

Научная статья
УДК 51.74

Е.В. Губий

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Российская Федерация*

В.И. Зоркальцев

*Байкальский государственный университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Методические подходы к анализу экономической эффективности вариантов энергоснабжения с учетом экологических и случайных факторов

Аннотация. В статье излагаются исходные методические положения для анализа экономической эффективности вариантов энергообеспечения потребителей центральной экологической зоны Байкальской природной территории озера Байкал. В качестве базового средства сравнения вариантов используется показатель приведенных затрат. Предлагаются специальные приемы для учета негативных и позитивных экологических последствий, а также действия случайных факторов в производстве и потреблении энергоресурсов. Проблему минимизации негативных и максимизации позитивных экологических последствий предложено решать путем поиска Парето оптимальных решений многокритериальной задачи. Действия случайных факторов предложено учитывать с использованием многократной имитации функционирования исследуемой технологии энергоснабжения при случайных реализациях на базе метода Монте-Карло.

Ключевые слова. Запасы топлива, метод Монте-Карло, надежность энергоснабжения, резервы мощности, случайный процесс.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU–2021–0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.003).

Информация о статье. Дата поступления: 15 ноября 2022 г.

Original article

E.V. Gubiy

*Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

V.I. Zorkaltsev

*Baikal State University,
Irkutsk, Russian Federation*

Methodological Approaches to the Analysis of the Economic Efficiency of Energy Supply Options, Taking Into Account Environmental and Random Factors

Abstract. The study presents the initial methodological provisions for the analysis of the economic efficiency of energy supply options for consumers in the central ecological zone of the natural territory of Lake Baikal. We used the indicator of reduced costs as the main means of comparing options. We proposed special methods that take into account negative and positive environmental consequences, as well as the influence of random factors in the

production and consumption of energy resources. The problem of minimizing negative and maximizing positive environmental consequences is solved by searching for Pareto optimal solutions to a multicriteria problem. The action of random factors is taken into account with the help of repeated simulation of the functioning of the studied energy supply technology in random implementations based on the Monte Carlo method.

Keywords. Fuel reserves, Monte Carlo method, power supply reliability, power reserves, random sample.

Funding. The work was carried out within the framework of the draft state task (No. FWEU–2021–0004) of the RF Basic Research Program for 2021–2025. using the resources of the Central Collective Use Center "High-Temperature Circuit" (Ministry of Education and Science of Russia, project No. 13.TsKP.21.003).

Article info. Received 15 November, 2022.

Введение

Большинство населенных пунктов, а также баз отдыха, расположенных на побережье озера Байкал, размещены в зонах с отсутствием систем централизованного теплоснабжения, а также в некоторых случаях с отсутствием централизованного электроснабжения. При выборе вариантов энергообеспечения потребителей побережье озера Байкал необходимо учитывать особые экологические требования и важную роль случайных факторов в производстве и потреблении энергоресурсов. Дорогостоящая очистка от сажи, окислов серы и других вредных выбросов при сжигании угля на маломощных котельных и, тем более, в бытовых печах невозможна. Необходимо тщательная проработка вопроса эффективности использования именно экологичных источников энергии. Это не избавляет от необходимости экономического анализа и сопоставления вариантов в целях выбора экологически и экономически приемлемых.

Потребности в тепловой и электрической энергии имеют ярко выраженные сезонные и суточные колебания, а также случайные колебания прежде всего из-за случайных флуктуаций природно-метеорологических факторов (температуры воздуха, интенсивности ветра, солнечной радиации, влажности воздуха). Регулярные сезонные, суточные колебания, случайные возмущения воздействуют также на возможности производства энергии в отдельных типах энергоустановок (прежде всего в солнечных, ветряных электростанциях).

В данной работе излагается формируемые авторами методические подходы к анализу экономической эффективности вариантов энергообеспечения, зависящих от действия случайных факторов и учитывающих негативные экологические эффекты.

Приведенные затраты как основа для сопоставления вариантов

В качестве основного показателя при сравнительном анализе экономической эффективности вариантов энергообеспечения

предлагается использовать приведенные затраты, рассчитываемые по формуле:

$$C = I \cdot E_N + CO. \quad (1)$$

Здесь I — капитальные затраты, млн руб.; CO — среднегодовые текущие затраты, млн р./год; E_N — коэффициент эффективности капиталовложений.

При сравнительном анализе важно обеспечить сопоставимость исследуемых вариантов. Одним из не бесспорных способов обеспечения сопоставимости является расчет удельных приведенных затрат, путем деления приведенных затрат на рассматриваемый вариант на объем поставок данного вида энергоресурса в рассматриваемом варианте. Это не всегда легко достичь, поскольку у каждого вида энергоресурсов есть свои особые преимущества и недостатки. Другая проблема — зависимость от объемов вовлечения в регион рассматриваемых видов энергоресурсов. При возрастании объемов удельные затраты обычно снижаются, но в разной степени. Иногда это может сопровождаться ростом затрат. Выбор наилучших вариантов энергообеспечения должен сопровождаться оптимизацией интенсивностей использования разных технологий и оптимизацией их сочетаний.

Как известно, приведенные затраты принято использовать на предварительной стадии сравнительного анализа экономической эффективности вариантов проектов. Этот показатель представляет оценку величины средних ежегодных затрат с учетом капиталовложений. Капиталовложения учитываются с весовым коэффициентом, который иногда интерпретируют как величину обратную сроку окупаемости капитальных вложений. Применительно к рыночным условиям, коэффициент эффективности капиталовложений E_N можно рассматривать как процент на кредит (в случае финансирования капиталовложений из заемных средств) или как ожидаемые дивиденды (в случае финансирования создания предприятия на акционерных принципах).

Показатели удельных приведенных затрат могут служить в качестве основы для ценообразования на рассматриваемые виды энергоресурсов. Особенно это важно для технологий, организатором и регулятором которых выступает государство (газоснабжение побережья озера Байкал, создание и функционирование энергетических плантаций на основе выращивания древесины).

Проблема учета экологических последствий, многокритериальность

При оценке эффективности того или иного варианта энергоснабжения важно учитывать не только экономические затраты на использование возможных энергоресурсов и технологий, но и негативные и, при наличии, позитивные экологические последствия этих вариантов.

При оценке альтернатив по каждому из критериев возникает проблема многокритериальности. Эта проблема заключается, например, в том, что некоторые варианты энергоснабжения могут оказаться лучшими с точки зрения экономики, а некоторые — с точки зрения экологии. Встает задача выбора в таких противоречивых условиях.

Многокритериальная оптимизация с противоречащими друг другу целями, такими как экономическая выгода и экологическое благополучие, основывается на поиске Парето оптимальных решений, т.е. таких решений, при которых ни один показатель системы не может быть улучшен без ухудшения какого-либо другого показателя.

Пусть рассматривается многокритериальная задача:

$$f_i(x) \rightarrow \min, i = 1, \dots, n, x \in X, \quad (2)$$

где X — множество допустимых вариантов, f_i — минимизируемые целевые функции с номерами $i = 1, \dots, n$, x — выбираемое решение.

Согласно приведенному выше определению, решение $x \in X$ называется оптимальным по Парето для многокритериальной задачи (2), если не существует другого решения $y \in X$ такого, что

$$f_i(y) \leq f_i(x), x = 1, \dots, m, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m f_i(y) < \sum_{i=1}^m f_i(x). \quad (4)$$

Одним из способов поиска оптимальных по Парето решений является сведение проблемы к однокритериальной постановке путем использования линейной свертки критериев. Введем вектор оптимального решения однокритериальной задачи для заданного набора весовых коэффициентов $\lambda_i > 0, i = 1, \dots, m$. Для любого набора весовых коэффициентов $\lambda_i > 0, i = 1, \dots, m$ определим решение однокритериальной задачи

$$x(\lambda) = \arg \min_{x \in X} \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x). \quad (5)$$

Для решения задачи (4) справедливы следующие два утверждения.

При любом векторе λ положительных весовых коэффициентов решение $x(\lambda)$ будет Парето оптимальным решением задачи (2). Данное утверждение можно доказывать методом от противного. Если решение $x = x(\lambda)$ не Парето оптимальное, то при некотором y будут выполняться неравенства (3), (4). Из них следует что вектор y будет иметь меньшее значение целевой функции в задаче (5), чем вектор x , что противоречит оптимальности этого вектора.

Приведенное утверждение дает конструктивный путь вычисления Парето оптимальных решений — путем линейной свертки исходных критериев. Возникает вопрос о содержательном смысле весовых коэффициентов. Для ответа на этот вопрос полезно второе утверждение.

При умножении всех компонент вектора λ на любое положительное число ρ решение $x(\rho\lambda)$ совпадет с решением $x(\lambda)$. Данное утверждение также доказывается методом от противного.

Пусть среди целевых функций задачи (2) первая функция соответствует текущим экономическим затратам. Осуществим свертку целевых функций таким образом, чтобы $\lambda_1 = 1$. Тогда значения λ_i , для $i = 2, \dots, n$ можно представлять как штрафные коэффициенты, платы выраженные в денежных единицах за единицу негативных объемов антиблаг (вредных выбросов). При этом данные штрафные коэффициенты могут и использоваться в качестве нормативных значений плат за выбросы экологически вредных веществ. Конечно, строго определить в рублях удельные ущербы от таких негативных последствий может быть и невозможно. Конкретные численные значения этих коэффициентов рационально будет выбирать исходя из их стимулирующей роли для использования альтернативных технически достижимых природосберегающих технологий. Этот аспект требует специальной проработки.

Согласно рассматриваемым правилам учета экологических последствий среднегодовые текущие затраты CO должны определяться по формуле

$$CO = S + \sum_{i=1}^m \lambda_i P_i, \quad (6)$$

где S — среднегодовые текущие затраты на энергоснабжение, млн р./год; λ_i — весовые коэффициент, интерпретируемые как удельные ущербы; P_i — годовые объемы выбросов вредных веществ $i = 1, \dots, m$. Здесь m — общее число видов воздействий на окружающую среду.

Проблема учета регулярных и случайных колебаний в производстве и потреблении энергоресурсов

В процессах производства некоторых видов энергоресурсов важно учитывать имеющиеся регулярные сезонные и суточные колебания, а также случайные возмущения. В частности, это особенно важно для анализа и оптимизации работы ветроэнергетических и солнечных электростанций. В процессе их использования могут возникать как избытки, так и нехватка мощности. Требуется применение специальных средств аккумуляции электроэнергии

в период избытка производства для использования этой энергии в периоды нехватки мощностей. Требуется также содержание специальных средств обеспечения надежности электроснабжения, в качестве которых для обсуждаемого пункта, изолированного электрообеспечения могут выступать дизельные электростанции.

При этом важно также учитывать регулярные сезонные, суточные колебания потребностей в электроэнергии, а также разного рода по интенсивности и продолжительности случайные возмущения. Для этого также требуются специальные методы выделения, изучения и описания регулярных и случайных колебаний природно-метеорологических показателей.

Регулярные и случайные возмущения в производстве и потреблении энергоресурсов делают необходимым специальные исследования и описания способов их регулирования. На базе таких описаний может формироваться имитационная модель функционирования рассматриваемой технологии обеспечения электрической и тепловой энергией, топливом населения и предприятий на побережье озера Байкал.

Путем многократной имитации функционирования рассматриваемой технологии в условиях действия регулярных и случайных (учитываемых на базе метода статистических испытаний, называемого также методом Монте-Карло) можно оценивать математическое ожидание затрат по всему ансамблю возможных ситуаций [1]. И это математическое ожидание затрат предлагается использовать в формуле приведенных затрат (1). На базе таких оценок, путем изменений параметров модели (располагаемых средств накопления электроэнергии, средств резервирования в виде дизельных электростанций) можно определять оптимальное сочетание отдельных составляющих исследуемой технологии. Такой способ определения и оптимизации затрат в условиях действия регулярных и сезонных колебаний апробируется в настоящее время авторами применительно к электроснабжению электроэнергией изолированных населенных пунктов на побережье озера Байкал [2].

Такой же способ оценки и оптимизации затрат развивается применительно к исследованию эффективности теплоснабжения на базе тепловых насосов с использованием энергии воды Байкала [3]. В наиболее полном виде эта методика была апробирована на модели создания и использования энергетических плантаций для топливоснабжения побережья озера Байкал, что представлено в ряде публикаций авторов данной статьи [4].

В имитационной модели функционирования системы топливоснабжения населенных пунктов на базе энергетических плантаций случайные отклонения потребностей в топливе за весь отопительный период, вероятности этих отклонений оценивались на основе ретроспективных данных о температурах на-

ружного воздуха за прошлые отопительные периоды¹. По этим данным определялись расчетные даты начала и окончания отопительных периодов, средние за отопительные периоды разности температур внутри и вне зданий.

Пусть $\tau = 1, \dots, T$ — номера отопительных периодов, по которым имеются данные о среднесуточных температурах. Продолжительность отопительного периода τ — N_j^τ . Колебания расхода топлива на теплоснабжение характеризуется отклонением потребности в топливе на отопление одного из отопительных периодов от среднеожидаемого уровня [5]

$$b_\tau = B_\tau / \bar{B}, \tau = 1, \dots, T, \quad (7)$$

где B_τ — показатель интегральной разности температур за отопительный период τ , который рассчитывается по формуле

$$B_\tau = \sum_{\chi=1}^{N_\tau} (\hat{t} - t_{\chi\tau}), \tau = 1, \dots, T, \quad (8)$$

где \bar{B} — средняя за все отопительные периоды интегральная разность температур внутри и вне здания:

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T B_\tau. \quad (9)$$

Здесь \hat{t} — нормативное значение температуры внутри здания; $t_{\chi\tau}$ — средняя температура наружного воздуха в день χ отопительного периода τ .

В данной модели было необходимо также учитывать переходящие запасы топлива из одного периода в другой. Если в какой-то (из имитируемых) периодов потребление энергии оказывается ниже среднего значения и (или) объем произведенной энергии оказывается выше среднеожидаемого значения, то производство энергии в данном периоде может превысить потребность. Тогда разница между объемами производства и потребления переходит в качестве запаса в следующий период [2].

R_v, Q_v — реализации случайных величин производства и потребления топлива. Разницу этих величин обозначим

$$L_v = R_v - Q_v. \quad (10)$$

Расчет объема переходящих запасов топлива на начало следующей итерации можно представить в виде следующего правила:

¹ Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ): база данных, свидетельство о государственной регистрации № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori>.

$$s_{v+1} = \min\{(L_v + s_v)_+; z\}. \quad (11)$$

Здесь z — заданный объем складов под переходящие запасы. Используется функция отрицательной «срезки» от вещественной переменной x

$$x_+ = \max\{0, x\}. \quad (12)$$

Для локальных систем электроснабжения в качестве накопителей энергии могут служить аккумуляторы электроэнергии, либо запасы воды в гидроаккумулирующих электростанциях. При возникновении обратных ситуаций, когда потребление превышает производство, используются имеющиеся запасы. Возможна ситуация, когда эти запасы исчерпаны, тогда возникает ситуация дефицита энергоресурсов, который может покрываться из более дорогих источников поставляемой энергии. Для локальных систем электроснабжения в качестве таких дополнительных источников могут служить дизельные электростанции. Для систем снабжения котельно-печным топливом в качестве дополнительного источника можно рассматривать привлечение дальнепривозного дорогого топлива. В качестве средств обеспечения надежности энергоснабжения рассматриваются создание резервов мощности в производстве энергии из анализируемого источника и создание накопителей энергии для хранения переходящих запасов.

Заключение

Предложен методический подход к анализу экономической эффективности вариантов энергообеспечения побережья озера Байкал, учитывающий необходимость введения экологических и экономических критериев выбора вариантов, а также действия случайных факторов. В качестве базового показателя предлагается использовать приведенные затраты на функционирование рассматриваемой технологии энергообеспечения. При этом задачу минимизации экологических негативных последствий предложено решать путем поиска Парето оптимальных решений на основе линейной свертки критериев минимизации экономических затрат и вредных воздействий на природную среду. Действие случайных факторов предложено учитывать на основе многократной имитации функционирования исследуемой технологии энергоснабжения при случайных реализациях на базе метода Монте-Карло.

Список использованной литературы

1. Гихман И.И. Теория случайных процессов / И.И. Гихман, А.В. Скороход. — Москва : Наука, 1971. — Т. 1. — 666 с.

2. Губий Е.В. Марковская последовательность переходящих запасов топлива / Е.В. Губий, В.И. Зоркальцев. — DOI 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196. — EDN RYYGBU // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2019. — № 1 (70). — С. 181–196.

3. Еделев А.В. Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал / А.В. Еделев, В.И. Зоркальцев, А.Ю. Маринченко. — EDN DUHOVE // System Analysis and Mathematical Modeling. — 2020. — Т. 2, № 2. — С. 5–17.

4. Губий Е.В. Эффективность энергетических плантаций / Е.В. Губий, В.И. Зоркальцев. — Новосибирск : Наука, 2018. — 96 с.

5. Зоркальцев В.И. Многолетние колебания температур и проблемы надежности топливоснабжения / В.И. Зоркальцев. — Иркутск : ИСЭМ СО РАН. — 2015. — 84 с.

References

1. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. *Theory of random processes*. Moscow, Nauka Publ., 1971. Vol. 1. 666 p.

2. Gubii E.V., Zorkal'tsev V.I. Markov Sequence of Carryover Fuel Resources. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University, 2019, no. 1, pp. 51–66. (In Russian). EDN: RYYGBU. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196.

3. Edelev A.V., Zorkal'tsev V.I., Marinchenko A.Yu. Simulation of Heat Pump Supply to Buildings on the Shores of Lake. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 5–17. (In Russian). EDN: DUHOVE.

4. Gubii E.V., Zorkal'tsev V.I. *Efficiency of energy plantations*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2018, 96 p.

5. Zorkal'tsev V. I. *Long-term temperature fluctuations and problems of fuel supply reliability*. Irkutsk, ISEM SO RAN Publ., 2015. 84 p.

Информация об авторах

Губий Елена Валерьевна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: egubiy@gmail.com.

Зоркальцев Валерий Иванович — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией математического моделирования, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: vizork@mail.ru.

Information about the Authors

Elena V. Gubiy — PhD in Technical Sciences, Researcher, Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: egubiy@gmail.com.

Valeriy I. Zorkal'tsev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Lab of Mathematical Modeling, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: vizork@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Губий Е.В. Методические подходы к анализу экономической эффективности вариантов энергоснабжения с учетом экологических и случайных факторов / Е.В. Губий, В.И. Зоркальцев. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(3).208-217 // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2022. — Т. 4, № 3. — С. 208–217.

For Citation

Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I. Methodological Approaches to the Analysis of the Economic Efficiency of Energy Supply Options, Taking Into Account Environmental and Random Factors. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 208–217. (In Russian). DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(3).208-217.