

УДК 338.45:621.31(470.22)

ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Г. А. Борисов, Т. П. Тихомирова

*Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН, Петрозаводск*

В статье обосновывается применение в электроэнергетической системе универсального метода минимизации расхода энергетического, эксплуатационного, финансового и экологического ресурса, заключающегося в стабилизации на заданном интервале времени суммарной мощности потребления и распределении поровну между генерирующими агрегатами стабилизированной нагрузки потребителей, если агрегаты одинаковые. В случае неодинаковых агрегатов для минимизации расхода какого-либо ресурса стабилизированная общая их нагрузка распределяется по условию равенства первых производных расходных характеристик агрегатов.

Ключевые слова: энергетический (топливный) ресурс; эксплуатационный ресурс; финансовый ресурс; экологический ресурс; минимизация расхода ресурсов; стабилизация нагрузки потребителей; равное распределение нагрузки потребителей.

G. A. Borisov, T. P. Tikhomirova. PROBLEMS AND METHODS OF RESOURCE-*SAVING* OPTIMIZATION IN AN ELECTRIC POWER SYSTEM

The paper substantiates the application of a universal method for minimizing the consumption of the energy resource, operating life, financial and environmental resources in an electric power system. The method consists in the stabilization of the total consumed power over a given time interval and the distribution of the stabilized consumer load equally among generating units in the case where all units are identical. Where the units are not identical, the consumption of a resource can be minimized by distributing their combined stabilized load based on the condition of equality of the first derivatives of the units' discharge characteristics.

Key words: energy (fuel) resource; operating life; financial resource; environmental resource; resource consumption minimization; consumer load stabilization; equal distribution of consumer loads.

Рыночная система управления функционированием электроэнергетики, заменившая ранее существовавшую в период плановой экономики систему иерархического централизованного оптимального управления, привела к ряду негативных тенденций [1]:

- увеличению потерь энергии и мощности на стадиях генерации, транспорта и распределения;
- высокой степени выработки эксплуатационного ресурса основного оборудования;

- росту штатного коэффициента и снижению производительности труда;
- снижению эффективности и объема капитальных вложений.

Произошло увеличение расхода всех видов ресурсов – энергетических, эксплуатационных, финансовых, экологических.

Итоговым результатом изменения системы управления электроэнергетики стало многократное повышение тарифов на электроэнергию и мощность, приводящее к снижению конкурентоспособности российской экономики. Ввиду этого основной целью «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» является максимально эффективное использование энергетических ресурсов.

В данной работе обосновывается использование метода оптимального управления нормальным режимом электроэнергетической системы, минимизирующего расход энергетических, эксплуатационных и финансовых ресурсов.

Начало исследований по оптимизации нормальных режимов энергосистем было положено работой Н. А. Сахарова [2], в которой обосновано использование метода неопределенных множителей Лагранжа для наилучшего распределения активных нагрузок между несколькими параллельно работающими генераторами, позволяющего находить минимум суммарного расхода топлива при заданном значении их общей нагрузки. В дальнейшем этот метод был существенно развит в различных направлениях, учитывающих потери в сетях, изменения состава оборудования, использования ГЭС с водохранилищами, возможности численных методов оптимизации и математического программирования и др. Он широко применялся в дореформенный период в отечественных и зарубежных электроэнергетических системах для оптимального управления нормальными режимами [3]. Однако это не изменило сущности исходной задачи Н. А. Сахарова.

В условиях рыночной экономики целевой функцией энергопредприятия является получение максимальной прибыли или (в многолетнем периоде) дисконтированного дохода. Будем считать, что в условиях эксплуатации для такого предприятия отсутствуют капиталовложения, неизменны структура оборудования, штаты, расходные материалы, курс рубля, цены. Топливная составляющая себестоимости превалирует над суммой других. Тогда для каждого ограниченного интервала времени T , в пределах которого оптимизируется

нормальный (установившийся) режим, максимум прибыли Π получается при минимуме потерь энергии:

$$\max \Pi = C_{\text{Э}}W - C_T \left(W + \min \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j) \right), \quad (1)$$

где $C_{\text{Э}}$, C_T – цена (тариф) на электроэнергию и топливо;

W – объем реализованной энергии;

$\Delta B(P_j)$ – потери мощности;

Δt – интервал времени, в течение которого мощность P_j считается неизменной;

$\Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j)$ – потери энергии.

В реальных условиях тарифы на электроэнергию и топливо увеличиваются с учетом фактических инфляций и издержек за предыдущий период (обычно год) и прибыли, необходимой для выплат дивидендов акционерам. Система государственного тарифного регулирования ограничивает прибыль некоторой нормой, которая получается при

$$d \leq \frac{\Pi}{C_{\text{Э}}W} = \frac{C_{\text{Э}}W - C_T \left(W - \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j) \right)}{C_{\text{Э}}W} \quad (2)$$

и

$$C_{\text{Э}} \leq \frac{C_T W - C_T \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j)}{(1-d)W}.$$

Обозначим

$$C_T \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j) = X,$$

тогда

$$\max \Pi = \max \left(\frac{C_T + X}{(1-d)} - C_T W - X \right) = \max \frac{C_T d \left(W_T + \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j) \right)}{(1-d)},$$

$$\arg \max \Pi = \arg \max \Delta t \sum_{j=1}^T \Delta B(P_j), \quad (3)$$

т. е. при заданной норме прибыли и энергии W максимум прибыли получается при максимуме потерь первичной энергии.

Это условие максимума прибыли привело к отмеченному в начале статьи увеличению расхода ресурсов в электроэнергетике.

Такая система управления грозит разрушением самой технологической системы и

Стабилизируемая во времени при таком методе оптимизации мощность отдельных агрегатов и всей системы приводит к стабилизации первичной мощности и, соответственно, к стабилизации себестоимости производства электроэнергии, что устраняет одну из причин роста тарифов – увеличение потерь первичной энергии. Поэтому данное свойство оптимального режима имеет важное следствие – получаемая при нем энергия стационарна. Она имеет неизменные во времени параметры, в том числе и стоимостные, и становится адекватной рыночным условиям.

Частная задача для одного элемента энергосистемы выявляет возможность разделения потерь энергии ΔW_i на две составляющие, которые можно назвать статической и динамической [6, 7].

$$\Delta W_i = \Delta t \sum_{i=1}^n (B_i(P_{i\text{cp}}) - P_{i\text{cp}}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_i(P_i)}{\partial P_i^2} \sum_j^T (P_{ij} - P_{i\text{cp}})^2, \quad (18)$$

где первый член – статические потери энергии, а второй – динамические потери энергии, зависящие от дисперсии конечной мощности $\sum_j^T (P_{ij} - P_{i\text{cp}})^2$.

Первая статическая составляющая потерь энергии определяется средним значением выходной мощности по расходной характеристике элемента. Вторая зависит от дисперсии отклонения нагрузки от среднего значения и второй производной расходной характеристики.

Стабилизация нагрузки влияет только на динамическую составляющую потерь, и поэтому полная стабилизация дает снижение динамической составляющей до нуля.

Условием для возникновения динамической составляющей потерь энергии является наличие дисперсии (неравномерности графика нагрузки) и второй производной расходной характеристики элемента. Таким же условием обладает эксплуатационный ресурс электрооборудования, определяемый преимущественно старением его электроизоляции и подшипников, зависящим от температуры перегрева [8, 9], определяемым нагрузкой.

Для электрооборудования срок службы изоляции обмоток T определяется законом Аррениуса

$$T = A \exp(-B(\nu_{\text{oc}} + \Delta\nu_n)), \quad (19)$$

где ν_{oc} – температура окружающей среды, °С; $\Delta\nu_n$ – превышение температуры изоляции над температурой окружающей среды, °С.

В соответствии с формулой (19) у изоляции обмоток выбирается предельно допустимая температура нагрева в зависимости от принимаемого срока ее службы и класса по нагревостойкости, так называемая максимальная номинальная рабочая температура. Получаемые при максимальной номинальной рабочей температуре мощность и ток принимаются за номинальные. Вследствие этого в установившемся режиме работы с постоянным значением максимальной номинальной рабочей температуры $\nu_{\text{oc}} + \Delta\nu_n^{\text{max}}$ все тепло изолированного проводника, образующееся в нем потерями мощности ΔP_{H} при номинальном значении нагрузки P_{H} , рассеивается в окружающую среду, и соблюдается простейший баланс [10]

$$\Delta P_{\text{H}} = R \cdot \Delta\nu_n^{\text{max}}, \quad (20)$$

где R – коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции, Вт/°С; ν_n^{max} – предельно допустимое превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды ν_{oc} , °С.

Исходя из условия (20), определяется численное значение коэффициента теплоотдачи

$$R = \frac{\Delta P_{\text{H}}}{\Delta\nu_n^{\text{max}}}. \quad (21)$$

Ввиду постоянства коэффициента теплоотдачи появляется возможность определять текущее значение температуры перегрева изоляции при любом установившемся значении потерь мощности ΔP :

$$\Delta\nu_n = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P \cdot \Delta\nu_n^{\text{max}}}{\Delta P_{\text{H}}}. \quad (22)$$

В свою очередь, потери мощности имеют две составляющие – постоянную (холостого хода) ΔP_{xx} и переменную (нагрузочную), поэтому

$$\Delta P = \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{H}} \cdot k_{\text{HГ}}^2 = \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{H}} \cdot \frac{P^2}{P_{\text{H}}^2}, \quad (23)$$

где ΔP_{H} – нагрузочные потери при номинальной мощности; $k_{\text{HГ}}$ – коэффициент нагрузки.

Тогда температура нагрева обмотки и изоляции в формуле (19) при любом значении нагрузки будет определяться тремя составляющими:

$$\nu_{\text{oc}} + \Delta\nu_n^{\text{max}} = \nu_{\text{oc}} + \frac{\Delta P_{\text{xx}}}{R} + \frac{\Delta P_{\text{H}}}{R} \cdot \frac{P^2}{P_{\text{H}}^2}, \quad (24)$$

т. е. суммой температур окружающей среды, перегрева при работе в длительном режиме холостого хода, перегрева от нагрузочных потерь, пропорциональных квадрату коэффициента нагрузки $k_{\text{HГ}} = P/P_{\text{H}}$.

В итоге формула (19) при подстановке в нее (24) принимает вид

$$T = A \exp \left[-B \cdot \left(\nu_{oc} + \frac{\Delta \nu_n^{\max}}{\Delta P_n} \cdot \Delta P_{xx} + \frac{\Delta \nu_n^{\max}}{\Delta P_n} \cdot \Delta P_{nn} \cdot \frac{P^2}{P_n^2} \right) \right]. \quad (25)$$

Такой вид зависимости срока службы изоляции электрооборудования дает возможность определить выработку эксплуатационного ресурса N , определяемую по формуле

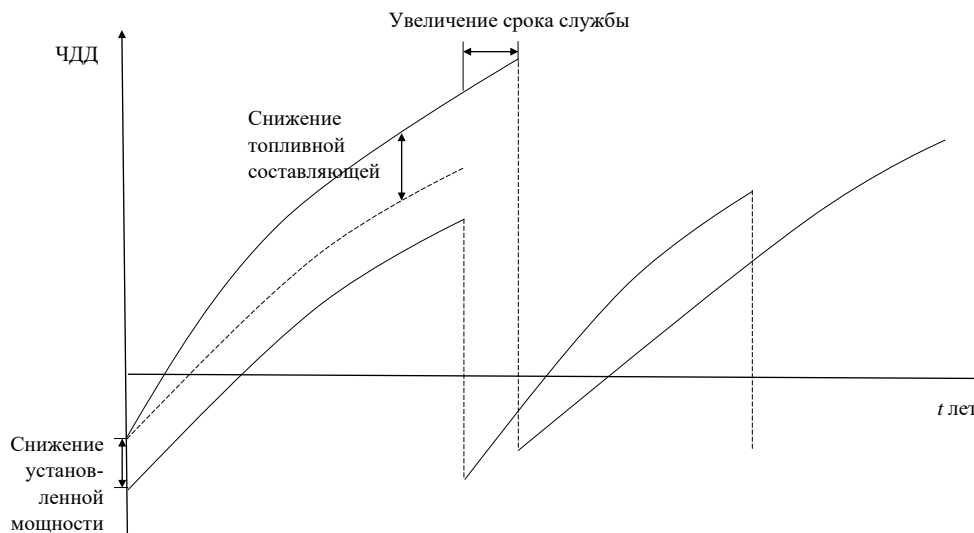
$$N = t \cdot \frac{T_n}{T}, \quad (26)$$

где t – текущее время, в течение которого нагрузка электрооборудования неизменна; T_n – нормативный срок службы изоляции; T – расчетный срок службы изоляции при текущем значении нагрузки P .

Зависимость выработки эксплуатационного ресурса от нагрузки подобна расходным характеристикам или ресурсным характеристикам агрегатов. Она непрерывна, имеет положительные первую и вторую производные. Ввиду этого минимизация расхода эксплуатационного ресурса электрооборудования полностью соответствует методам минимизации рас-

хода энергетического ресурса (топлива) в системе – стабилизации общей нагрузки потребителей, равенства нагрузок параллельно работающих агрегатов при их идентичности или равенства относительных приростов эксплуатационных ресурсов агрегатов в противном случае.

Здесь также следует отметить, что оптимизация расхода первичной энергии и эксплуатационного ресурса влияет на несколько составляющих основной целевой функции эксплуатации электрооборудования – чистого дисконтированного дохода. Оптимизация расхода энергетического ресурса позволяет уменьшить топливную составляющую в издержках эксплуатации. Кроме того, она снижает требуемую для покрытия максимума графика мощности располагаемую, а в итоге и установленную мощность системы а следовательно, требующиеся капиталовложения на строительство источника энергии, на пропускную способность элементов электрической сети. Оптимизация расхода эксплуатационного ресурса оборудования увеличивает срок службы оборудования и, соответственно, увеличивает чистый дисконтированный доход при оценке жизненного цикла оборудования. Эти влияния оптимизации на ЧДД показаны на рисунке.



Изменение составляющих ЧДД при оптимизации режима

Рассмотрев задачи и методы оптимизации расхода первичной энергии, срока службы изоляции и в конечном итоге чистого дисконтированного дохода, можно заключить, что имеется много общего в управлении этими ресурсами – одинаковый вид целевой функции; одинаковое управляющее воздействие на динамическую составляющую потерь ресурсов (стабилизация выходной мощности). Для минимизации статической составляющей потерь этих ресурсов используется условие равенства первых производных расходных характеристик агрегатов и законов Аррениуса, описывающих основную составляющую процесса старения оборудования. Ввиду их значительного различия оптимальное распределение нагрузок между агрегатами будет отличаться. Однако в случае, если параллельно работающие агрегаты имеют одинаковые ресурсные (расходные) характеристики, распределение в целях оптимизации расхода первичной энергии и ресурса изоляции будет одинаковым.

Оценки экономической эффективности применения изложенных задач и методов оптимизации нормальных режимов энергосистемы известны только для распределения нагрузок между агрегатами традиционным методом. Величина снижения расхода первичной энергии оценивается в пределах 1 % при суточном цикле оптимизации нагрузок системы [3].

Для оценки снижения динамической составляющей нагрузочных потерь первичной энергии не в электрическом, а в топливно-энергетическом хозяйстве, с использованием расходных (ресурсных) характеристик технологических переделов топливно-энергетического хозяйства Республики Карелия получена зависимость величины их снижения от коэффициента заполнения суточного графика в пределах от 0 до 1 [7]. Если принять, что коэффициент заполнения суточного графика большинства отечественных региональных энергосистем составлял величину 0,75–0,8 [11], то снижение динамической составляющей потерь составит величину 10 %. Сама динамическая составляющая может осторожно оцениваться в две трети от всех потерь в хозяйстве, т. е. $0,84 \times 0,67 = 0,56$, т. е. 56 % от всего объема первичной энергии. Тогда полная стабилизация суточного графика нагрузки конечного потребления может оцениваться снижением потерь первичной энергии в 5,6 %.

Косвенный эффект от стабилизации мощности – максимальное снижение располагае-

мой в системе мощности и соответствующее снижение установленной. Это снижение определяется величиной коэффициента заполнения суточного графика. При значении его, равном 0,75–0,8, максимальное снижение установленной мощности генерации и соответствующее снижение пропускной способности сетей и всех их элементов составит величину 20–25 %. Эта составляющая чистого дисконтированного дохода превосходит все другие. Кроме того, эффект проявляется сразу после ввода оборудования энергосистемы в эксплуатацию.

Экономический эффект от снижения расхода эксплуатационного ресурса или увеличения срока службы электрооборудования относится к заключительному периоду его эксплуатации ввиду высокого уровня инфляции.

В связи с этим в настоящее время из-за дефицита инвестиций в электроэнергетике последние 25 лет более 50% оборудования отработали свой ресурс. Для него продление срока службы и отнесение в будущее затрат на его замену имеет важное значение.

Снижение при оптимизации нормальных режимов электроэнергетических систем расхода энергетических и эксплуатационных ресурсов одновременно снижает и негативное воздействие их на природную среду.

Таким образом, приближенные оценки показывают высокую эффективность предлагаемых методов оптимизации нормального режима энергосистем. Ввиду этого целесообразна дальнейшая их разработка в направлении способов реализации сглаживания и полной стабилизации графиков нагрузки, без которых полученные оценки дают лишь валовый (теоретический) потенциал предлагаемых методов.

Выводы

1. Необходимым условием снижения расхода ресурсов в электроэнергетической системе при рыночных отношениях является снижение инфляции до низкого уровня, при котором стабилизируются тарифы на конечную энергию, становится целесообразной минимизация расхода всех видов ресурсов.
2. Для минимизации расхода первичной энергии в электроэнергетической системе с несколькими работающими агрегатами требуется стабилизация в течение регулируемого периода времени мощности потребителей и распределение нагрузки

между агрегатами по методу Н. А. Сахарова – равенству первых производных расходных характеристик агрегатов.

3. Снижение расхода первичной энергии происходит при стабилизации мощности потребителей за счет снижения динамической составляющей потерь энергии, а при наивыгоднейшем распределении нагрузки между агрегатами – за счет снижения статической составляющей потерь энергии. Снижение динамической составляющей потерь энергии происходит и при стабилизации нагрузки одного агрегата системы.
4. Аналогичными свойствами и методами минимизации расхода ресурсов обладает ресурс изоляции (эксплуатационный ресурс) электрооборудования системы. Ввиду этого при одинаковых параллельно работающих агрегатах системы стабилизация суммарной потребляемой мощности и одинаковое распределение ее между работающими агрегатами приводит к получению глобального минимума расхода финансовых ресурсов – минимуму издержек эксплуатации и максимуму чистого дисконтированного дохода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Э. П., Баринов В. А. Вопросы совершенствования системы управления развитием и функционированием электроэнергетики в условиях ее реформирования // Изв. РАН. Энергетика. 2008. № 6. С. 35–48.
2. Сахаров Н. А. Метод наивыгоднейшего распределения активных нагрузок между несколькими работающими генераторами // Электричество. 1927. № 5. С. 167–169.
3. Баринов В. А., Совалов С. А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990. 440 с.

REFERENCES

1. Volkov E. P., Barinov V. A. Voprosy sovershenstvovaniya sistemy upravleniya razvitiem i funktsionirovaniem elektroenergetiki v usloviyakh ee reformirovaniya [Issues of the control system improvement of the Russian power industry operation and development under reform]. *Izv. RAN. Energetika* [Proceed. of the RAS. Power Engineering]. 2008. No. 6. P. 35–48.
2. Sakharov N. A. Metod naivyygodneishego raspredeleniya aktivnykh nagruzok mezhdu neskol'kimi rabotayushchimi generatorami [A method for the optimal active loads dispatching

4. *Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов*: Офиц. изд. 2 ред. М.: Экономика, 2000. 421 с.

5. Борисов Г. А., Тихомирова Т. П. Обобщенная и частная задача минимизации расхода первичной энергии в системе // *Обзорные прикладной и промышленной математики*. 2014. Вып. 1. С. 39–41.

6. Борисов Г. А., Тихомирова Т. П. Методы минимизации потерь энергии и мощности в топливно-энергетическом хозяйстве региона // *Труды КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии*. 2013. № 1, вып. 4. С. 12–17.

7. Борисов Г. А., Тихомирова Т. П. Оценка динамической составляющей нагрузочных потерь энергии в элементах электрических сетей // *Труды КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии*. 2014. № 4. С. 25–28.

8. Борисов Г. А., Тихомирова Т. П. Увеличение ресурсов изоляции и подшипников электрических двигателей путем наивыгоднейшего распределения нагрузок // *Ученые записки ПетрГУ. Сер. Естественные и технические науки*. 2012. Т. 1, № 8. С. 83–85.

9. Борисов Г. А., Тихомирова Т. П. Задачи и методы максимального увеличения ресурса изоляции силовых трансформаторов // *Труды КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии*. 2015. № 10. С. 24–27. doi: 10.17076/mat137

10. *Проектирование электрических машин*: Учебник для вузов / Под. ред. И. П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.

11. Родионов В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. М.: ЭНАС, 2010. 352 с.

Поступила в редакцию 21.06.2017

among several running generators]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1927. No. 5. P. 167–169.

3. Barinov V. A., Sovalov S. A. Rezhimy energosistem: Metody analiza i upravleniya [Regimes of power systems: methods of analysis and management]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 440 p.

4. *Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов*: Офиц. изд. 2 ред. [Methodological recommendations for investment projects assessment. Official ed. 2nd rev.]. Moscow: Ekonomika, 2000. 421 p.

5. *Borisov G. A., Tikhomirova T. P.* Obobshchennaya i chastnaya zadacha minimizatsii raskhoda pervichnoi energii v sisteme [Generalized and partial problems of minimizing primary energy consumption in a power system]. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki [Journal of Applied and Industrial Mathematics]*. 2014. Vol. 1. P. 39–41.

6. *Borisov G. A., Tikhomirova T. P.* Metody minimizatsii poter' energii i moshchnosti v toplivno-energeticheskom hozyaistve regiona [Methods to minimize energy and power losses in the regional fuel-and-energy sector]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]*. 2013. No. 1. P. 12–17.

7. *Borisov G. A., Tikhomirova T. P.* Otsenka dinamicheskoi sostavlyayushchei nagruzochnykh poter' energii v elementakh elektricheskikh setei [Assessment of the dynamic component of load losses of energy from power grids elements]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]*. 2014. No. 4. P. 25–28.

8. *Borisov G. A., Tikhomirova T. P.* Uvelichenie resursov izolyatsii i podshipnikov elektricheskikh

dvigatelei putem naivygodneishego raspredeleniya nagruzok [Extending service life of isolation and bearings in electric motors by optimizing load distribution]. *Uchenye zapiski PetrGU. Ser. Estestvennye i tehnicheckie nauki [Proceed. of Petrozavodsk St. Univ. Natural and Engineering Sciences]*. 2012. Vol. 1, no. 8. P. 83–85.

9. *Borisov G. A., Tikhomirova T. P.* Zadachi i metody maksimal'nogo uvelicheniya resursa izolyatsii silovykh transformatorov [Tasks and methods for maximizing the insulation resource of power transformers]. *Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]*. 2015. No. 10. P. 24–27.

10. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: Uchebnik dlya vuzov [Design of electric machines: an university textbook]*. Ed. I. P. Kopylov. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 757 p.

11. *Rodionov V. G.* Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego [Energetics: current problems and future prospects]. Moscow: JeNAS, 2010. 352 p.

Received June 21, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Борисов Георгий Александрович

к. т. н.

эл. почта: borisov@krc.karelia.ru

Тихомирова Тамара Петровна

ученый секретарь, к. т. н.

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН

ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,

Республика Карелия, Россия, 185910

эл. почта: tihomiro@krc.karelia.ru

тел.: (8142) 785520

CONTRIBUTORS:

Borisov, Georgy

e-mail: borisov@krc.karelia.ru

Tikhomirova, Tamara

Institute of Applied Mathematical Research,

Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences

11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,

Karelia, Russia

e-mail: tihomiro@krc.karelia.ru

tel.: (8142) 785520