

nyi analiz. Modelirovanie. 2014. № 2 (42). P. 92-96.

8. Mistrov L.E. Method for the synthesis of information management strategies of socio-economic systems // Informatsionnye voyny. 2014. № 1 (29). P. 34-40.

9. Shipton H., Zhou Q. Mooi E.A. Is there a global model of learning organizations? An empirical, cross-nation study // International Journal of Human Resource Management. 2013. № 24 (12). P. 2278-2298.

10. Ivakhnenko A.G., Storublev M.L. The application of information practices in the management of quality management system processes // Informatika i sistemy upravleniya. 2009. № 2. P. 86-92.

11. Bashin Yu.B., Borisova K.B. The use of certain methods of management to assess the effectiveness of the enterprise information system // Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba. 2009. № 3. P. 3-10.

12. Shupletsov A.F., Kharitonova P.V. Economic-mathematical model of perfection of corporate planning in industrial companies // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii (Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava: BGUEP). 2013. № 6. P. 16.

13. Mooi E.A., Ghosh M. Contract Specificity and its Performance Implications. Journal of Marketing, 2010. № 74 (2). P. 105-129.

14. Shupletsov A.F., Kharitonova P.V. Modeling of the optimal strategy of business development of industrial companies through the effective use of the potential of intangible resources // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii

(Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava: BGUEP). 2013. № 6. P. 8.

15. Chen M. The effects of strategic alliances on airline profitability. Economic Issues. 2000. № 5 (3) P. 87-99.

16. Vakhrusheva M.Yu. Systems of modern information technologies at the enterprises // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika i upravlenie. 2005. T. 1. P. 114-116.

17. Mooi E.A., Frambach R.T. Encouraging innovation in business relationships - A research note. Journal of Business Research. 2012. № 65 (7). P. 1025-1030.

18. Vakhrusheva M.Yu. IT-problems in the implementation of PLM // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika i upravlenie. 2010. T. 2. P. 91-93.

19. Mistrov L.E. Method of estimation of efficiency of information management systems // Informatsionnye voyny. 2011. № 4. P. 60-64.

20. Goryacheva N.V. Methods for determination of information saturation objects of quality management system // Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva. 2013. № 1 (24). P. 202-205.

21. Capron L., Mitchell W., Anand S. Asset divestiture following horizontal acquisitions: A dynamic view. Strategic Management Journal. 2001. № 22 (9). P. 817- 844.

22. Mooi E.A., Gilliland D.I. How Contracts and Enforcement Explain Transaction Outcomes. International Journal of Research in Marketing. 2013. № 30 (4). P. 395-405.

УДК 621.311+620.9

Использование энергетических критериев при принятии решений в энергетике

В.С. Степанов^a, Т.Б. Степанова^b

Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^astepanov@istu.edu, ^bstepanova@istu.edu

Статья поступила 16.08.2014, принята 6.11.2014

Существующая практика выбора параметров оборудования, новых технологий и направлений развития отраслей, основанная на экономическом анализе, имеет существенные недостатки: большую неопределенность экономических показателей, а также ориентацию на получение в экономике максимальной прибыли за короткий срок. Такой подход не может учесть две важнейшие задачи: рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды. Поэтому при выборе вариантов развития перспективных технологий предлагается сочетать экономические критерии с энергетическими (термодинамическими), либо экономические вообще исключить. В статье приводится краткий обзор методов, основанных на использовании энергетических критериев, которые условно можно назвать термоэкономикой. Наиболее современное направление развития этих методов связано с использованием понятия «эксергия» как обобщенной характеристики, учитывающей неодинаковую работоспособность разных форм энергии. В качестве критерия применимости предлагаемых методов для поиска оптимального значения плотности тока при выборе сечения проводов для проектирования систем электроснабжения использован минимум суммы удельных затрат эксергии (СУЗЭК) на сооружение и эксплуатацию объекта за весь срок его службы. Подробно описан алгоритм решения задачи, проведены расчеты для неизолированных проводников из меди и алюминия. Расчеты показали, что значения оптимальной плотности тока, установленные по энергетическому критерию, уменьшаются с увеличением срока службы объекта и возрастают с ростом затрат эксергии на его строительство и оснащение оборудованием. Кроме того, величины, найденные по энергетическому критерию, меньше величин нормированной плотности тока, установленных по экономическому критерию. В условиях рыночной экономики принципиально неправомерно использование ранее установленных нормированных значений экономической плотности тока, рекомендуемых «Правилами устройства электроустановок». Необходим поиск новых критериев оптимальности взамен приведенным экономическим затратам. В качестве альтернативы следует рассматривать различные термодинамические показатели, в том числе СУЗЭК.

Ключевые слова: проектные решения, энергетические критерии, эксергетический анализ, оптимальная плотность тока.

Using energy criteria when making decisions in power engineering

V.S. Stepanov^a, T.B. Stepanova^b

Irkutsk State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^astepanov@istu.edu, ^bstepanov@istu.edu

Received 16.08.2014, accepted 6.11.2014

The practice for choosing parameters for the equipment, new technologies and direction for the development of branches, based on the economic analysis, has some drawbacks such as large uncertainty of economic indexes and orientation towards obtaining the maximal profit in a short time period. Such method cannot take two very important tasks into account. They are rational use of natural resources and environmental protection. That is why, when choosing variants for the development of advanced technologies, it is necessary to combine economic criteria with energy (thermodynamic) ones or to exclude economic indexes at all. Short review of alternative methods, based on using energy criteria which can be called as thermoeconomics, has been given. The most modern direction for developing the methods is to use the conception of exergy as generalized feature, taking different working capacity for different energy forms into account. To find the reasonable value for the current density when selecting wire sizes for the design of electrical systems, as an applicability criterion for the methods proposed, a minimum of the sum of the exergy unit cost has been used for the construction and maintenance of the object for the entire service life. Detailed description of the algorithm for solving the problem has been given. Calculations for bare copper and aluminum conductors have been carried out. The calculations have shown that the optimal values for the current density, defined by energy criterion, decrease with increasing the service life of the object and increase with growing the exergy consumption for object construction and equipping. Furthermore, the values found for energy criterion, are smaller than the values of normalized current density set by economic criteria. In the market economy, it is fundamentally wrong to use previously installed normalized values of economic current density recommended by the Regulations for Electrical Installation. It is necessary to find new optimality criteria instead of economic costs given. Various thermodynamical parameters should be studied as alternative ones, including a minimum of the sum of the exergy unit cost.

Key words: project decisions, energy criteria, exergy analysis, current reasonable density.

Введение. Все процессы, связанные с хозяйственной деятельностью человека, сопровождаются потреблением энергии различных видов. Поэтому принятие решений по выбору типа и параметров источников энергии, схем энергоснабжения, в конечном итоге, перспективных направлений развития топливно-энергетической отрасли требуют всестороннего рассмотрения, привлечения показателей и критериев, основанных на идеях из многих областей знания.

Существующая практика плановых и проектных расчетов (в том числе оптимизационные расчеты по выбору типа, состава и параметров технических объектов) обычно основываются на экономических критериях. В то же время экономические показатели — стоимость оборудования, проценты по кредитам, уровень инфляции в расчетном сроке, норма дисконтирования затрат — обладают существенной неопределенностью. Поэтому выбор перспективных решений не может опираться только на них, необходимо дополнять этот анализ другими характеристиками, в частности энергетическими.

Современные проблемы возникли с середины XX века, когда человечество столкнулось с нехваткой энергетических ресурсов и одновременно осознало необходимость охраны окружающей среды. Основным методом для решения как энергосберегающих, так и экологических проблем является повышение термодинамической эффективности процессов.

При такой постановке задачи для выбора оптимального варианта уже недостаточно иметь минимум капиталовложений и издержек, максимум рентабельности. Задача значительно сложнее, поэтому для ее решения нужны другие, нетривиальные методы и показатели.

Идеальным подходом было бы сочетание энергетических и экономических критериев.

Функциональные связи между термодинамическими и технико-экономическими характеристиками технических систем весьма сложны, и аналитически описать их часто не удается. Поэтому в таких случаях оптимизацию проводят в два этапа. На первом этапе, используя методы термодинамики, находят узкую область, в которой рассматриваемая система имеет приемлемую структуру и оптимальные с позиции используемых критериев параметры. На втором этапе проводится чисто экономическая оптимизация по минимизации соответствующей целевой функции.

Однако такой двухэтапный метод требует больших затрат времени и не гарантирует нахождение оптимального решения, одновременно отвечающего критериям оптимизации первого и второго этапов. Некоторые исследователи предлагают заменить экономические критерии энергетическими.

Нужно отметить, что основы анализа с использованием экономических и энергетических критериев были предложены еще в конце XIX века. Одной из первых в этой области была работа С.А. Подолинского, опубликованная в 1880 г. [1]. В этой работе понятие *энергия* применено к процессам жизни на Земле, а труд определяется как средство для увеличения преобразованной энергии или преодоления ее рассеяния.

Автор [1] проанализировал сложные процессы накопления и расходования энергии в различных объектах, привел наглядные примеры сопоставления затраченной и полученной в результате человеческой деятельности энергии. Однако, к сожалению, среди современников Подолинского не нашлось последователей для дальнейшего развития его идей в этой области.

После первой мировой войны известный ученый Фредерик Содди заинтересовался вопросами недоиспользования трудовых и природных ресурсов. Он представил деятельность человека в виде термодинамического процесса и сделал вывод, что недоиспользование энергетических ресурсов, а, следовательно, и экономическое отставание, вызвано неадекватной системой финансовых оценок. Содди считал, что денежная система оценок, связанная с рынком, некорректна [2].

Но и идея Содди о взаимосвязи энергопотребления и экономического развития была забыта после того, как мировая экономика вышла из кризиса. Дальнейшее усовершенствование энергетическая теория получила уже во второй половине прошлого столетия.

В конце 1960-х годов мировой рынок ощутил нехватку ископаемого топлива, а после энергетического кризиса 1973 г. энергосбережение стало главным пунктом политики капиталистических стран, и интерес к энергетическому анализу снова возрос. Выяснилось, что, поскольку экономический анализ ориентирован на получение в экономике максимальной прибыли за короткий срок, он не всегда отвечает общегосударственным интересам, а тем более интересам всего человечества с точки зрения рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Энергетический анализ с этой точки зрения приводит к более объективным выводам и может быть использован в трех аспектах:

- для решения глобальных проблем, связанных с рациональным использованием природных ресурсов и охраной окружающей среды;

- для повышения надежности принятия стратегических решений в области энергетической политики страны;

- для разработок новых технологических схем и усовершенствования оборудования по выпуску энергоемкой продукции на уровне отраслей промышленности и отдельных предприятий.

В настоящее время предложено несколько методов энергетического анализа, получивших более или менее широкое распространение в различных странах. Используя различные методические подходы, авторы соответственно по-разному именуют свой способ анализа: анализ «вход – выход», энергетический блок-метод, термодинамический анализ, термоэкономический анализ, анализ по энергии-нетто [3; 4].

Общими моментами для всех этих методов является декомпозиция рассматриваемой системы на отдельные технологические процессы или этапы, определение основных параметров системы и составление в большинстве случаев энергетического баланса. В то же время имеются и существенные различия.

Значительно более объективную информацию для сравнения различных систем позволяет получить *термодинамический анализ*, разработке и совершенствованию которого посвящены фундаментальные труды. Он играет весьма существенную роль при проектировании и усовершенствовании энергетических систем, однако окончательное решение принимается по экономическим денежным оценкам. Часто рекомендации термодинамического и технико-экономического методов анализа могут существенно различаться.

В 60-х годах прошлого столетия М. Трайбусом [6; 7] была разработана методика математического моделирования и оптимизации сложных энергетических систем, одновременно учитывающая термодинамические и экономические факторы, которая получила название *термоэкономика*. Основой термоэкономического метода является описание состояния энергетического объекта в целом и отдельных его элементов с помощью некоторой обобщенной термодинамической характеристики, обеспечивающей конечный полезный эффект.

Методика построения термоэкономических моделей получила широкое распространение для исследования и оптимизации разнообразных технических объектов: холодильных и насосных установок, тепловых электростанций на органическом топливе, различных генерирующих установок, работающих на основе возобновляемых источников энергии, и т. п.

Следующим этапом в области энергетического анализа является *анализ по энергии-нетто*, вообще независимый от денежных критериев. Он заключается в сопоставлении энергии, выдаваемой энергетической установкой или системой, и затраченной как на совершение работы или процесса, так и на создание оборудования и его обслуживание, включая добычу и доставку топлива. Если устанавливать довольно широкие границы системы, для которой рассчитываются такие затраты, то может оказаться, что их величина с учетом кумулятивных затрат энергии на собственные нужды сопоставима с количеством энергии, генерируемой объектом за весь срок службы, а иногда и превышать его.

Такие расчеты были выполнены для целого ряда энергетических объектов, и результаты получились очень интересными, заслуживающими внимания и изучения.

На основе этих исследований и возникло понятие *энергия-нетто*, означающее разность между полученной энергией за период эксплуатации объекта и энергией, затраченной как на его эксплуатацию, так и его создание. Очевидно, что сооружать рассматриваемый объект целесообразно только в том случае, если величина энергии-нетто будет положительной. И чем она больше, тем более обоснованной с позиций термодинамики (*и здравого смысла!*) является реализация данного объекта. Таким образом, еще до проведения технико-экономического анализа различных вариантов какого-либо генерирующего объекта по этому показателю можно отобрать из них заведомо непригодные, ибо сооружать установку, на которую затрачивается энергии больше, чем она в состоянии в дальнейшем выработать, просто абсурдно.

В дальнейшем подобные исследования в основном получили развитие с использованием термина *эксергия*. Это и понятно, поскольку важно сопоставить не только количество потребленной и произведенной энергии, но и ее качество.

Дальнейшее развитие методов использования термодинамики для технико-экономического анализа технических систем связано с использованием понятия *«эксергия»* как обобщенной характеристики, учитывающей работоспособность разных форм энергии, чему

посвящены работы Эль-Сайеда, Д. Эванса, В.М. Бродянского, А.И. Андрущенко и других ученых [8; 9].

Возможности использования эксергии в экономике вытекают из двух предпосылок.

1. Эксергия как мера практической энергетической пригодности может служить для приближенной оценки влияния термодинамических параметров на экономические показатели определенного энергоносителя. Ее необходимо использовать, когда не хватает чисто экономических критериев оценки.

2. Эксергия представляет собой единую меру параметров, поддерживающих ход процесса, и полезных эффектов в качественно различных тепловых процессах. Благодаря этому в качественно разнородных процессах эксергия дает однозначные удобные и четкие определения.

Первая из упомянутых предпосылок приводит к новым результатам, отличающимся от полученных другими методами. Используя эту предпосылку, можно, например, установить простой эксергетический тариф оплаты за пар и горячую воду, который не приведет к абсурдным результатам, как при использовании других, чисто экономических методов.

Применяя эксергетические методы сравнительной оценки разных энергетических уровней данного энергоносителя, можно решить многие технико-экономические проблемы более точным методом. Эксергия, например, позволяет учесть, что на ТЭЦ стоимость пара из промежуточного отбора или из противодавления зависит от давления этого пара. Повышение давления содействует в действительности уменьшению рабочей поверхности теплообменника, греющей средой которого является пар, но одновременно приводит к увеличению стоимости теплоносителя. Эксергетический метод позволяет также установить экономически целесообразные параметры пара, отбираемого от турбин ТЭЦ для питания подогревателей сетевой воды.

Вторая предпосылка в принципе не приводит к нахождению новых решений технико-экономических проблем, а только облегчает их однозначное понимание.

В дальнейшем подобные исследования в основном получили развитие с использованием термина эксергия. Это и понятно, поскольку важно сопоставить не только количество потребленной и произведенной энергии, но и ее качество.

При оптимизации на базе эксергетического метода необходимо учитывать ограниченность времени существования технического объекта, изменения, которые произошли внутри границ рассматриваемой системы после создания объекта и которые произойдут после прекращения его существования. Историю существования объекта можно отразить количественно с помощью баланса эксергии, в котором учитывается вся подведенная эксергия ($E_{\text{подв}} + E_{\text{стр}}$), включая затраты эксергии на строительство объекта, а также отведенная (целевая) эксергия $E_{\text{отв}}$ и потери эксергии за весь срок службы установки τ_3 .

В общем случае подведенная эксергия определяется как:

$$E_{\text{подв}} = \int_{\tau_c}^{\tau_3} \dot{E}_{\text{подв}} d\tau, \quad (1)$$

а отведенная, соответственно:

$$E_{\text{отв}} = \int_0^{\tau_3} \dot{E}_{\text{отв}} d\tau. \quad (2)$$

Здесь $\dot{E}_{\text{отв}}$ — целевая эксергия, вырабатываемая установкой за единицу времени; $\dot{E}_{\text{подв}}$ — затраты эксергии за единицу времени; τ_c — время изготовления оборудования и строительства объекта; τ_3 — время эксплуатации установки; $\tau_3 = 0$ — момент ввода объекта в эксплуатацию.

Срок энергетической окупаемости объекта $\tau_{\text{ок}}$ — период времени, в течение которого полученная здесь эксергия компенсирует затраченную на его создание, определяется из уравнения:

$$\int_0^{\tau_{\text{ок}}} \dot{E}_{\text{отв}} d\tau = E_{\text{стр}}. \quad (3)$$

За отрезок времени, прошедший от начала энергетической окупаемости до завершения срока эксплуатации установки, последняя выдает эксергию-нетто.

Показателем эффективности функционирования объекта является эксергетический КПД:

$$\eta_e = \frac{\dot{E}_{\text{отв}}}{\dot{E}_{\text{подв}}}, \quad (4)$$

представляющий собой отношение потока преобразованной (целевой) эксергии к потоку подведенной к объекту эксергии, соответственно, в текущий момент времени или за определенный отрезок времени.

Другим показателем эффективности объекта служит коэффициент эксергии-нетто, равный отношению целевой эксергии за срок эксплуатации к затратам эксергии на его создание $E_{\text{стр}}$:

$$k_e = \frac{E_{\text{отв}}}{E_{\text{стр}}}. \quad (5)$$

Наиболее эффективным считается такой проект, в котором величина k_e максимальна.

Особую трудность при определении k_e представляет расчет затрат эксергии на создание объекта — $E_{\text{стр}}$. В большинстве случаев эти затраты связаны с получением материалов — стали, меди, алюминия, пластмасс и т. п. Поэтому, как правило, $E_{\text{стр}}$ вычисляется как произведение массы материала каждой детали и полных (кумулятивных) удельных затрат эксергии на получение этого материала по соответствующей технологической схеме (цепочке переделов), от добычи исходного сырья до изготовления изделия.

Для оценки полной энергетической эффективности объекта за весь срок его службы был введен новый показатель, объединяющий описанные выше —

сумма удельных затрат эксергии (СУЗЭКС), который может быть использован в качестве критериальной функции [13]:

$$z_e = \frac{\dot{E}_{\text{подв}} \cdot \tau_3 + E_{\text{стр}}}{\dot{E}_{\text{отв}} \cdot \tau_3} = \frac{1}{\eta_e} + \frac{1}{k_e}. \quad (6)$$

Критерий $z_e = \min$ позволяет выбрать вариант с минимальными затратами эксергии на объект за все время его эксплуатации с учетом затрат эксергии на его создание. Этот показатель вполне можно использовать вместо хорошо известного экономического критерия при выборе наиболее эффективного объекта в тех случаях, когда речь идет об энергетических объектах (генерирующих либо транспортирующих различные виды энергии), характеризующихся чрезвычайно высокой капиталом-, металло- и энергоемкостью. Замена экономических критериев выбора оптимального варианта на фундаментальные физические (термодинамические) критерии позволяет вообще не учитывать тип экономики, действующий в стране.

Смысл z_e состоит в том, что при сравнении различных вариантов энергетических объектов, приведенных к сопоставимому виду в соответствии с обычными требованиями, тот вариант, для которого z_e меньше, будет требовать меньших совокупных затрат эксергии (первичной энергии).

Можно показать существование z_e^{\min} , если известна дифференцируемая функция, связывающая k_e и η_e . Из соотношения $\frac{d z_e}{d \eta_e} = 0$ получаем:

$$z_e^{\min} = \frac{1}{k_e} \left(1 + \sqrt{-\frac{d k_e}{d \eta_e}} \right) \quad (7)$$

и $\eta_e^{\text{opt}} = \frac{k_e}{\sqrt{-\frac{d k_e}{d \eta_e}}}$.

Из выражений (7) следует, что для существования z_e^{\min} требуется, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{d k_e}{d \eta_e} < 0. \quad (8)$$

На основе общих соображений можно заключить, что выражение (8) всегда выполняется на практике. Действительно, с ростом термодинамического совершенства, т. е. с повышением η_e установки, ее размеры обычно растут. При этом затраты эксергии на создание оборудования увеличиваются, а, значит, падает k_e .

Для иллюстрации работоспособности предлагаемых методов термодинамического анализа вместо экономических нами была предпринята попытка использовать термодинамический критерий «минимум суммы удельных затрат эксергии» для поиска оптимального значения плотности тока.

Как известно, понятие экономической плотности тока было введено в нашей стране еще при плановой экономике, когда существовало понятие «нормативный коэффициент эффективности капиталовложений», не было инфляции, а цены на электроэнергию, оборудование и материалы (в том числе на металлы) были стабильными и не зависели от ситуации на рынке, спада или роста мировой экономики, а, значит, соотношения спроса и предложения. Тогда, согласно «Правилам устройства электроустановок (ПУЭ)», при проектировании схем электроснабжения выбор сечений проводов, кабелей, шин проводился по стандартной процедуре, основанной на нормированных значениях экономической плотности тока [12]. При существующих в то время соотношениях цен это обеспечивало область минимальных (оптимальных) потерь электроэнергии в сетях.

С тех пор многое изменилось, страна живет 20 лет в условиях рыночной экономики, многие из принятых тогда исходных данных, допущений и процедур устарели, но, согласно ПУЭ, до сих пор действуют полученные ранее значения экономической плотности тока.

Ниже рассмотрен пример решения задачи на минимум СУЗЭКС для определения оптимальной плотности тока в линии электропередачи трехфазного переменного тока. Задача решается в упрощенной постановке, с учетом затрат эксергии только на проводник. Величина отведенной (целевой) эксергии в данном случае есть передаваемая электрическая энергия (мощность) $P_M = \sqrt{3} U I_M \cos \varphi$, а потери эксергии определяются джоулевой теплотой, выделяемой проводником при ее передаче $\Delta P_M = 3 I_M^2 R$.

В таком случае можно записать:

$$\frac{1}{\eta_e} = \frac{\sqrt{3} U I_M \cos \varphi + 3 I_M^2 R}{\sqrt{3} U I_M \cos \varphi} = 1 + \frac{3 I_M \rho l}{\sqrt{3} U F \cos \varphi},$$

$$a \quad \frac{1}{k_e} = \frac{E_{\text{стр}}}{E_{\text{отв}}} = \frac{E_{\text{кум}} \sigma F l}{\sqrt{3} U I_M \cos \varphi \tau_3}.$$

Здесь $R = \frac{\rho l}{F}$; I_M, U — сила тока (A) и напряжение (B); l — длина проводника (m); F — сечение проводника (mm^2); ρ — электрическое сопротивление материала ($Om \cdot m$); σ — плотность материала проводника (kg/m^3); $E_{\text{кум}}$ — его массовая энергоемкость, т. е. кумулятивные затраты эксергии на получение единицы массы проводника ($MДж/kg$); τ_3 — срок эксплуатации объекта (лет).

Суммарные удельные затраты эксергии для нашего примера запишутся:

$$z_e = \frac{1}{\eta_e} + \frac{1}{k_e} = 1 + \frac{3 I_M \rho l}{\sqrt{3} U F \cos \varphi} + \frac{E_{\text{кум}} \sigma F l}{\sqrt{3} U I_M \cos \varphi \tau_3}.$$

Минимальное значение этой функции от сечения может быть найдено из выражения:

$$\frac{\partial z_e}{\partial F} = -\frac{I_M \rho}{F^2} + \frac{E_{\text{кум}} \sigma}{I_M \tau_3} = 0. \quad \text{и} \quad j_{\text{опт}} = \frac{I_M}{F_{\text{опт}}} = \sqrt{\frac{E_{\text{кум}} \sigma}{3 \rho \tau_3}}. \quad (9)$$

Решение этого уравнения позволяет найти оптимальное, в смысле этого критерия, сечение проводника, а, следовательно, и оптимальную плотность тока:

$$F_{\text{опт}} = I_M \sqrt{\frac{3 \rho \tau_3}{E_{\text{кум}} \sigma}}$$

Из выражения (9) видно, что оптимальная плотность тока зависит только от срока службы объекта, вида и электропроводности материала проводника, а также от величины кумулятивных затрат эксергии на его получение. Используя данные на получение меди и алюминия [10], а также данные о плотностях и проводимостях этих материалов, по выражению (9) нами были рассчитаны значения оптимальной плотности тока, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальная по критерию минимума СУЗЭКС плотность тока, А/мм²

Наименование проводника	Срок эксплуатации, лет				
	10	20	30	40	50
Неизолированный медный, при: $E_{\text{кум}} = 114,585$ МДж/кг;	1,41	0,99	0,81	0,70	0,63
$E_{\text{кум}} = 123,714$ МДж/кг	1,46	1,03	0,84	0,73	0,65
Неизолированный алюминиевый, при: $E_{\text{кум}} = 198,119$ МДж/кг;	0,80	0,56	0,46	0,40	0,36
$E_{\text{кум}} = 236,376$ МДж/кг	0,87	0,61	0,50	0,43	0,39

Судя по данным таблицы, значения оптимальной плотности тока, установленные по энергетическому критерию уменьшаются с увеличением срока службы объекта и возрастают с ростом затрат эксергии на его строительство и оснащение оборудованием.

Кроме этого, нетрудно заметить, что приведенные в табл. 1 величины плотности тока существенно отлича-

ются от значений экономической плотности тока, регламентируемых ПУЭ (табл. 2). Причем величины, найденные по энергетическому критерию, меньше величин нормированной плотности тока, т. е. требуют принятия больших сечений по сравнению с установленными по экономическому критерию.

Таблица 2

Оптимальная экономическая плотность тока неизолированных алюминиевого и медного проводов согласно [12], А/мм²

Материал провода	Продолжительность использования максимальной нагрузки, час		
	до 3000	до 5000	до 8760
Алюминиевый провод	1,3	1,1	1,0
Медный провод	2,5	2,1	1,8

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В условиях рыночной экономики использование ранее установленных нормированных значений экономической плотности тока (критериальная функция *приведенных финансовых затрат* на сооружение и эксплуатацию объекта) неправомерно вследствие того, что методическая основа для их определения стала непригодной.

2. Для установления нормированных значений плотности тока в современных условиях необходимо искать новую критериальную функцию, пригодную для использования в рыночной экономике.

3. В качестве такой функции предлагается использовать сумму удельных затрат эксергии на сооружение и эксплуатацию объекта за весь срок его службы, а минимум этой функции применять в качестве критерия для поиска варианта с минимальными суммарными затратами эксергии (первичной энергии).

Литература

1. Подолинский С.А. Труд и его отношение к распределению энергии // Слово. 1880. 159 с.
2. Alessio F.J. Energy analysis and energy theory of value // Energy journal. 1981. Vol. 2, № 1. P. 61–74.
3. Boustead I., Hancock G.F. Handbook of industrial energy analysis. London: Ellis Harwood, 1978. 432 p.
4. Critopf C.J. Energy analysis // Energy – present and future options. Vol. 1 Ed. Merrick. Wiley and Sons, New York. 1981. № 36. P. 313-330.
5. Ahern J.E. The exergy method of energy systems analysis. New York: Wiley, 1980. 196 p.
6. Tribus M. Thermostatics and thermodynamics. D. Van Nostrand Co. NewJerey, 1961.
7. Tribus M., Evans R. Thermoeconomic design under conditions of variable price structure // First International Symposium of Water Desalination, Washington, SWD/78, oct., 1965. Washington, 1965.

8. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.

9. Evans D.B. Energy analysis as an aid public direction making // Int. Chem. Eng. Symposium. 1987. Ser. № 78. P. 23-36.

10. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии: монография. Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-е, 1994. 257 с.

11. Szargut J. Morris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. N.Y.: Hemisphere, 1988.

12. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): утв. М-вом энергетики Рос. Федерации от 8 июля 2002 г. № 204. 6-е изд., перераб. и доп. Введ. с 01.01.03. Инф.- правовая сист. Гарант (дата обращения: 25.09.2014)

13. Янговский Е.И. Поток энергии и эксергии: монография. М.: Наука, 1988. 143 с.

4. Critopf C.J. Energy analysis // Energy – present and future options. Vol. 1 Ed. Merrick. Wiley and Sons, New York. 1981. № 36. P. 313-330.

5. Aherrn J.E. The exergy method of energy systems analysis. New York: Wiley, 1980. 196 p.

6. Tribus M. Thermostatistics and thermodynamics. D. Van Nostrand Co. NewJerey, 1961.

7. Tribus M., Evans R. Thermoeconomic design under conditions of variable price structure // First International Symposium of Water Desalination, Washington, SWD/78, oct., 1965. Washington, 1965.

8. Brodyanski V.M. Exergic method of thermodynamic analysis. M.: Energiya, 1973. 296 p.

9. Evans D.B. Energy analysis as an aid public direction making // Int. Chem. Eng. Symposium. 1987. Ser. № 78. P. 23-36.

10. Stepanov V.S., Stepanova T.B. Efficiency of the energy use: monografiya. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd.-e, 1994. 257 p.

11. Szargut J. Morris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. N.Y.: Hemisphere, 1988.

12. Regulations for Electrical Installation (PUE): utv. M-vom energetiki Ros. Federatsii ot 8 iyulya 2002 g. № 204. 6-e izd., pererab. i dop. Vved. s 01.01.03. Inf.-pravovaya sist. Garant (data obrashcheniya: 25.09.2014).

13. Yantovskii E.I. Flows of energy and exergy: monografiya. M.: Nauka, 1988. 143 p.

References

1. Podolinskii S.A. Work and its relation to energy distribution // Slovo. 1880. 159 p.

2. Alessio F.J. Energy analysis and energy theory of value // Energy journal. 1981. Vol. 2, № 1. P. 61–74.

3. Boustead I., Hancock G.F. Handbook of industrial energy analysis. London: Ellis Harwood, 1978. 432 p.

УДК 621.311

Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации

Ю.Н. Булатов^{1а}, А.В. Крюков^{2б}, Чан Зюй Хынг^{3с}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

³Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аbulatovyuura@yandex.ru, ^бand_kryukov@mail.ru, ^сtranduyhung67@yahoo.com

Статья поступила 3.9.2014, принята 22.11.2014

Новая технологическая платформа электроэнергетики России, основанная на использовании концепции интеллектуальных сетей (Smart Grid), предусматривает широкое применение установок распределенной генерации. Эти установки могут работать в составе действующих сетей или объединяться в сетевые кластеры. Статья посвящена вопросам применения установок распределенной генерации для повышения эффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог. При этом особое внимание уделено возможности улучшения качества электроэнергии у нетяговых потребителей путем применения установки распределенной генерации, управляемой согласованно настроенными автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) генератора и частоты вращения (АРЧВ) турбины. Исследования проводились в среде Matlab на созданной модели системы электроснабжения железной дороги. Для оценки влияния установки распределенной генерации на качество электроэнергии у нетяговых потребителей, скорости демпфирования колебаний напряжения и частоты при изменениях режимов работы электроэнергетической системы моделировались турбогенераторы мощностью 2,5 МВА и номинальной частотой вращения 1000 об/мин, а также 3000 об/мин. В результате проведенных исследований выявлено, что использование установок распределенной генерации с согласованно настроенными АРВ и АРЧВ позволяет повысить качество электроэнергии у нетяговых потребителей и обеспечить динамическую устойчивость и «живучесть» системы электроснабжения железнодорожной магистрали.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, качество электроэнергии, сетевые кластеры, распределенная генерация, согласованная настройка регуляторов возбуждения и частоты вращения.