений от капитальных вложений на ремонты и обслуживание соответственно, %; $I_{(T)}$ – значение тока нагрузки в конце расчетного периода, А; r_0 – удельное активное сопротивление ЛЭП, Ом/км; τ – время максимальных потерь, ч; Δw_{my} – удельные потери электроэнергии от токов утечки в ЛЭП, кВт · ч/км; $T_{кнэ}$ – тариф на покупку электроэнергии для компенсации потерь электроэнергии, тыс. руб./кВт · ч; $k_{PC(t)}$, $k_{PH(t)}$, $k_{PT(t)}$ – коэффициенты роста стоимости ЛЭП, электрической нагрузки, тарифа на компенсацию потерь электроэнергии в год t по сравнению с первым годом расчетного периода соответственно. В формуле (5) коэффициент $k_{доп.з}$ используется в связи с тем, что нормы отчисления берутся от капитальных вложений без учета дополнительных затрат, возникающих при строительстве объекта.

Подставив (3) и (5) в (2) запишем уравнение дисконтированных затрат ЛЭП. Для упрощения выражения выразим сумму произведений показателей, изменяющихся во времени, обобщенными коэффициентами:

$$k_1 = \sum_{t=1}^{T_{расч}} k_{PC(t)} \cdot (1 + E)^{1-t}, \quad (6)$$

$$k_2 = \sum_{t=1}^{T_{расч}} \frac{k_{PH(t)}^2}{k_{PH(T)}^2} \cdot k_{PT(t)} \cdot (1 + E)^{1-t}, \quad (7)$$

$$k_3 = \sum_{t=1}^{T_{расч}} k_{PT(t)} \cdot (1 + E)^{1-t}. \quad (8)$$

Суммарные дисконтированные затраты ЛЭП:

$$ДЗ = (K'_6 + K''_6 F) \cdot \left[1 + \frac{(\alpha_{рем} + \alpha_{обс}) \cdot k_1}{100 \cdot k_{доп.з}} \right] \cdot l \cdot k_{см} + \frac{3 \cdot I_{(T)}^2 \cdot l \cdot \rho \cdot \tau \cdot T_{кнз}}{10^3 \cdot F} \cdot k_2 + \Delta w_{мг} \cdot l \cdot T_{кнз} \cdot k_3 \quad (9)$$

Продифференцировав выражение (9) и приравняв производную $dДЗ/dF$ к нулю, получим

$$dДЗ/(dF) = (K'_6 + K''_6 F) \cdot \left[1 + \frac{(\alpha_{рем} + \alpha_{обс}) \cdot k_1}{100 \cdot k_{доп.з}} \right] \cdot K''_6 \cdot l \cdot k_{см} - \frac{3 \cdot I_{(T)}^2 \cdot l \cdot \rho \cdot \tau \cdot T_{кнз}}{10^3 \cdot F^2} = 0 \quad (10)$$

Из (10) выразим формулу экономической плотности тока (по отношению к току в конце расчетного периода в год T):

$$j_{эк(T)} = \frac{I_{(T)}}{F} = \sqrt{\frac{\left[1 + \frac{(\alpha_{рем} + \alpha_{обс}) \cdot k_1}{100 \cdot k_{доп.з}} \right] \cdot K''_6 \cdot k_{см} \cdot 10^3}{3 \cdot \rho \cdot \tau \cdot T_{кнз} \cdot k_3}} \quad (11)$$

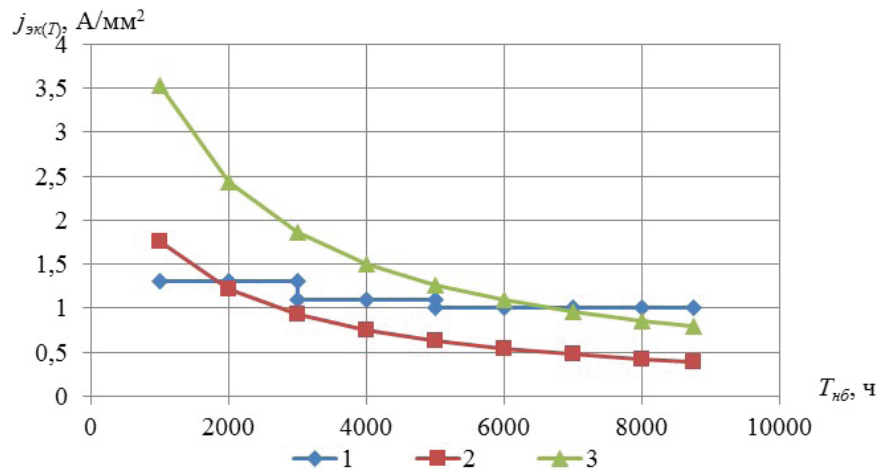
По полученному выражению рассчитаем значения экономической плотности тока для ВЛ 10 кВ с неизолированными проводами, при постоянной и переменной нагрузке в течение расчетного периода. При этом вариант с переменной нагрузкой соответствует максимальным темпам роста нагрузки в среднем по стране. Исходные данные для расчета: $E = 0,1$ о.е.; $T_{расч} = 41$ год; $K''_6 = 0,79$ тыс. руб./км·мм²; $\alpha_{рем.} = 0,6\%$; $\alpha_{обс} = 2\%$; $k_1 = 15,23$; $k_{2(Изм.)} = 4,37$; $k_{2(Пост.)} = 17,56$; $k_3 = 17,56$; $k_{см} = 4,95$; $k_{доп.з} = 1,191$; $\rho = 29$ Ом·мм²/км; $\tau = 1000 \dots 8760$ ч; $T_{кнз} = 2,51 \cdot 10^{-3}$ тыс. руб./кВт·ч. Коэффициенты роста параметров, изменяющихся во времени, представлены в виде функций времени, составленных на основании анализа статистических и прогнозных данных [10-12] и писем Минрегиона и Минстроя России:

$$k_{PH(t)} = 9,97 \cdot 10^{-4} \cdot (t-1)^2 + 8,28 \cdot 10^{-3} \cdot (t-1) + 0,991,$$

$$k_{PC(t)} = 6,62 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 5,39 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,946,$$

$$k_{PT(t)} = 5,26 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 6,86 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,931.$$

Сравнение полученных значений с приведенными в [1] приведены на рисунке.



Зависимость экономической плотности тока от числа часов использования максимума нагрузки для ВЛ 10 кВ с неизолированными проводами:
 1 – ПУЭ; 2 – расчетные значения без учета изменения нагрузки;
 3 – расчетные значения с учетом изменения нагрузки

Из анализа (11) и рисунка видно, что значение экономической плотности тока зависит от большого числа параметров, характерных для каждой конкретной сети:

$$j_{эк(T)} = f(\alpha_{рем}, \alpha_{обс}, \tau, T_{кнз}, k_1, k_3). \quad (12)$$

Соответственно значения плотности тока, рассчитанные для одной сети, могут быть абсолютно неприменимы для другой сети, даже при одинаковом конструктивном исполнении. Так, из построенных зависимостей видно, что при учете роста

нагрузки экономическая плотность увеличивается в 2 раза.

В связи с зависимостью значения экономической плотности тока от множества факторов целесообразно представить данный показатель в виде произведения переменной и постоянной составляющих.

Для удобства расчетов представим постоянные составляющие уравнения в виде

$$j_{пост.эк} = \sqrt{\frac{K''_6 \cdot 10^3}{3 \cdot \rho}}; \quad (13)$$

переменные составляющие в виде

$$\delta = \frac{\left[1 + \frac{(\alpha_{рем} + \alpha_{обс}) \cdot k_1}{k_{доп.з}} \right] \cdot k_{см}}{\tau \cdot T_{квэ} \cdot k_3} \quad (14)$$

Тогда с учетом (14), (15) выражение (11) примет вид

$$j_{эк(T)} = j_{пост.эк} \cdot \sqrt{\delta} \quad (15)$$

В представленном виде данное уравнение может быть использовано для практических расчетов. При этом постоянная составляющая может быть

приведена в нормативных документах, а переменная – должна рассчитываться при проектировании с учетом параметров конкретной сети. С учетом (15) выражение (1) для расчета экономического сечения примет вид

$$F = \frac{I_{(T)}}{j_{пост.эк} \cdot \sqrt{\delta}} \quad (16)$$

Расчитанные по (13) значения постоянной составляющей плотности тока для ЛЭП различных конструкций и исходные данные для расчета приведены в таблице.

Значение постоянной составляющей экономической плотности тока

Конструкция ЛЭП	Тип провода, кабеля	K''_{δ} , тыс. руб./км · мм ²	ρ , Ом·мм ² /км	$j_{пост.эк}$ (тыс. руб./Ом · км ²) ^{1/2}
ВЛ 10 кВ	АС	0,79	29	3,01
ВЛЗ 10-20 кВ	СИП-3 20 кВ	0,78	34,89	2,73
ВЛЗ 35 кВ	СИП-3 35 кВ	0,83		2,82
КЛ 10 кВ	АСБ 10 кВ трехжил.	0,62	30,99	2,58
	АПвПг 10 кВ трехжил.	30,42	0,7	2,77
	АПвПг 10 кВ одножил.		0,4	2,09
КЛ 20 кВ	АПвПг 20 кВ трехжил.		0,76	2,89
	АПвПг 20 кВ одножил.		0,47	2,27
КЛ 35 кВ	АПвПг 35 кВ трехжил.		0,99	3,29
	АПвПг 35 кВ одножил.		0,55	2,45

Выводы

1. Современные значения экономической плотности тока значительно отличаются от соответствующих значений, приведенных ПУЭ, в связи с чем последние требуют пересмотра.

2. В связи с зависимостью значения экономической плотности тока от множества факторов целесообразно представить данный показатель в виде произведения переменной и постоянной составляющих. При этом постоянная составляющая может быть приведена в нормативных документах, а переменная – должна рассчитываться при проектировании с учетом параметров конкретной сети.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: ДЕАН, 2015. 704 с.
2. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». 2013. 196 с. URL: <http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/polozenie.pdf> (дата обращения: 19.12.16).
3. Ефентьев С.Н. Развитие методики технико-экономического анализа при выборе основных параметров электрических сетей с учетом неопреде-

ленности исходной информации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 20 с.

4. Суворова И.А., Черепанов В.В. Определение экономической плотности тока в современных условиях для линий 6-35 кВ // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 6. С. 95-96.

5. Волькенау И.М., Зейлингер А.Н., Хабачев Л.Д. Экономика формирования электроэнергетических систем. М.: Энергия, 1981. 320 с.

6. Будзко И.А., Левин М.С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов: Учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1985. 320 с.

7. Плюгачев В.К. Основы рационального электроснабжения сельского хозяйства. Минск: Сельхозгиз БССР, 1962. 233 с.

8. Франштетер В.П., Мартыанов А.С. Выбор экономически обоснованного сечения проводов и жил кабелей линий электропередачи при проектировании // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 117-118.

9. Сборник укрупненных показателей стоимости строительства (реконструкции) подстанций и линий электропередачи для нужд ОАО «Холдинг МРСК». 2012. 71 с.

10. Сценарные условия развития электроэнергетики на период до 2030 года [Электронный ресурс] // Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике. 2010. 136 с. URL: <http://www.e->

arbe.ru/5years/pb_2011_2030/scenary_2010_2030.pdf (дата обращения: 19.12.16).

11. Калабеков И.Г. Российские реформы в цифрах и фактах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: РУСАКИ, 2010. 498 с.

12. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

Статья поступила 11.01.2017 г.

SELECTING WIRE SECTION FOR RURAL ELECTRIC POWER LINES WITH ACCOUNT OF ECONOMIC CURRENT DENSITY IN PRESENT-DAY CONDITIONS

ANTON V. NIKITIN

E-mail: NikitinAntonV@yandex.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timityzevskaya str., Moscow, 127550, Russian Federation

The method of defining the economic current density (worked out even in the middle of the 20th century) is based on the methodology of choosing an optimal wire section for rural electric power lines. Despite constant enhancements of this method there is a range of issues that require further actualization. These issues include the following: a record of dynamics of electric power lines repairs and servicing costs during their service life, data enhancement of economic current density which permits using data from notwithstanding regional technical-and-economic indexes and dynamics of electrical load during a calculation period. Taking into account the objectives assigned in this paper the authors have developed the technical and economic model. Basing on this model the data of economic current density for overhead electric power lines with the voltage 10-35 kV are calculated and the comparison with the data indicated in the active technical rules and regulations is performed. Basing on the comparison results the authors have revealed that the calculated data of economic current density significantly (more than twice) differ from the existing ones and depend on a large number of parameters indicative for a particular electrical network. Thereby they suggest casting the data of the economic current density as the product of a variable and a constant. At the same time a constant can be indicated in the normative documents while a variable is to be calculated during the construction taking into account the parameters of a particular electrical network. The present paper contains the calculated formulas for a variable and a constant of the economic current density and constants for modern rural electric power lines.

Key words: choosing wire sections, rural electric power lines, economic current density, discounted costs.

References

1. Pravila ustroystva elektroustanovok. 7th ed. [Electrical Installation Code. 7th ed.]. M.: DEAN, 2015. 704 p. (in Rus).

2. Polozhenie OAO "Rosseti" o yedinoj tekhnicheskoy politike v elektrossetevom komplekse [Provisions of OAO "Rosseti" concerning the single technical policy in the power supply network]. PAO "Rosseti". 2013. 196 p. – URL: <http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/polozenie.pdf> (access date: 19.12.16). (in Rus).

3. Efent'ev S.N. Razvitie metodiki tekhniko-ekonomicheskogo analiza pri vybore osnovnykh parametrov elektricheskikh setey s uchetom nepredelennosti iskhodnoy informatsii [Development of technical-and-economic analysis methods

in choosing of basic parameters of electrical power lines taking into consideration the uncertainty of source data.]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. M., 2004. 20 p. (in Rus).

4. Suvorova I.A., Cherepanov V.V. Opredeleniye ekonomicheskoy plotnosti toka v sovremennykh usloviyakh dlya liniy 6-35 kV [Determination of economic current density in the current conditions for lines 6-35 kV]. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2013. No. 6. Pp. 95-96. (in Rus).

5. Vol'kenau I. M., Zeilinger A.N., Khabachev L.D. Ekonomika formirovaniya elektroenergeticheskikh sistem [Economics of power-supply systems formation]. M.: Energiya, 1981. 320 p. (in Rus).

6. Budzko I.A., Levin M.S. Elektrosnabzhenie sel'skohozyaystvennykh predpriyatiy i naselennykh punktov: uchebnoe posobie [Electrical supply of rural en-

terprises and settlements: textbook]. M.: Agropromizdat, 1985. 320 p. (in Rus).

7. Plyugachev V.K. Osnovy ratsional'nogo elektrosnabzheniya sel'skogo khozyaistva [Basics of reasonable electricity supply in agricultural industry]. Minsk.: Sel'khozgiz BSSR, 1962. 233 p. (in Rus).

8. Franshteter V.P., Mart'yanov A.S. Vybor ekonomicheski obosnovannogo secheniya provodov i zhil kabelej linij elektroperedachi pri proektirovanii [Selecting economically sound section of wires and cable conductors of power lines during the design]. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2011. No. 4. Pp. 117-118. (in Rus).

9. Sbornik ukрупnennykh pokazateley stoimosti stroitel'stva (rekonstruktsii) podstantsij i linij elektroperedachi dlya nuzhd OAO "Holding MRSK" [Collection of consolidated indexes of construction (reconstruction) costs for electric power supply substa-

tions and power supply networks for the needs of OAO "Holding MRSK"]. 2012. 71 p. (in Rus).

10. Stsenarnye usloviya razvitiya elektroenergetiki na period do 2030 goda [Scenario development conditions of electric-power supply industry for the period of up to 2030]. *Agenstvo po prognozirovaniyu balansov v elektroenergetike*. 2010. 136 p. – URL: http://www.e-apbe.ru/5years/pb_2011_2030/scenariy_2010_2030.pdf (access date: 19.12.16). (in Rus).

11. Kalabekov I.G. Rossiyskie reformy v tsifrakh i faktakh [Russian reforms in figures and facts]. M.: RUSAKI, 2010. – 498 p. (in Rus).

12. Spravochnik po proektirovaniyu jelektricheskikh setej [Handbook for engineering of electric power lines] / 4th ed., reviewed and add. M.: ENAS, 2012. – 376 p. (in Rus).

Received on January 11, 2017