метод определения неустановившегося температурного поля в неоднородном теле может быть также применен для изучения нелинейных процессов нагрева изделий [9; 10].

*Литература*

1. Видин Ю.В. Инженерные методы расчета процессов теплопереноса. Красноярск. Изд-во Крас. политехн. ин-та, 1974. 144 с.

2. Иванов В.В., Видин Ю.В., Колесник В.А. Процессы прогрева многослойных тел лучисто-конвективным теплом. Ростов-н/Д., Изд-во Рост. Ун-та, 1990. 159 с.

3. Видин Ю.В., Иванов В.В., Казаков Р.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена. Красноярск, СФУ, 2014. 167 с.

4. Федяев А.А., Федяева В.Н., Видин Ю.В. Численные исследования неравномерного тепломассообмена при испарении в капиллярно-пористых телах // Вестн. Ассоциации выпускников КГТУ. Красноярск, 2007. Вып. 15. 182 с.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

6. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. М., 1949. Т. 2. 219 с.

7. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М.: Наука, 1979. 890 с.

8. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1977. 342 с.

9. Видин Ю.В. Расчет температурного режима неоднородной пластины, нагреваемой излучением // Изв. вузов. Черная металлургия. 1981. № 11. 136 с.

10. Видин Ю.В. Начальная стадия теплопроводности тел с переменными свойствами // Физика и химия обработки материалов. 1983. № 1. 37 с.

11. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.

*References*

1. Vidin YU.V. Engineering methods of calculation of heat transfer processes. Krasnoyarsk. Izd-vo Kras. politekhn. in-ta, 1974. 144 p.

2. Ivanov V.V., Vidin YU.V., Kolesnik V.A. Processes of heating of multilayer bodies by radiant-convective heat. Rostov-n/D., Izd-vo Rost. Un-ta, 1990. 159 p.

3. Vidin YU.V., Ivanov V.V., Kazakov R.V. Engineering methods for calculating heat-exchange problems. Krasnoyarsk, SFU, 2014. 167 p.

4. Fedyaev A.A., Fedyaeva V.N., Vidin YU.V. Numerical studies of uneven heat and mass transfer during evaporation in capillary-porous bodies // Vestn. Associacii vypusknikov KGTU. Krasnoyarsk, 2007. Vyp. 15. 182 p.

5. Lykov A.V. Heat conduction theory. M.: Vysshaya shkola, 1967. 600 p.

6. Vatson G.N. Theory of Bessel functions. M., 1949. T. 2. 219 p.

7. Handbook of special functions / pod red. M. Abramovica, I. Stigana. M.: Nauka, 1979. 890 p.

8. Yanke E., Ehmde F., Lyosh F. Special function. M.: Nauka, 1977. 342 p.

9. Vidin YU.V. Calculation of temperature regime of inhomogeneous plate heated by radiation // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 1981. № 11. 136 p.

10. Vidin YU.V. The initial stage of thermal conductivity of bodies with variable properties // Physics and Chemistry of Materials Treatment. 1983. № 1. 37 p.

11. Lykov A.V. Heat and mass transfer: spravochnik. M.: Ehnergiya, 1978. 480 p.

12. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for researchers and engineers. M.: Nauka, 1968. 720 p.

УДК 620.92:519.816 DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-60-67

# Многокритериальный выбор технологий производства электрической энергии при развитии локальной системы электроснабжения

А.С. Нефедов[a], В.А. Шакиров[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]domino1991@rambler.ru, [b]mynovember@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-5507-2798, [b]https://orcid.org/0000-0001-8629-9549
Статья поступила 9.01.2019, принята 3.02.2019

*В статье формулируется проблема многокритериального выбора наиболее перспективных технологий производства электроэнергии при развитии локальной системы электроснабжения удаленного района. Предложена методика многокритериальной оценки перспективных технологий производства электроэнергии. Рассмотрены основные подходы для оценки потенциала гидравлической, солнечной и ветровой энергии в районе для выявления целесообразности использования соответствующих технологий производства электроэнергии. Приводятся основные модели оценки альтернатив по критериям. Рассматриваются особенности оценки экологических и социальных воздействий, расчета чистого дисконтированного дохода при использовании различных технологий производства электроэнергии в районе. В качестве метода многокритериальной оценки альтернатив предложено использовать модернизированный метод анализа иерархий, который позволяет снизить число запросов к лицу, принимающему решение, при проведении парных сравнений альтернатив по критериям. В основе модификации метода лежит построение модели предпочтений лица, принимающего решения, в отношении сравнительной важности оценок альтернатив по критерию на основе нескольких запросов. Рассмотрен пример применения методики для выбора перспективных технологий производства электроэнергии в локальной системе электроснабжения удаленного района Камчатского края. В качестве технологий производства электроэнергии рассматриваются тепловая, гидравлическая, дизельная, ветряная и солнечная электростанции. Проводится формирование целей и критериев. Для сравнения альтернатив выбраны следующие критерии: чистый дисконтированный доход при использовании технологии; воздействие технологии на окружающую среду; оценка общественного мнения о типе станции; оценка технической эффективности. Для более детального учета особенностей технологий производства электроэнергии отдельные критерии разбиты на субкритерии. С помощью объективных и субъективных моделей осуществляется оценка альтернатив по критериям, проводится многокритериальная оценка альтернатив.*

**Ключевые слова:** технология производства электроэнергии; многокритериальный выбор; критерии; метод анализа иерархий.

# Multi-criteria selection of technologies for the production of electrical energy in the development of a local power supply system

A.S. Nefedov[a], V.A. Shakirov[b]

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]domino1991@rambler.ru, [b]mynovember@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0001-5507-2798, [b]https://orcid.org/0000-0001-8629-9549
Received 9.01.2019, accepted 3.02.2019

*The article formulates the problem of multi-criteria selection of the most promising technologies for the production of electricity in the development of a local power supply system in a remote area. A technique for multi-criteria evaluation of promising technologies for the production of electricity has been proposed. The main approaches for assessing the potential of hydraulic, solar and wind energy in the area to identify the feasibility of using appropriate technologies for the production of electricity are considered. The main models for evaluating alternatives by criteria are given. The features of the assessment of environmental and social impacts, the calculation of net present value using various technologies for the production of electricity in the area are considered. As a method of multi-criteria evaluation of alternatives, it is proposed to use a modernized method of analytic hierarchy process which allows reducing the number of requests to the decision maker when conducting pairwise comparisons of alternatives by criteria. The modification of the method is based on building a model of decision makers' preferences regarding the comparative importance of evaluating alternatives by a criterion based on several requests. An example of the application of the technique for selecting promising technologies for the production of electricity in the local power supply system of a remote region of the Kamchatka Krai is considered. Thermal, hydraulic, diesel, wind and solar power plants are considered as power generation technologies. For comparison of alternatives, the following criteria were selected: net present value using technology; impact of technology on the environment; public opinion assessment of the type of station; technical performance evaluation. For a more detailed account of the features of electricity production technologies, individual criteria* *are divided into subcriteria. With the help of objective and subjective models, the evaluation of alternatives and multi-criteria evaluation of alternatives are carried out.*

**Keywords:** technology for the production of electricity; multi-criteria choice; criteria; analytic hierarchy process.

**Введение**

В настоящее время актуальной проблемой является комплексное развитие региональной энергетики, в том числе формирование системы энергетического обеспечения удаленных территорий на основе использования местных топливно-энергетических и возобновляемых ресурсов.

При развитии районов нового освоения рациональным является создание локальных систем электроснабжения (ЛСЭС). В зависимости от имеющихся энергетических ресурсов и уровня развития транспортной инфраструктуры региона может возникнуть необходимость сравнения большого количества технологий производства электроэнергии для выбора наиболее перспективных из них для формирования вариантов ЛСЭС. При этом, помимо оценки технико-экономических показателей различных технологий, необходимо также учитывать их экологические и социальные воздействия[1]. В результате при выборе наиболее перспективных технологий производства электроэнергии для энергоснабжения района перед лицом, принимающим решение (ЛПР), возникает многокритериальная задача, в решении которой могут помочь методы теории принятия решений.

В настоящее время разработано значительное количество методов многокритериального анализа, которые основываются на различных подходах к формализации модели рационального выбора [2–4]. Одним из наиболее распространенных является метод анализа иерархий AHP (*analytic hierarchy process*). Метод AHP в настоящее время вырос в обширный междисциплинарный раздел теории принятия решений, имеющий убедительные математические и психофизические обоснования и многочисленные приложения. На основе AHP разработана широко известная программная система Expert Choice [5]. Более 40 лет AHP используется для поиска решений в самых различных профессиональных областях [6–9].

В данной статье предлагается методика оценки и выбора перспективных технологий производства электроэнергии на основе модифицированного метода анализа иерархий.

**Методика многокритериального выбора технологий производства электроэнергии ЛСЭС.** Задача многокритериального выбора формулируется следующим образом. Пусть рассматривается множество альтернатив $A=\{a_1, a_2, \ldots, a_k\}$, которыми являются варианты технологий производства энергии. Для их оценки формируется множество критериев $F=\{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$. Для каждой альтернативы $a_i$, $i=1..k$ проводится оценивание по критериям $f_j$, $j=1..n$ и формируются множества оценок $V_{ij}$. Далее происходит упорядочение по предпочтению альтернатив множества $A$ и выбор ограниченного числа наиболее перспективных альтернатив с учетом оценок $V_{ij}$ по критериям множества $F$. Основные шаги предварительного многокритериального выбора представлены на рис. 1.


**Рис. 1.** Методика выбора перспективных технологий производства электроэнергии

Рассмотрим основные этапы методики выбора перспективных технологий производства электроэнергии.

На этапе 1формируются исходных данных о районе перспективного развития: определяются потенциальные потребители энергии, их электрическая нагрузка, возможные виды энергетических ресурсов для электроснабжения потребителей.

Для определения перспективных нагрузок потребителей могут использоваться региональные энергетические программы и стратегии, схемы территориального планирования. При отсутствии информации проводится оценка нагрузок потребителей комплексным или эмпирическими методами на основе объектов-аналогов [10; 11].

Анализ потенциала энергоресурсов проводится на основе карт полезных ископаемых и перспективных геологических участков и площадей, климатических справочников, материалов водного кадастра и др. [12].

На этапе 2 формируются альтернативные варианты технологий производства электроэнергии. В качестве альтернатив могут выступать тепловые (ТЭС), гидравлические (ГЭС), ветряные (ВЭС), солнечные (СЭС) электростанции и др. Рассмотрим подходы к оценке потенциала соответствующих технологий производства электроэнергии в районе.

Целесообразность строительства ТЭС оценивается наличием месторождений топливных полезных ископаемых. Оценка запасов топлива, необходимого для обеспечения производства требуемого количества электроэнергии на рассматриваемый период эксплуатации производится по формуле:

$$B = \frac{3{,}6 N_э T_{\max}}{Q_н^р \eta_{ст}}, \quad (1)$$

где $N_э$—электрическая мощность станции, *МВт*; $T_{\max}$—число часов работы с максимальной мощностью; $Q_н^р$—низшая теплота сгорания топлива, *кДж/кг*; $\eta_{ст}$—коэффициент полезного действия станции, *о.е.*

Целесообразность включения в анализ ГЭС оценивается на основании проведения водноэнергетических расчетов, которые включают:

–определение площади зеркал и объемов водохранилища при различных отметках нормального подпорного уровня (НПУ);

–определение уровня «мертвого» объема водохранилища при различных отметках НПУ;

–определение среднемесячной гарантированной мощности ГЭС при максимальном рассматриваемом НПУ на основе зарегулированного значения расхода на турбины в каждый месяц *i*.

Гарантированная мощность ГЭС в данном случае определяется как:

$$P_{\text{ГЭС.г.}} = 9{,}81 \cdot Q_i H_i \eta_{\text{т}} \eta_{\text{г}}, \qquad (2)$$

где $Q_i$—гарантированный среднемесячный расход воды на турбины, *м*$^3$*/ч*; $H_i$—напор воды в месяц *i*, *м*; $\eta_{\text{т}}$—КПД турбины, *о.е.*; $\eta_{\text{г}}$—КПД генераторов, *о.е*.

Оценка годовой выработки ВЭУ может проводиться по справочным данным о многолетних измерениях на метеостанциях [13]. Выработка ВЭУ, приведенная к 1 кВт установленной мощности, определяется как:

$$Э_{\text{ВЭУ}} = \frac{K_{\text{отк}} \sum_{i=1}^{n} P(v'_i)\, t_i(\Delta v_i)}{P_{\text{ном}}}, \qquad (3)$$

где $K_{\text{отк}}$—общий класс открытости станции; *n*—число градаций повторяемости скоростей ветра;$P(v'_i)$ — мощность ВЭУ при скорости ветра *i*-ой градации $v'_i$, приведенной к высоте ротора, *кВт*; $t_i(\Delta v_i)$ — повторяемость скоростей ветра в диапазоне $\Delta v_i$, *ч*; $P_{\text{ном}}$— номинальная мощность ВЭУ, *кВт*.

Оценка годовой выработки солнечной энергетической установкой, наклоненной под углом, равным широте местности, может проводиться с использованием справочных данных о многолетних измерениях на метеостанциях [12; 13]:

$$Q_{\text{накл}} = S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}, \qquad (4)$$

где $Q_{\text{накл}}$,$S_{\text{накл}}$,$D_{\text{накл}}$,$R_{\text{накл}}$—соответственно суммарное, прямое, рассеянное и отраженное солнечное излучение, поступающее на наклонную поверхность, *Вт/м*$^2$:

$$S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cos\theta, \qquad (5)$$

где $S_{\text{орт}}$—прямое солнечное излучение на ортогональную лучам плоскость, *Вт/м*$^2$; θ—угол падения прямого солнечного излучения на поверхность, *рад*.

Для оценки рассеянной солнечной радиации можно применить одну из известных анизотропных моделей, например модель Клачера [14]:

$$D_{\text{накл}} = D_{\text{гор}} \cos^2\frac{\beta}{2}\left(1 + F\sin^3\frac{\beta}{2}\right)\left(1 + F\cos^2\theta \cdot \sin^3\theta_z\right), \qquad (6)$$

где $D_{\text{гор}}$ —рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, *Вт/м*$^2$; β —угол наклона приемной площадки, *рад*;*F*—модулирующая функция, учитывая покрытие неба облаками; $\theta_z$—зенитный угол Солнца, *рад*.

Для расчета отраженной радиации в большинстве исследований используют изотропную модель [14; 15]:

$$R_{\text{накл}} = \frac{Q_{\text{гор}} A_k (1 - \cos\beta о}{2}. \qquad (7)$$

Влияние общей облачности на суммарную радиацию можно оценить по формуле Т.Г. Берлянд [16]:

$$Q_{\text{накл.обл.}} = Q_{\text{накл}}(1 - (e + rp)p), \qquad (8)$$

где *e*—коэффициент, зависящий от среды и от широты местности;*r*—коэффициент, который можно считать постоянным и равным 0,38;*p*—общая облачность в долях единицы.

Исходя из оценок $Q_{\text{накл.обл}j}$, за каждый *j*-й месяц года может быть оценено годовое производство электроэнергии солнечной установкой с площадью панели 1 м$^2$с учетом температурного режима:

$$Э_{\text{СЭУ}} = \sum_{j=1}^{12} Q_{\text{накл.обл}\,j} \cdot \eta \cdot (1 - k_t(T_j - 25)), \qquad (9)$$

где η—КПД фотоэлектрических преобразователей, *о.е.*; $k_t$—градиент изменения КПД солнечного модуля от температуры, *о.е.*; $T_j$—средняя дневная температура за месяц *j*, *градусов*.

На этапе 3 формируется иерархия целей и критериев. При формировании целей необходимо учитывать экономические, социальные, биологические факторы, факторы общественного мнения [1].

На этапе 4 проводится сравнение технологий производства электроэнергии с установленной мощностью 1 кВт. При этом могут использоваться как объективные модели оценки, основанные на объективных законах и закономерностях, так и субъективные модели, основанные на методах экспертных оценок [17].

Рассмотрим детальнее некоторые подходы к оценке различных экономических, экологических и социальных критериев.

Экономическая оценка технологий может проводиться на основании чистого дисконтированного дохода, получаемого при использовании технологии производства энергии, *р./кВт*:

$$NPV = \sum_{i=0}^{z} \frac{CI_i - CO_i}{(1 + d)^i} - IC, \qquad (10)$$

где $CI_i$—входящий денежный поток, характеризующий поступление денежных средств от использования технологии производства энергии в год *i*, *р.*; $CO_i$—исходящий денежный поток, характеризующий затраты денежных средств при использовании технологии производства энергии в год *i*, *р.*; *d*—ставка дисконтирования, используемая для пересчета будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости;*IC*—капитальные вложения, *р*.

Поступления денежных средств *CI* связаны с реализацией электроэнергии потребителям:

$$CI_i = W_i \cdot c_{ei}(1 + \varepsilon_e)^i, \qquad (11)$$

где $W_i$—электроэнергия, реализованная в *i*-й год, *кВт·ч*; $c_{ei}$—средний тариф на электроэнергию в год *i*, *р./кВт·ч*; $\varepsilon_e$—коэффициент, отражающий ежегодное увеличение тарифа на электроэнергию.

Ежегодные затраты денежных средств связаны с приобретением и доставкой топлива, эксплуатационными расходами:

$$CO_k = (a_{dd} + a_r) \cdot IC \cdot (1+\varepsilon_{oc})^i + B \cdot k_e \cdot c_c \cdot (1+\varepsilon_c)^i, \quad (12)$$

где $a_{dd}$—доля амортизационных отчислений; $a_r$—доля ежегодных отчисления на ремонт; $IC$—капитальные вложения, *р.*; $\varepsilon_{oc}$—коэффициент увеличения издержек в $i$-й год; $B$—годовой расход условного топлива на производство электрической энергии, *т.у.т.*; $k_e$—калорийный эквивалент натурального топлива, *о.е.*; $c_c$—стоимость топлива, *р./т*;$\varepsilon_c$—коэффициент увеличения стоимости топлива с учетом доставки в $i$-й год.

В качестве субъективных моделей могут выступать экспертные оценки показателей экологического и социального воздействия различных способов генерации энергии с учетом всего периода жизненного цикла электростанции [18–20] (табл. 1).

*Таблица 1*

*Оценка экологических и социальных воздействий различных способов производства энергии*

| Показатель | Баллы | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Уголь | Газ, нефть | ГЭС | СЭС | ВЭС | АЭС |
| Социальные воздействия | | | | | | |
| Рабочие места, *чел.-лет/ГВт·ч* | 0,11 | 0,11 | 0,27 | 0,87 | 0,17 | 0,14 |
| Потерянные годы жизни, *чел.-лет/ГВт·ч·*$10^{-3}$ | 150 | 44 | 3 | 14 | 3 | 7 |
| Экологические воздействия | | | | | | |
| Количество выделяющихся парниковых газов, *балл* | 10 | 7,2 | 0,1 | 0,7 | 0,3 | 0,1 |
| Выброс вредных веществ в атмосферу, *балл* | 10 | 4,3 | 0,1 | 5 | 0,1 | 0,1 |
| Сброс вредных веществ в водные источники, *балл* | 5 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Образование отходов, *балл* | 10 | 1,7 | 0,1 | 3 | 3 | 0,1 |
| Отчуждение земельных ресурсов, *балл* | 0,1 | 0,1 | 10 | 3,3 | 5 | 0,1 |
| Выделение радиоактивных веществ в окружающую среду, *балл* | 10 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 5 |
| Риск для людей, *балл* | 10 | 0,3 | 0,9 | 2,9 | 0,2 | 0,5 |

Площадь изымаемых земель оценивается:

$$S = S_0 \cdot N, \quad (13)$$

где $S_0$—удельная землеемкость электростанции, *м²/кВт*; $N$—установленная мощность станции, *кВт*.

Удельная землеемкость электростанций приводится во многих исследованиях, например для СЭС: $S_0$=10÷60 м²/кВт, для ВЭС:$S_0$=50÷100 м²/кВт [21]. Площадь золоотвала ТЭС находится в пределах 700 м²/т.у.т. расходуемого топлива. Площадь водохранилища ГЭС определяется при водноэнергетических расчетах.

После оценки альтернатив по критериям на этапе 5 используется модернизированный метод AHPдля многокритериального сравнения перспективных технологий производства электроэнергии.

**Основные этапы модернизированного АНР.** АНР состоит из следующих основных этапов [22]: иерархическая структуризация рассматриваемой задачи; реализация парных сравнений элементов иерархии; определение для каждой матрицы сравнений коэффициентов важности сравниваемых элементов; определение итоговых приоритетов альтернатив.

При большом числе критериев существенно возрастает нагрузка на ЛПР при парных сравнениях альтернатив. Поэтому предлагается модификация этапа парных сравнений альтернатив, которая заключается в построении модели предпочтений ЛПР в отношении пар оценок по критерию. Модель предпочтений формируется на основании задания ЛПР следующего вопроса относительно оценок альтернатив по критерию:

—Оценки альтернатив по критерию изменяются от $x_a$ до $x_b$. При этом оценка $x_b$ превосходит оценку $x_a$ с оценкой 9 по шкале (табл. 2). Пусть имеется альтернатива с оценкой $x_a$. Альтернатива с какой оценкой $x'_a$ могла бы характеризоваться оценкой 3 по шкале (табл. 2) «умеренное превосходство» по отношению к $x_a$?

Ответ ЛПР определяет $\Delta x = x'_a - x_a$.

*Таблица 2*

*Фундаментальная шкала для оценки силы суждений*

| Степень важности | Оценка сравнительной важности элемента иерархии |
|---|---|
| Равная важность | 1 |
| Умеренное превосходство | 3 |
| Существенное превосходство | 5 |
| Большое превосходство | 7 |
| Абсолютное превосходство | 9 |

Исходя из ответа ЛПР формируется модель предпочтений, на основе которой представляется возможным определять показатели сравнительной важности альтернатив, после чего формируется матрица парных сравнений альтернатив с оценками, определяемыми по формуле [22]:

$$c_{ij}=s(x_i)/s(x_j) \quad , \quad (14)$$

где $s(x_i)$, $s(x_j)$ —соответственно показатель сравнительной важности оценки $x_i$и$x_j$в отношении $x_a$.

Матрица парных сравнений выглядит следующим образом (табл. 3).

Матрица парных сравнений критериев формируется по оригинальной методике АНР.

Далее определяются элементы собственного вектора матриц парных сравнений [22]:

$$\lambda_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^{k} c_{ij}}\,, \qquad (15)$$

где $k$—количество альтернатив; $c_{ij}$—оценка сравнительной важности пары альтернатив $i$ и $j$.

*Таблица 3*

*Матрица парных сравнений для альтернатив по критерию*

| | $a_1$ | … | $a_i$ | … | $a_k$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | 1 | … | $c_{1j}$ | … | $c_{1k}$ |
| … | … | … | … | … | … |
| $a_i$ | $c_{i1}$ | … | $c_{ij}$ | … | $c_{ik}$ |
| … | … | … | … | … | … |
| $a_k$ | $1/c_{1k}$ | … | $c_{kj}$ | … | 1 |

Следующим этапом является определение для каждой матрицы локальных приоритетов альтернатив [22]:

$$v_i = \lambda_i \Big/ \sum_{j=1}^{k} \lambda_j\ . \qquad (16)$$

Аналогично оцениваются элементы собственного вектора матрицы критериев по формуле (15), определяются веса критериев $w_i$ по формуле (16).

На последнем этапе производится синтез локальных приоритетов и определяются итоговые глобальные приоритеты каждой альтернативы [22]:

$$V_j = \sum_{i=1}^{n} w_i v_{ij}\,, \qquad (17)$$

где $V_j$—глобальный приоритет $j$-й альтернативы; $w_i$—вес $i$-го критерия; $v_{ij}$—вес $j$-й альтернативы по $i$-му критерию.

Альтернатива с максимальным глобальным приоритетом считается лучшим решением.

**Применение методики выбора перспективных технологий в удаленном районе.** Применение представленной методики предлагается рассмотреть на одном из перспективных районов Камчатского края.

На этапе 1 формируется ситуационный план перспективного развития района на основе [23], который имеет вид (рис. 2). На основе анализа объектов аналогов [24] и рис. 2 можно сделать заключение, что данный район имеет серьезные предпосылки к развитию промышленной инфраструктуры. Суммарная мощность электрических нагрузок составляет около 100 МВт.

На этапе 2 формируются альтернативные варианты технологий производства энергии. Оценка альтернатив на основе формул (1)– (9) показала следующие результаты (табл. 4).

Поскольку в данном регионе имеется сложившаяся система доставки дизельного топлива, альтернативами множества $A$ для анализа являются: $a_1$— ТЭС, $a_1$— ГЭС, $a_1$— ВЭС, $a_1$— СЭС, $a_1$— ДЭС.

*Таблица 4*

*Оценка потенциала энергоресурсов*

| Угаль, *лет* | Солнечная энергия, *кВт·ч/кВт уст.мощ.* | Максимальная гарантированная мощность ГЭС, *МВт* | Ветровая энергия, *кВт·ч/кВт уст.мощ.* |
|---|---|---|---|
| 97 | 1557 | 28,1 МВт | 1819 |

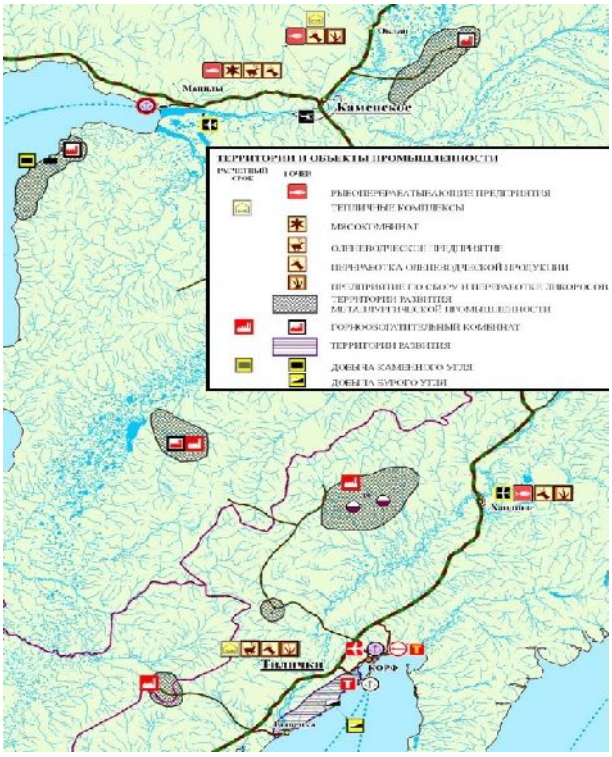


**Рис. 2.** Ситуационный план района с размещением перспективных потребителей энергии

На этапе 3 формируется множество критериев $F$. В качестве критериев принимаются: $f_1$—чистый дисконтированный доход за 30 лет, получаемый при использовании технологии производства энергии, *р./кВт*; $f_2$—воздействие технологии на окружающую среду (субкритерии: $g_{21}$—удельная площадь изымаемых земель, *м²/кВт*; $g_{22}$—оценка выбросов вредных веществ в атмосферу, *балл*; $g_{23}$—биологическое воздействие, *балл*); $f_3$—оценка общественного мнения о типе станции (субкритерии: $g_{31}$—отношение населения к технологии производства электроэнергии, *балл*; $g_{32}$—обеспечение занятости населения, *чел.-лет/ГВт·ч*), $f_4$—оценка технической эффективности проекта (субкритерии: $g_{41}$—влияние технологии на качество электрической энергии; $g_{42}$—маневренность источника энергии).

В результате оценки альтернатив при помощи объективных и субъективных моделей (10)– (13) и табл. 1 получаем следующие результаты (табл. 5).

По результатам опроса ЛПР получили следующие ответы относительно критериев для формирования модели предпочтений (табл. 6).

На основании выявленных ответов ЛПР формируется модель предпочтений и заполняются матрицы парных сравнений. Благодаря модернизации процедуры построения матриц парных сравнений альтернатив число запросов было снижено с 120 до 8. В результате были определены следующие локальные и глобальные приоритеты альтернатив (табл. 7).

*Таблица 5*

*Оценка альтернатив по критериям*

| $A_i$ | $f_1$ | $f_2$ | | | $f_3$ | | $f_4$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $g_{21}$ | $g_{22}$ | $g_{23}$ | $g_{31}$ | $g_{32}$ | $g_{41}$ | $g_{42}$ |
| $a_1$ (ТЭС) | 444022 | 129 | 10 | 5 | 2 | 0,11 | 5 | 4 |
| $a_2$ (ГЭС) | 711743 | 6633 | 0,1 | 10 | 4 | 0,27 | 5 | 5 |
| $a_3$ (ВЭС) | 134804 | 75 | 0,1 | 1 | 4 | 0,17 | 1 | 2 |
| $a_4$ (СЭС) | 112677 | 35 | 5 | 2 | 5 | 0,87 | 3 | 2 |
| $a_5$ (ДЭС) | –754473 | 20 | 4,3 | 3 | 3 | 0,11 | 5 | 5 |

*Таблица 6*

*Результаты опроса ЛПР*

| Критерий | $f_1$ | $g_{21}$ | $g_{22}$ | $g_{23}$ |
|---|---|---|---|---|
| $\Delta x$ | 100000 | 500 | 2 | 2 |
| Критерий | $g_{31}$ | $g_{32}$ | $g_{41}$ | $g_{41}$ |
| $\Delta x$ | 0,5 | 0,2 | 1 | 0,5 |

*Таблица 7*

*Результаты анализа альтернатив при помощи модернизированного AHP*

| $A_i$ | Веса альтернатив по критериям $v_i$ | | | | | | | | $V_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $f_1$ | $g_{21}$ | $g_{22}$ | $g_{23}$ | $g_{31}$ | $g_{32}$ | $g_{41}$ | $g_{41}$ | |
| $a_1$ (ТЭС) | 0,25 | 0,24 | 0,03 | 0,17 | 0,03 | 0,07 | 0,27 | 0,26 | 0,21 |
| $a_2$ (ГЭС) | 0,27 | 0,03 | 0,29 | 0,03 | 0,24 | 0,17 | 0,27 | 0,33 | 0,26 |
| $a_3$ (ВЭС) | 0,23 | 0,24 | 0,29 | 0,30 | 0,24 | 0,11 | 0,03 | 0,04 | 0,18 |
| $a_4$ (СЭС) | 0,22 | 0,24 | 0,18 | 0,27 | 0,31 | 0,59 | 0,15 | 0,04 | 0,21 |
| $a_5$ (ДЭС) | 0,03 | 0,24 | 0,20 | 0,23 | 0,17 | 0,07 | 0,27 | 0,33 | 0,14 |
| $w_i$ | 0,50 | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,13 | 0,13 | |

На основании приоритетов (табл. 7) было получено следующее ранжирование альтернатив: ГЭС > ТЭС = СЭС > ВЭС > ДЭС. Данные результаты соответствуют выявленным в ходе опроса предпочтениям ЛПР и носят предварительный рекомендательный характер. На основании этого для реализации ЛСЭС рекомендуется принять следующие технологии производства электроэнергии: ГЭС, ТЭС, СЭС.

**Заключение**

Таким образом, в статье была предложена методика многокритериального выбора перспективных технологий производства электроэнергии при развитии ЛСЭС на основе модернизированного многокритериального метода AHP. Модернизация метода позволяет на этапе парных сравнений альтернатив по критериям существенно сократить число запросов к ЛПР.

Проведена апробация предложенной методики на примере удаленного района перспективного освоения Камчатского края с учетом приведенных структур критериев, получено предварительное решение.

*Литература*

1. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

2. Рыбак В.А., Шокр А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 3. С. 12-18.

3. Sun X. Multiple criteria decision analysis techniques in aircraft design and evaluation processes: Diss. … Dr.-Ing. Hamburg. Köln: DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2013. 181 p.

4. Aouam T., Chang S.I., Lee E.S. Fuzzy MADM: An outranking method // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 145. P. 317–328.

5. Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations // ORInsight. 2009. № 22 (4). P. 201–220.

6. Li B., Chang X. Application of Analytic Hierarchy Process in the Planning of Energy Supply Network for Electric Vehicles // Energy Procedia. 2011. № 12. P. 1083–1089.

7. Amiri M. P. Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37 (9). P. 6218–6224.

8. Saracoglu B.O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries". European Journal of Industrial Engineering. Inderscience Enterprises Ltd. 2013. Vol. 7 (4). P. 411–416.

9. Saracoglu B.O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries // European Journal of Industrial Engineering. Inderscience Enterprises Ltd. 2013. Vol. 7 (4). P. 416–441.

10. Кудрин Б.И. Расчет электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 14-22.

11. Обухов С.Г., Хошнау З.П.Х. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // Электрические станции. 2012. № 11 (976). С. 43-47.

12. Научно-прикладной справочник по климату СССР/ под ред. Е.П. Борисенкова. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. Вып. 27. Камчатская обл. 597 с. Сер. 3.

13. Расписание погоды [Электронный ресурс]: сайт. URL: http://rp5.ru (дата обращения: 11.11.2018).

14. Стадник В.В., Еорбаренко Е.В., Шиловцева О.А., Задворных В.А. Сравнение вычисленных и измеренных величин суммарной и рассеянной радиации, поступающей на наклонные поверхности, по данным наблюдений в метеорологической обсерватории МГУ // Тр. Гл. геофизич. обсерватории им. А.И. Воейкова. 2016. № 581. С. 138-154.

15. Стадник В.В., Разгоняев Ю.В. Оценка суммарного прихода солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности // Тр. Гл. геофизич. обсерватории им. А.И. Воейкова. 2008. № 557. С. 67-84.

16. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 234 с.

17. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах. М.: Логос, 2003. 392 с.

18. Грачев В.А., Плямина О.В. Глобальные экологические проблемы, экологическая безопасность и экологическая эффективность энергетики // Век глобализации. 2017. № 1. С. 86-97.

19. Ajayi K.T., Olamide O.O. Multi-Criteria Analysis of Power Plants in Nigeria // Global Science and Technology Journal. 2014. Vol. 2, № 2. P. 1-22.

20. Stein E.W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 640-654.

21. Бекиров Э., Фурсенко Н., Экологическая характеристика работы солнечных и ветровых электростанций // MOTROL. 2013. Vol. 15, № 5.145-150.

22. Орлов А.И. Теория экспертных оценок в нашей стране // Научный журнал КубГАУ: политемат. сетевой электрон. журн. 2013. № 93. С. 1-11.

23. Схема территориального планирования и размещения объектов капитального строительства краевого значения от 16.10.2012 г. № 3 [Электронный ресурс] // ТОР «Камчатка»: инвестиционный портал Камчатского Края. URL: http://old.kamgov.ru/index.php?cont=oiv_din&mcont= 4165& menu=4&menu2=0&id=172 (дата обращения: 11.11.2018).

24. Инвестиционный климат Камчатского края [Электронный ресурс] // Инвесткамчатка .ру: офиц. страница инвестиционного портала Камчатского края. URL: http://investkamchatka.ru/tor/ (дата обращения: 11.11.2018).

*References*

1. Kini R. The placement of energy facilities: the choice of solutions: per. s angl. M.: Energoatomizdat, 1983. 320 p.

2. Rybak V.A., SHokr A. Analytical review and comparison of existing decision support technologies // System analysis and applied information science. 2016. № 3. P. 12-18.

3. Sun X. Multiple criteria decision analysis techniques in aircraft design and evaluation processes: Diss. … Dr.-Ing. Hamburg. Köln: DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2013. 181 p.

4. Aouam T., Chang S.I., Lee E.S. Fuzzy MADM: An outranking method // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 145. P. 317-328.

5. Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations // ORInsight. 2009. № 22 (4). P. 201-220.

6. Li B., Chang X. Application of Analytic Hierarchy Process in the Planning of Energy Supply Network for Electric Vehicles // Energy Procedia. 2011. № 12. P. 1083-1089.

7. Amiri M. P. Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37 (9). P. 6218-6224.

8. Saracoglu B.O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries". European Journal of Industrial Engineering. Inderscience Enterprises Ltd. 2013. Vol. 7 (4). P. 411-416.

9. Saracoglu B.O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries // European Journal of Industrial Engineering. Inderscience Enterprises Ltd. 2013. Vol. 7 (4). P. 416-441.

10. Kudrin B.I. Calculation of electrical loads of consumers: history, state, complex method // Industrial Power Engineering. 2015. № 5. P. 14-22.

11. Obuhov S.G., Hoshnau Z.P.H. Prediction of electricity consumption modes by autonomous power systems // Elektricheskie stancii. 2012. № 11 (976). P. 43-47.

12. Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR / pod red. E.P. Borisenkova. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001. Vyp. 27. Kamchatskaya obl. 597 p. Ser. 3.

13. Weather schedule [Elektronnyj resurs]: sajt. URL: http://rp5.ru (data obrashcheniya: 11.11.2018).

14. Stadnik V.V., Eorbarenko E.V., Shilovceva O.A., Zadvornyh V.A. Comparison of calculated and measured values of total and scattered radiation arriving on inclined surfaces, according to observational data in the meteorological observatory of Moscow State University // Tr. Gl. geofizich. observatorii im. A.I. Voejkova. 2016. № 581. P. 138-154.

15. Stadnik V.V., Razgonyaev YU.V. Estimation of the total solar radiation arrival on inclined surfaces // Tr. Gl. geofizich. observatorii im. A.I. Voejkova. 2008. № 557. P. 67-84.

16. Sivkov S.I. Methods for calculating solar radiation characteristics. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 234 p.

17. Larichev O.I. Decision making theory and techiques. A chronicle of events in fairy lands. M.: Logos, 2003. 392 p.

18. Grachev V.A., Plyamina O.V. Global environmental problems, environmental safety and energy efficiency // Age of globalization. Journal of Global Studies. 2017. № 1. P. 86-97.

19. Ajayi K.T., Olamide O.O. Multi-Criteria Analysis of Power Plants in Nigeria // Global Science and Technology Journal. 2014. Vol. 2, № 2. P. 1-22.

20. Stein E.W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 640-654.

21. Bekirov Eh., Fursenko N. Environmental performance of solar and wind power plants // MOTROL. 2013. Vol. 15, № 5. P. 145-150.

22. Orlov A.I. Theory of expert estimation in our country // Scientific Journal of KubSAU: politemat. setevoj ehlektron. zhurn. 2013. № 93. P. 1-11.

23. The scheme of territorial planning and location of capital construction objects of regional value ot 16.10.2012 g. № 3 [Elektronnyj resurs] // TOR «Kamchatka»: investicionnyj portal Kamchatskogo Kraya. URL: http://old.kamgov.ru/index.php? cont= oiv_din&mcont=4165&menu=4& menu2=0&id=172 (data obrashcheniya: 11.11.2018).

24. Official site of the Kamchatka Krai Government [Elektronnyj resurs] // Investkamchatka .ru: ofic. stranica investicionnogo portala Kamchatskogo kraya. URL: http://investkamchatka.ru/tor/ (data obrashcheniya: 11.11.2018).