

УДК 621.03.07

EDN QWZTHU

МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К «ЗЕЛЕННОЙ» ЭНЕРГЕТИКЕ

Е.А. Кумагина

ORCID: 0000-0002-5199-8814 e-mail: elena.kumagina@itmm.unn.ru
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

А.С. Плехов

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: aplehov@mail.ru
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

В настоящее время мировая экономика осуществляет энергопереход – изменяется топливно-энергетический баланс, снижается использование ископаемого топлива в электроэнергетике в пользу низкоуглеродных и безуглеродных источников энергии. Однако вопрос о целесообразности использования возобновляемых источников энергии в энергосистемах неразрывно связан с вопросом обеспечения надежного электроснабжения потребителя. Риски нарушения электроснабжения чаще всего вызваны климатическими условиями. При переходе на «зеленую» энергетику данные вопросы должны быть решены. Статья посвящена постановке и решению проектных задач снижения данных рисков. Разработана математическая модель оценки структуры комплексной системы электрогенерации при использовании возобновляемых источников энергии. Посредством целевой функции модели минимизируется дисперсия климатических показателей. Приведены результаты расчетных экспериментов.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, потенциальные риски, комплексная система ВИЭ, целевая функция, математическая модель расчета рисков.

Для цитирования: Кумагина Е.А., Плехов А.С. Минимизация рисков нарушений электроснабжения при переходе к «зеленой» энергетике // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 116-129. EDN QWZTHU

ELECTRIC SUPPLY DISRUPTIONS RISK MINIMIZATION DURING THE TRANSITION TO GREEN ENERGY

E.A. Kumagina

ORCID: **0000-0002-5199-8814** e-mail: **elena.kumagina@itmm.unn.ru**
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Plekhov

ORCID: **0000-0002-6954-3295** e-mail: **aplehov@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Currently, the world economy is undergoing an energy transition – the fuel and energy balance is changing, the use of fossil fuels in the electric power industry is decreasing in favor of low-carbon and carbon-free energy sources. However, the question of the feasibility of using renewable energy sources in energy systems is inextricably linked with the issue of ensuring reliable electricity supply to consumers. The risks of power outages are most often caused by climatic conditions. These situations must be prevented during the transition to green energy. This article is devoted to setting and solving design problems to reduce these risks. A mathematical model for assessing the structure of an integrated power generation system using renewable energy sources has been developed. The model's objective function minimizes the dispersion of climate indicators. The results of computational experiments are presented.

Key words: alternative energy sources, potential risks, integrated renewable energy system, objective function, mathematical model for calculating risks.

For citation: E.A. Kumagina and A.S. Plekhov, “Electric supply disruptions risk minimization during the transition to green energy”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 116-129, 2024. EDN QWZTHU

I. Введение

Генерация электроэнергии возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) с каждым годом обретает все большую значимость в мировой энергетике [1]. При этом экономические и экологические предпосылки развития «зеленой» электроэнергетики сталкиваются с рисками неэффективной работы выбранных источников, которые необходимо заранее выявить, рассчитать, применяя обоснованные математические методы оценки [2-4].

Для ветроэнергетики характерны большая стоимость проектирования (из-за необходимости привязки к местности), большая вероятность изменения параметров ветра, дороговизна ремонтных работ, необходимость

прокладывания кабеля через море для шельфовых ветроэлектростанций с использованием при этом вставки постоянного тока для недопущения загрузки кабеля зарядной мощностью; все эти характеристики приводят к длительным срокам окупаемости. Для малой гидроэнергетики характерны сезонная изменчивость потока воды, возможность промерзания русла и наводнений, а также недостоверные данные о гидроресурсах [5].

Эффективность солнечных электростанций ограничена метеоусловиями [6], сложностью поиска и устранения технологических нарушений, дороговизной сопутствующего преобразовательного оборудования.

Возможность применения ВИЭ может быть обеспечена комплексным подходом к модернизации (диверсификации) системы электрогенерации и электроснабжения, обеспечением возможности быстрого включения резервных источников питания, таких как дизель- или аккумуляторно-инверторные электростанции [7].

II. Диверсификация источников электрогенерации

В качестве объекта анализа рассмотрим предлагаемую к реализации комплексную электроэнергетическую систему Якутии, в качестве меры риска нарушения электроснабжения в долгосрочном применении ВИЭ прием дисперсию себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии [8]. Если каждый источник электрогенерации в проектируемой системе ВИЭ характеризуется некоторой дисперсией себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии, себестоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии от комплексной системы ВИЭ имеет дисперсию, определяемую ее составом. Суммарную дисперсию надежности электроснабжения минимизируем, меняя состав проектируемой системы ВИЭ.

Проведем вычислительный эксперимент и установим оптимальное распределение электростанций в определенном регионе России на примере Республики Саха (Якутия). Данный регион имеет автономное энергоснабжение, основанное на ДЭС. Средняя стоимость выработки электроэнергии с помощью ДЭС в данном регионе составляет 80-120 руб. за кВт·ч [9, 10]. Данный регион весьма удален от основных регионов России, поэтому значительно уменьшить стоимость традиционных источников энергии в данной местности нельзя. Именно поэтому данный регион является достаточно перспективным для внедрения ВИЭ [10].

При оценке возможности строительства ветроэлектростанций необходимо учитывать достаточно низкую среднюю скорость ветра (2 м/с) на территории Якутии. Исторический максимум этой скорости (8 м/с) фиксировался только в 1988 г. Установка ВЭС целесообразна в основном на севере, где скорость ветра существенно выше. Во время полярной ночи ветра почти нет, как и в сильные морозы, и такие периоды времени занимают в Якутии большую часть календарного года. Работа ветроэлектростанций

возможна лишь летом, когда средняя скорость ветра существенно увеличивается [11]. Но летний период на данной территории очень короткий, поэтому круглогодичная работа станций практически невозможна, и необходимо вновь возвращаться к дизельному топливу. Средняя стоимость 1 кВт·ч энергии ветроэлектростанций с учетом оборудования невысока (≈ 8 руб.), но погодные условия Якутии не позволяют широко использовать ветроустановки [12].

По данным Института энергетической стратегии, теоретический потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России в течение трех дней, превышает энергию годового производства электроэнергии в стране в целом. Средняя годовая суммарная радиация в Якутске составляет 3712 МДж/м², или 70 % годовой суммы, которая наблюдалась бы при безоблачном небе. Ледостав на реках Якутии длится 6-8 месяцев, мощность ледяного покрова доходит до 3 м [6]. В настоящее время современные электростанции способны функционировать в условиях вечной мерзлоты [13], поэтому суровый климат не будет существенной помехой. Однако следует учитывать, что выработка энергии при отрицательных температурах существенно ниже. Стоимость гидроэнергии с учетом оборудования и его обслуживания составляет 10 рублей за 1 кВт·ч, что также ниже дизельной, которая применяется в Якутии на сегодняшний день [14].

Таким образом, учитывая климатические и экономические составляющие, на территории Республики Саха Якутия наиболее целесообразно в качестве альтернативных источников энергии использовать солнечные батареи и микро-гидроэлектростанции [15].

Данная гипотеза подтвердится, если для данного региона найдется оптимальное распределение различных видов электростанций согласно задаче оптимизации, и при этом стоимость за кВт·ч будет ниже, чем при использовании ДЭС.

III. Задача оптимизации

Сформулируем задачу, решение которой будет рассматриваться в рамках данного исследования. Для обеспечения энергией региона Республика Саха нами выбраны солнечные электростанции (СЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС). Проверим корректность ранее составленных гипотез. Добавим к данному списку один из самых распространенных возобновляемых источников энергии – ветроэлектростанции (ВЭС).

Сформируем задачу оптимизации для расчета оптимального распределения различных видов электростанций.

В рамках данного анализа путем вычисления риска отказов будут использоваться такие характеристики, как дисперсия и среднее квадратичное (стандартное) отклонение. Запишем $D(Y/a)$ – дисперсию стоимости

энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени, то есть, мощности при разном сочетании долей генерации различными источниками. Эта величина была положена в основу целевой функции для системы ВИЭ [8, 16]:

$$D(Y/a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

где σ_{ij} – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для Y_i, Y_j ; Y_i – стоимость за кВт·ч определенного источника электрогенерации; x_i – доля, вырабатываемая одним источником энергии; $D(Y/a)$ – дисперсия стоимости для энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени; a – количество электроэнергии, вырабатываемое системой ВИЭ в единицу времени, то есть, мощность всей комплексной системы электрогенерации; n – количество источников энергии.

Переменными являются x_i – доли, вырабатываемые одним источником энергии в системе ВИЭ, $i = 1 \dots n$.

Ограничения, накладываемые на переменные:

$$x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1; \quad (2)$$

$$x_0 r_0 + x_1 m_1 + \dots + x_n m_n \leq A; \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 0 \dots n, \quad (4)$$

где x_i – доля источника энергии в системе, $i = 0 \dots n$; m^i – средняя стоимость выработки энергии с помощью рискованного источника, $i = 1 \dots n$; r_0 – стоимость выработки энергии с помощью ДЭС, примем $r_0 = 90$, поскольку погодные условия не влияют на работу ДЭС, а средняя стоимость выработки электроэнергии с помощью ДЭС в данном регионе составляет 80 - 120 руб. за кВт·ч [9, 10]; A – максимально допустимый уровень средней стоимости 1 кВт·ч электрической энергии.

Данная задача (задача 1) составлена в общем виде, поэтому необходимо ее конкретизировать под Республику Саха. Так как изучается гипотеза о применении солнечных батарей, микро-гидроэлектростанций и ветроэлектростанций, то $n = 3$.

Конкретизированные ограничения задачи записываются следующим образом:

$$x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = 1; \quad (5)$$

$$x_0 r_0 + x_1 m_1 + x_2 m_2 + x_3 m_3 \leq A; \quad (6)$$

$$x_i \geq 0, i = 0 \dots 3, \quad (7)$$

здесь x_0 – доля дизельной энергии, которая является безрисковой; x_1 – доля солнечной энергетики; x_2 – доля гидроэнергетики; x_3 – доля ветроэнергетики; m_1, m_2, m_3 – стоимость выработки энергии с помощью СЭС, ГЭС и ВЭС, соответственно.

Для расчета рисков должна быть известна стоимость кВт·ч каждого источника энергии. Однако подобная информация сложна в оценке и получении. Стоимость энергии ВИЭ зависит от следующих параметров: стоимость самого генератора энергии, стоимость его обслуживания, количество вырабатываемой энергии и амортизационные отчисления. Получаем следующую формулу для вычисления стоимости определенного источника ВИЭ:

$$Y = \frac{E \cdot P + B + Am}{K}, \quad (8)$$

где Y – стоимость за кВт·ч энергии, полученной от определенного источника энергии; E – коэффициент окупаемости, обратно пропорциональный сроку окупаемости; P – стоимость генератора электроэнергии; B – стоимость обслуживания генератора; Am – амортизационные отчисления, K – количество вырабатываемой энергии за определенный период. В данном случае все параметры являются константами или изменяются незначительно, кроме количества вырабатываемой энергии.

Чем больше энергии вырабатывается возобновляемым источником энергии при неизменном количестве генераторов, тем выгоднее их использование и меньше цена за кВт·ч. Имеем обратную зависимость стоимости энергии и количества вырабатываемой энергии. Соответственно, заменим в исходной задаче 1: Y_i – стоимость за кВт·ч определенного источника энергии на $1/K_i$ – величину обратно пропорциональную количеству вырабатываемой энергии источником $i, i = 1 \dots n$.

В связи с данными изменениями имеем следующую задачу 2:

$$D(1/K) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^* x_i x_j \rightarrow \min, \quad (9)$$

где σ_{ij}^* – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для K_i, K_j ; K_i – количество вырабатываемой энергии источником i ; x_i – доля, вырабатываемая одним источником энергии, $i = 1 \dots 3$; $D(1/K)$ – дисперсия количества энергии, вырабатываемой системой ВИЭ за единицу времени.

В ограничениях задачи 2 остаются ограничения (5) и (7).

Добавляется ограничение на максимальную долю ДЭС:

$$x_0 \leq 1. \quad (10)$$

Из ограничений было удалено ограничение (6) на стоимость электроэнергии, так как в рамках ранних исследований [14] было выяснено, что в Республике Саха стоимость выработки с помощью любого ВИЭ меньше, чем стоимость выработки с помощью дизельной энергии. Соответственно было добавлено ограничение (10) на максимальную долю дизельной энергии в системе, так как любой другой источник энергии будет дешевле и, ограничив долю x_0 , можно снизить стоимость генерируемой энергии.

Далее определим формулы, с помощью которых находится количество генерируемой энергии каждым из рассматриваемых способов.

Для ветроэлектростанции формула определения мощности вырабатываемой электроэнергии:

$$P_{\text{вт}} = 0,5 \cdot Q \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \text{Eff}_{\text{вт}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{вт}}$ – мощность ветроэлектростанции, Вт; Q – плотность воздуха (1,23 кг/м³); S – площадь ометания ветроколеса, м²; V – скорость ветра, м/с; C_p – коэффициент использования энергии ветра (0,35...0,45); $\text{Eff}_{\text{вт}}$ – КПД генератора. В данном случае видно, что все значения в формуле – константы, кроме скорости ветра.

Для солнечной электростанции имеет место следующая формула:

$$P_{\text{сп}} = P_{\text{инс}} \cdot \text{Eff}_{\text{сп}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{сп}}$ – мощность солнечных панелей, Вт; $P_{\text{инс}}$ – мощность инсоляции на земной поверхности на одном квадратном метре, кВт/м²; $\text{Eff}_{\text{сп}}$ – КПД солнечной панели. В данном уравнении все значения в формуле константы, кроме среднемесячной инсоляции.

Для миниГЭС:

$$P_{\text{ГЭС}} = 120 \cdot V^3 \cdot D^2, \quad (13)$$

где $P_{\text{ГЭС}}$ – мощность, Вт; V – скорость течения воды, м/с; D – диаметр колеса, м [2].

Для отдельно взятой реки все параметры являются константами, кроме скорости течения. Зачастую вместо скорости течения собираются данные о расходе воды. Из них можно найти скорость реки, зная поперечное сечение русла: $V = R/S_{\text{русля}}$, где R – расход воды в м³/с. Отсюда следует, что

единственной переменной в формуле является скорость течения и соответственно расход воды.

В случае с солнечной электроэнергией в течение года изменяется показатель солнечной инсоляции. Чем он больше, тем больше вырабатывается электроэнергии с каждой панели, и тем выгоднее она становится. Так как в формуле инсоляция указана в первой степени, зависимость стоимости и инсоляции обратная линейная. В случае с водной и ветряной электроэнергией имеем обратную кубическую зависимость.

Учитывая вышеописанные зависимости, мы можем заменить стоимость электроэнергии за кВт·ч на климатические данные. По вышеприведенным формулам видно, что количество вырабатываемой электроэнергии также определяется большим количеством констант и изменяются в них только климатические показатели в регионе. В связи с этим, в ранее определенной задаче можно заменить показатель количества вырабатываемой электроэнергии на климатические показатели, так как в целевой функции минимизируется дисперсия, а в данной задаче изменяются только климатические показатели.

Однако при этом стоит учесть, что климатические данные имеют различные единицы измерения, и их непосредственное сравнение будет некорректным. В связи с этим, сравниваться будут не сами единицы измерения, а их относительное изменение в течение года. При выполнении расчетов для СЭС параметры будут обратно пропорциональны климатическим показателям, т.к. увеличение инсоляции приводит к уменьшению стоимости. В случае с ВЭС и ГЭС параметры будут браться в степени «-3», так как скорость ветра и реки указана в (11) и (13) в «3» степени.

Для выборки месячных значений климатического показателя из 12 элементов будет найдена выборка из 11 элементов, которая соответствует относительным изменениям климатического показателя в течение года по месяцам.

Рассчитаем относительное изменение инсоляции по месяцам:

$$G_{ii} = \frac{\frac{1}{P_{\text{инс } i}} - \frac{1}{P_{\text{инс } i-1}}}{\frac{1}{P_{\text{инс } i-1}}}, \quad i = 2 \dots 12. \quad (14)$$

где $P_{\text{инс } i}$ – солнечная инсоляция в i -ый месяц года в кВт·ч/м², $i = 1 \dots 12$.

Для ВЭС и ГЭС аналогичная выборка будет найдена по формулам, приведенным ниже.

Относительное изменение климатического показателя для ГЭС:

$$G_{2i} = \frac{\frac{1}{R_i^3} - \frac{1}{R_{i-1}^3}}{\frac{1}{R_{i-1}^3}}, \quad i = 2 \dots 12, \quad (15)$$

где R_i – расход воды в реке в i -ый месяц года в м³/с, $i = 1 \dots 12$.

Относительное изменение климатического показателя для ВЭС:

$$G_{3i} = \frac{\frac{1}{V_i^3} - \frac{1}{V_{i-1}^3}}{\frac{1}{V_{i-1}^3}}, \quad i = 2 \dots 12, \quad (16)$$

где V_i – скорость ветра в i -ый месяц года в м/с, $i = 1 \dots 12$.

Для формирования обобщенного климатического показателя для системы ВИЭ произведем суммирование относительных изменений энергоресурсов.

Таким образом будут подготовлены данные, необходимые для решения задачи 3 с ограничениями (5), (7), (10) и критерием:

$$D(1/G) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^{**} x_i x_j \rightarrow \min, \quad (17)$$

где σ_{ij}^{**} – ковариация между элементами G_i и G_j ; G_i – изменение определенного климатического показателя в течение года.

IV. Метод решения задачи

Для решения задачи использован метод переборного типа. В рамках реализованной ИС доли ВИЭ будут перебираться в следующем порядке: сначала будут перебраны все возможные доли СЭС с заданной точностью, затем по перспективным направлениям СЭС будут перебираться доли ГЭС. Перебор оставшихся долей не осуществляется, так как любое вычисление риска с зафиксированной долей СЭС, ГЭС и ВЭС даст гарантированную долю ДЭС, которая следует из условия (5) задачи, и соответственно будет получено конечное решение задачи.

Стоит отметить, что ковариация между двумя источниками энергии может быть отрицательна. Это означает, что увеличение климатического показателя у одного источника энергии может сопровождаться падением показателя у другого. Соответственно, увеличение доли некоторых рискованных источников энергии может привести к уменьшению суммарного риска.

На языке программирования C# создано приложение, при помощи которого произведены расчеты.

V. Результаты расчетов

Для проведения расчетов использованы следующие климатические данные: инсоляция в течение года в $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; расход воды в течение года в $\text{м}^3/\text{с}$; скорость ветра в течение года в $\text{м}/\text{с}$.

Значения средней инсоляции в течение года в городе Якутск приведены в [3], диапазон их изменения $1,09 \dots 5,64 \text{ kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Значения среднего расхода воды в течение года выбраны для реки Олёкма [5] и находятся в диапазоне $30\dots 2601 \text{ м}^3/\text{с}$. Значения средней скорости ветра в течение года составляют $3,00 \dots 4,26 \text{ м}/\text{с}$ [6].

Для первого эксперимента установлено ограничение на максимальную долю дизельной энергии в 80 %. Точность вычислений была установлена до 0,01. В результате вычислений были получены следующие доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0,8; СЭС – 0,07; ГЭС – 0; ВЭС – 0,13. Следовательно, использование ГЭС без рисков абсолютно невозможно. Это связано с полным замерзанием рек в данном регионе. В связи с этим, многократно уменьшается скорость течения и, соответственно, производство энергии. Во втором эксперименте установленная доля ДЭС равная нулю и точность 0,01. Цель эксперимента – определить, какой из источников энергии предпочтительнее в Республике Саха, и в каком процентном соотношении стоит их размещать.

В результате вычислений получены следующие доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0; СЭС – 0,34; ГЭС – 0; ВЭС – 0,66. Доля ВЭС преобладает над СЭС при полном переходе на ВИЭ. Данное явление наблюдается из-за полярных ночей в данном регионе. В то время как солнечное излучение меняется многократно в течение года, скорость ветра остается достаточно стабильной. Из-за этого использование ветра предпочтительнее в данном регионе.

В заключительном эксперименте была установлена доля дизельной энергии 50 %, тем самым обозначив частичный переход на ВИЭ. Максимальная точность вычислений была установлена 0,0001. Получены следующие результаты – доли генерации по видам источников энергии: ДЭС – 0,5; СЭС – 0,1701; ГЭС – 0; ВЭС – 0,3299.

Таким образом, при частичной замене дизельных генераторов на ВИЭ следует 17 % энергии вырабатывать с помощью солнечной энергетики, а 33 % вырабатывать с помощью ветроэлектростанций. Данное распределение источников энергии дает минимальный риск возникновения провалов генерируемой мощности в сетях электроэнергии при доле стабильной дизельной энергетики в 50 %.

VI. Заключение

В ходе проведенного исследования была поставлена и скорректирована задача оптимизации, в рамках которой вычисляется наилучшее соотношение источников энергии в республике Саха для достижения минимального риска возникновения перебоев в энергосистеме. Наиболее перспективными возобновляемыми источниками энергии в данном регионе являются и ветро- и солнечные электростанции; они могут быть внедрены с минимальным риском для электроснабжения республики. Энергетика, основанная на течении рек, в республике Саха нежизнеспособна.

С некоторыми модификациями современные ГЭС способны работать в условиях замерзания рек. Однако в данном регионе реки замерзают слишком глубоко, в связи с чем их течение замедляется крайне значительно, и добыча энергии из течения реки становится невыгодной. Ветрогенераторы являются самыми перспективными для внедрения в данном регионе. Данные, собранные возле города Якутск, позволяют сделать вывод, что энергия ветра в регионе достаточно стабильна, и из нее можно извлекать электроэнергию. Однако ветер в республике достаточно слабый, в связи с чем необходимо использовать ветрогенераторы с малым размахом лопастей, так как им необходима меньшая минимальная скорость ветра для работы.

В Республике Саха жизнеспособны солнечные электростанции, но достаточно велика длительность полярных ночей, на время которых должны работать дизельные генераторы, так как в эти периоды выработка энергии от солнечных панелей уменьшается.

© Кумагина Е.А., 2024

© Плехов А.С., 2024

Поступила в редакцию 02.08.2024

Принята к публикации 02.09.2024

Received 02.08.2024

Accepted 02.09.2024

Библиографический список

- [1] Сайфудинова Н.З., Мамалимов К.М., Сабирзянов А.И., Байгутлин А.И., Петунин Е.И. Влияние альтернативной энергетики на развитие экономики государства и окружающую среду // Московский экономический журнал. 2020. № 6. С. 177-188. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10419
- [2] Григорьев Л., Голяшев А., Скрыбина В., Курдин А., Федоренко Д., Коломиец А., Федоров С. Развитие возобновляемой энергетики на фоне энергетических кризисов // Академия Энергетики.РФ. 2022. № 1 (2). С. 40-45.
- [3] Милютин А.Ю., Готфрид П.А. Политические аспекты применения ветроэнергетических установок. Проблемы внедрения и распространения альтернативной энергетики в России // X Межд. науч.-практ. конф. «Научный форум: Технические и физико-математические науки», Декабрь 11-19, 2017, Москва, Россия. М.: ООО Международный центр науки и образования, 2017. С. 147-155.

- [4] Пупенцова С.В., Прокофьев П.А., Лукьянов А.В. Идентификация рисков проектов перехода на потребление возобновляемой электроэнергии // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Экономика. 2021. № 4. С. 36-43. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-4-36-43
- [5] Лукьянов А.В., Прокофьев П.А. Ключевые факторы риска проектов перехода на потребление возобновляемой электроэнергии // Всерос. студ. науч.-уч. конф. «Молодежная неделя науки ИПМЭиТ», Декабрь 02-04, 2022, Санкт-Петербург, Россия: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. Ч. 2. С. 103-106.
- [6] Инсоляция в Якутске // Nova Sun. Сайт о солнечных батареях и ветряках. [Электронный ресурс]. URL: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/yakutsk> (дата обращения 15.07.2024).
- [7] Карипова И.А., Тишков П.И. Риски предприятий электроэнергетической отрасли в формировании стратегии перехода на возобновляемые источники энергии // Креативная экономика. 2020. №. 14 (11). С. 2977-2992. DOI: 10.18334/ce.14.11.111091
- [8] Велькин В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах. Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
- [9] Общие сведения о Республике Саха (Якутия) // Управление Роскомнадзора по Республике Саха (Якутия). [Электронный ресурс]. URL: <https://14.rkn.gov.ru/about/p7613/> (дата обращения 15.07.2024).
- [10] Лебедева М.А. Особенности развития северных регионов на основе использования альтернативной энергетики // Научный результат. Экономические исследования. 2021. № 7 (2). С. 13-24. DOI: 10.18413/2409-1634-2021-7-2-0-2
- [11] Значение направления и скорости ветра в г. Якутск (Республика Саха) // ООО «Бетаэнерджи». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.betaenergy.ru/windspeed/yakutsk/> (дата обращения 15.07.2024).
- [12] Справочно-информационный портал «Погода и климат». Климатические таблицы. Данные для Якутска. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/24959.htm> (дата обращения 15.07.2024).
- [13] Гетманов В.Н., Блинов В.В., Гончаров Н.Ф., Комаров С.Г., Макаров И.Р., Мандрик М.С. Бесплотинные ГЭС, как источники энергообеспечения отдельных потребителей // III Всерос. науч. конф. с межд. уч. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий», Март 21-23, 2017, Новосибирск, Россия. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2017. С. 179-186.
- [14] Кулешов Л., Тихонов С. Себестоимость электроэнергии по типам электростанций в России // Россети. [Электронный ресурс]. URL: <https://oaomrsk.ru/sebestoimost-elektroenergii-po-tipam-elektrostancij-v-rossii/> (дата обращения 15.07.2024).
- [15] A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for the Arctic Region // Olekma At Kudu-Kel'. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6216> (дата обращения 15.07.2024).
- [16] Богомолов С.И., Щельников В.Н. Повышение энергоэффективности объектов наземной космической инфраструктуры арктической зоны России // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 533-536. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-533-537

References

- [1] N.Z. Saifudinova, K.M. Mamalimov, A.I. Sabirzyanov, A.I. Baigutlin and E.I. Petunin, "Influence of alternative power engineering on the development of the state's economy and the environment", *Moscow Economic Journal*, no. 6, pp. 177-188, 2020. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10419
- [2] L. Grigoriev, A. Golyashev, V. Skryabina, A. Kurdin, D. Fedorenko, A. Kolomiets and S. Fedorov, "Razvitie vozobnovlyаемoj energetiki na fone energeticheskikh krizisov [Development of renewable energy against the backdrop of energy crises]", *Akademiya Energetiki.RF [Academy of Energy.RF]*, no. 1(2), pp. 40-45, 2022 (in Russian).
- [3] A.Yu. Milyutin and P.A. Gotfried, "Political aspects of the application of wind power plants. Problems of introduction and distribution of alternative energy in Russia", in proc. *X International scientific-practical conference "Nauchnyj forum: Tekhnicheskije i fiziko-matematicheskie nauki [Scientific forum: Technical and physical-mathematical sciences]"*, Dec. 11-19, 2017, Moscow, Russia, pp. 147-166 (in Russian).
- [4] S.V. Pupentsova, P.A. Prokofiev and A.V. Lukyanov, "Risk identification in projects of transition to renewable electricity consumption", *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*, no. 4, pp. 36-43, 2021. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-4-36-43
- [5] A.V. Lukyanov and P.A. Prokofiev, "Klyuchevye faktory riska proektov perekhoda na potreblenie vozobnovlyаемoj elektroenergii [Key risk factors for projects of transition to renewable electricity consumption]", in proc. *All-Russian student scientific-educational conference "Molodezhnaya nedelya nauki IPMEiT [Youth Science Week IPMEiT]"*, Dec. 02-04, 2022, St. Petersburg, Russia, vol. 2, pp. 103-106 (in Russian).
- [6] Insolyaciya v Yakutske [Insolation in Yakutsk]. [Online]. Available at: <https://nova-sun.ru/insolyatsiya-v-rossii/yakutsk> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [7] I.A. Karipova and P.I. Tishkov, "Risks of electric power industry enterprises in developing a strategy for switching to renewable energy sources", *Creative Economy*, vol. 14, no. 11, pp. 2977-2992, Nov. 2020. DOI: 10.18334/ce.14.11.111091
- [8] V.I. Vel'kin, *Metodologiya rascheta kompleksnyh sistem VIE dlya ispol'zovaniya na avtonomnyh ob'ektah [Methodology for calculating complex renewable energy systems for use at autonomous facilities]*. Yekaterinburg: UrFU, 2015 (in Russian).
- [9] Obshchie svedeniya o Respublike Saha (Yakutiya) [General information about the Republic of Sakha (Yakutia)]. [Online]. Available at: <https://14.rkn.gov.ru/about/p7613/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [10] M.A. Lebedeva, "Features of the northern regions' development based on the use of alternative energy", *Research Result. Economic Research*, vol. 7, no. 2, pp. 13-24, 2021. DOI: 10.18413/2409-1634-2021-7-2-0-2
- [11] Znachenie napravleniya i skorosti vetra v g. Yakutsk (Respublika Saha) [The value of wind direction and speed in Yakutsk (Republic of Sakha)]. [Online]. Available at: <https://www.betaenergy.ru/windspeed/yakutsk/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [12] Spravochno-informacionnyj portal «Pogoda i klimat». Klimaticheskie tablicy. Dannye dlya Yakutskaja [Reference and information portal "Weather and climate". Climate tables. Data for Yakutsk]. [Online]. Available at: <http://www.pogodai-klimat.ru/climate/24959.htm> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).

- [13] V.N. Getmanov, V.V. Blinov, N.F. Goncharov, S.G. Komarov, I.R. Makarov and M.S. Mandrik, “Besplotinnye GES, kak istochniki energoobespecheniya ot del'nykh potrebitel'ej [Damless hydroelectric power stations as sources of energy supply for individual consumers]”, in proc. *III All-Russian scientific conference with international participation “Energ- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy [Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings]”*, Mar. 21-23, 2017, Novosibirsk, Russia, pp. 179-186 (in Russian).
- [14] L. Kuleshov, S. Tihonov, “Sebestoimost' elektroenergii po tipam elektrostancij v Rossii” [Cost of Electricity by Type of Power Plants in Russia]. [Online]. Available at: <https://oao-mrsk.ru/sebestoimost-elektroenergii-po-tipam-elektrostancij-v-rossii/> [Accessed: July 15, 2024] (in Russian).
- [15] A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for the Arctic Region. [Online]. Available at: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ViewPoint.pl?Point=6216> [Accessed: July 15, 2024].
- [16] S.I. Bogomolov and V.N. Shchel'nikov, “Improving the energy efficiency of ground-based space infrastructure facilities in the arctic zone of Russia”, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, no. 4, pp. 533-536, 2023. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-533-537

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кумагина Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Плехов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Elena A. Kumagina, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Alexandr S. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.