

УДК 621.311.26

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, Т.А. Александрова

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ
ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЭНЕРГОУДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена обоснованию экономической эффективности применения комбинированных источников энергии на основе дизель-генераторных и ветровых энергетических установок при проектировании и реконструкции локальных систем электроснабжения энергоудаленных объектов. Приведены основные этапы проектирования ветро-дизельной электростанции и методика оценки экономической эффективности ее сооружения. На примере энергоудаленного поселения Мурманской области даны расчеты экономической эффективности замены существующих дизельных энергоустановок на ветро-дизельную электростанцию. Результаты расчета показали, что сооружение комбинированной ветро-дизельной электростанции позволит снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии более чем на 40%.

Ключевые слова: ветро-дизельная электростанция, энергоудаленный потребитель, локальная система электроснабжения, экономическая эффективность.

В России зона децентрализованного электроснабжения охватывает около 70% территории страны [1]. Электроснабжение энергоудаленных потребителей или потребителей, присоединение которых к централизованной электрической сети невозможно (из-за дефицита мощности, в силу особенностей рельефа и др.), осуществляется от автономных источников энергии, как правило, от дизельных электростанций (ДЭС). К основным преимуществам ДЭС относят высокую производительность, надежность, компактность, многообразие их модификаций и типов исполнений. Однако ДЭС имеют серьезные недостатки: высокая стоимость привозного дизельного топлива, зачастую трудности и перебои в доставке топлива, необходимость постоянной дозаправки, высокий уровень шума, вредные выбросы.

Комбинированное использование ДЭС с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) является решением проблем высокой стоимости топлива и экологической безопасности.

Для районов с высокими скоростями ветра (более 5 м/с) наиболее перспективным вариантом комбинирования источников энергии является ветро-дизельная электростанция (ВДЭС). При этом ДЭС обеспечивает гарантированное питание электропотребителей, а ветроэнергетическая установка (ВЭУ) позволяет сократить затраты на топливо и снизить вредные выбросы в окружающую среду. В России уже имеется опыт эксплуатации ВДЭС в республиках Коми, Карелия, Саха, в Ленинградской, Архангельской, Ростовской и Мурманской областях, на Курильских островах, в Красноярском крае, на Камчатке [2]. Однако российские инвесторы не спешат вкладывать деньги в сооружение ВДЭС, поскольку технологии возобновляемой энергетики считаются дорогостоящими при низкой эффективности.

Цель проводимых исследований заключается в обосновании экономической эффективности применения ВДЭС в локальных системах электроснабжения (ЛЭС) энергоудаленных объектов. Объектом исследований выбрано с. Чапома численностью 81 чел., расположенное в Мурманской области на берегу Белого моря. Расстояние до ближайшего районного центра 320 км. Сообщение с другими поселениями осуществляется только воздушным транспортом. В селе функционирует рыбный колхоз. Энергообеспечение с. Чапома осуществляется от ДЭС.

Задачи исследования:

- на примере выбранного объекта рассмотреть основные этапы проектирования ВДЭС;
- провести анализ экономической эффективности проекта.

Основными результатами исследований должны стать ориентировочный срок окупаемости проекта и сравнительная оценка себестоимости электроэнергии от ВДЭС с существующим вариантом генерации электроэнергии от ДЭС.

Основные этапы проектирования ветро-дизельной электростанции и методика оценки экономической эффективности проекта

Основные этапы проектирования ВДЭС включают: оценку целесообразности использования ВЭУ; определение мощностей ВЭУ и ДЭС; разработку электрической структурной схемы; выбор электрооборудования.

1. Целесообразность использования ВЭУ определяется двумя основными факторами: потенциалом ветровой энергии местности расположения объекта и графиком электрической нагрузки объекта.

Оценка потенциала ветровой энергии заключается в анализе данных скоростей ветра. Анализируется средняя скорость ветра; ее изменения в течение суток, месяца, года; определяются максимальная и минимальная скорости ветра; рассчитываются частота изменений скорости ветра и повторяемость градаций скорости ветра. Полученные данные будут использованы для определения вырабатываемой мощности ВЭУ.

Вывод о целесообразности использования ВЭУ делается после сравнения графика вырабатываемой мощности ВЭУ с графиком нагрузки объекта.

2. Выбор мощностей ВЭУ и ДЭС производится на основе данных о графиках нагрузки (ГН) и потребления электроэнергии объектом.

Построение ГН основано на данных о количестве, мощности, коэффициентах загрузки K_3 и коэффициентах включения $K_в$ электроприемников (ЭП). K_3 и $K_в$ необходимы для расчета коэффициента использования $K_и$, который учитывается при определении средней за месяц потребляемой мощности каждого ЭП:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{уст}} \cdot K_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя за месяц мощность ЭП; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность ЭП; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования.

Коэффициент использования определяется по формуле

$$K_{\text{и}} = K_3 \cdot K_{\text{в}}, \quad (2)$$

где K_3 – коэффициент загрузки; $K_{\text{в}}$ – коэффициент включения.

Групповой ГН объекта строится суммированием индивидуальных ГН отдельных ЭП.

Мощность ДЭС должна покрывать всю потребляемую мощность, чтобы в периоды безветрия электроснабжение потребителей не прерывалось.

При значительной нагрузке генерацию лучше осуществлять несколькими маломощными ВЭУ, чем одной энергоустановкой с большой установленной мощностью. В этом случае при выходе ВЭУ из строя будет потеряна меньшая доля возобновляемой электроэнергии.

На этапе проектирования необходимо не только выбрать мощности источников питания, но и определить оптимальное соотношение их мощностей. Для экономии дизельного топлива в периоды работы ВЭУ рекомендуется, чтобы мощность ВЭУ покрывала 50 % потребляемой мощности объекта.

3. Разработка структурной схемы ВДЭС.

Для эффективной работы ВДЭС схема сопряжения источников и нагрузки должна позволять осуществлять три режима работы, когда потребляемая объектом мощность обеспечивается:

- ветроустановкой;
- дизельной электростанцией;
- параллельной работой ВЭУ и ДЭС.

Наиболее распространенными схемами, позволяющими ВДЭС осуществлять данные режимы, являются схемы сопряжения источников с шиной переменного или постоянного

тока. Выбор схемы производится с учетом требований к качеству выдаваемой электроэнергии и стоимости проекта.

4. При проектировании ВДЭС важными вопросами являются выбор типа и модели ВЭУ и ДЭС.

Ключевыми параметрами при выборе ВЭУ являются: мощность; стартовая скорость ветра, при которой начинает вращаться турбина; стоимость и тип генератора. Стоимость ВЭУ напрямую связана с ее мощностью. С увеличением мощности, как правило, увеличиваются начальная, номинальная, рабочая и предельная скорости ветра. Величина начальной скорости ветра накладывает ограничения на выбор ВЭУ в местах с небольшой и нестабильной скоростью ветра (например, где скорость ветра носит сезонный характер или в определенный продолжительный период времени отсутствует).

Необходимо выбирать ВЭУ одного типа и одной фирмы для более удобного обслуживания. Выбор ДЭС зависит от мощности, расхода топлива, условий эксплуатации и стоимости. Работа ДЭС со значительной недогрузкой недопустима, поэтому рекомендуется выбирать несколько дизельных генераторов, для возможности отключения части неработающих установок в часы минимума нагрузки.

Для оценки экономической эффективности проекта выполнен сравнительный анализ себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной ДЭС и ВДЭС.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии $C_{эл}$, руб/кВт·ч, [3],

$$C_{эл} = \frac{H_n \cdot K + C}{W}, \quad (3)$$

где H_n – нормативный коэффициент амортизации; K – общие капиталовложения, руб.; C – общегодовые эксплуатационные расходы, включающие расходы на оплату труда обслуживающего персонала, на плановый ремонт и топливо, руб.; W – общее количество электроэнергии, вырабатываемое электростанцией в течение года, кВт·ч.

При эксплуатации только ДЭС вся электроэнергия вырабатывается только ее генераторами. Для расчета себестоимости определяется общее потребление объектом электроэнергии за год.

При использовании ВДЭС, в учете себестоимости электроэнергии учитывается только величина энергии, вырабатываемая ДЭС, а энергия, вырабатываемая ВЭУ, считается бесплатной. Таким образом, для расчета по формуле (3) необходимо определить долю энергии, вырабатываемую только ДЭС.

Для определения общегодовых эксплуатационных затрат необходимо рассчитать затраты на топливо в год, руб., по формуле

$$C_{топ} = Q \cdot p \cdot k, \quad (4)$$

где $Q = W \cdot M$ – количество топлива в год, л; p – стоимость дизельного топлива, руб./л; k – поправочный коэффициент на доставку топлива, учитывающий район и сложность поставки.

Расход топлива для выработки 1 кВт·ч электроэнергии

$$M = \frac{q}{P}, \quad (5)$$

где q – расход топлива в час, л. (определяется по паспортным данным ДЭС); P – вырабатываемая ДЭС мощность, кВт.

Положительный эффект Δ от сооружения ВДЭС

$$\Delta = (C_{эл.ДЭС} - C_{эл.ВДЭС}) \cdot W, \quad (6)$$

где $C_{эл.ДЭС}$ и $C_{эл.ВДЭС}$ – себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ДЭС и ВДЭС соответственно.

Эффективность проекта установки ВДЭС определяется на основе расчета показателей экономической эффективности: чистого дисконтированного дохода NPV , индекса доходности PI , внутренней нормы доходности IRR и срока окупаемости.

Проектирование ветро-дизельной электростанции

Для оценки целесообразности установки ВДЭС выполнена оценка потенциала ветровой энергии в месте расположения с. Чапома. Для этого использованы данные архива погоды с метеостанции в с. Пялица, находящемся в 31 км от объекта исследования (ближайшая метеостанция) [4]. За период с 01.12.2014 по 30.11.2015 рассчитана средняя скорость ветра за каждые сутки, определена повторяемость скорости ветра в течение каждого месяца (градации скорости ветра), построен график среднемесячных скоростей ветра (рис. 1).

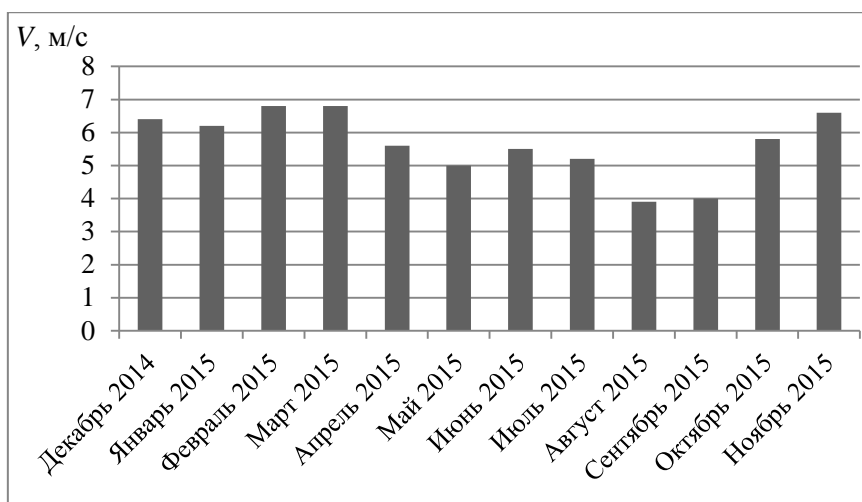


Рис. 1. График среднемесячных скоростей ветра

По результатам расчета среднегодовая скорость ветра составила 5,65 м/с, что характеризует перспективность использования ВЭУ.

При построении графика нагрузки п. Чапома все ЭП разделены на три группы: ЭП, относящиеся к жилым домам, и силовое оборудование; ЭП, используемые в рыбных цехах; освещение. Количество ЭП определено на основании того, что в селе находится 30 жилых домов и два рыбных цеха рыболовецкого колхоза.

Приняты допущения, что график нагрузки ЭП в жилых домах и силового оборудования не изменяется по месяцам, а график нагрузки рыбного цеха изменяется в зависимости от времени года (от улова рыбы). При расчете нагрузки освещения учитывалась средняя по месяцам продолжительность светового дня в Мурманской области и время использования светильников в жилых домах.

Полученный годовой групповой график нагрузки поселения представлен на рис. 2.

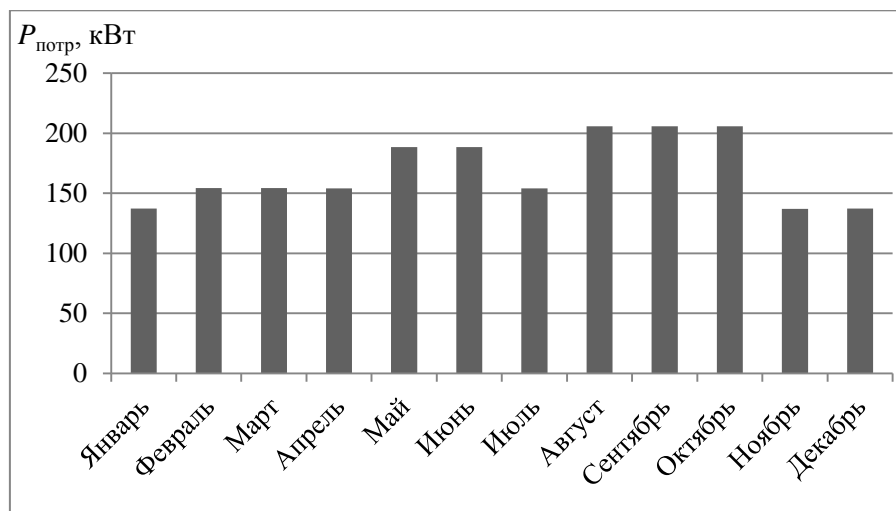


Рис. 2. Групповой график нагрузки села Чапома

Годовая средняя мощность, потребляемая поселением, составила 168,55 кВт. Максимальная за год мощность наблюдается в октябре (205,85 кВт).

Для сопряжения ВЭУ и ДЭС выбрана схема со вставкой постоянного тока [5] (рис. 3).

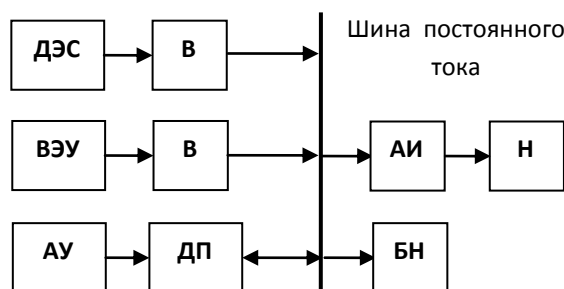


Рис. 3. Структурная схема ВДЭС с шиной постоянного тока:

АИ – автономный инвертор; АУ – аккумуляторное устройство; БН - балластная нагрузка; В – выпрямитель; ДП - двунаправленный преобразователь; Н - нагрузка

Преимуществом выбранной схемы является улучшение качества электроэнергии благодаря применению шины постоянного тока. Также в схеме не требуется синхронизация различных источников энергии, что может позволить наращивать или уменьшать установленную мощность энергетического комплекса по принципу модульности. Однако использование схемы усложняет конструкцию (требуется установка выпрямителей и инвертора), что увеличивает стоимость энергетического комплекса и усложняет систему управления.

Выбор типа энергоустановок основан на сравнительном анализе характеристик нескольких моделей фирм-производителей, производства которых расположено наиболее близко к объекту исследования. В результате в качестве источников энергии выбраны:

- ВЭУ Condor Air в количестве четырех штук мощностью 50 кВт каждая [6];
- ДЭС Iveco в количестве трех штук мощностью 40 кВт каждая и одна ДЭС Iveco мощностью 100 кВт.

Кроме источников энергии, выбраны аккумуляторные батареи, выпрямители и инвертор. Полный перечень оборудования приведен в табл. 1.

Таблица 1

Оборудование ВДЭС

Оборудование	Количество, шт.
Ветроустановка Condor Air - 50 кВт (модель CONDOR AIR WES 380/50-50)	4
Аккумулятор Delta DTM 12200 (AGM), 200 Ач	160
Выпрямитель ИПС-3000-380/220В-15А-3U	4
Инвертор PI 50000 Вт (380В)	1
Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт)	3
Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE NEF125M (100 кВт)	1

На основе результатов оценки потенциала ветровой энергии, суммарного группового графика нагрузки поселения и мощностных характеристик выбранных ВЭУ определено соотношение годового потребления и выработки электроэнергии (рис. 4). На рис. 4 показана доля в электропотреблении, которая будет покрываться за счет ВЭУ.

Из графика видно, что с ноября по апрель доля ВЭУ в покрытии требуемой электроэнергии будет составлять не менее 60%. Это позволит значительно сократить расход дизельного топлива по сравнению с вариантом электроснабжения только от ВДЭС.

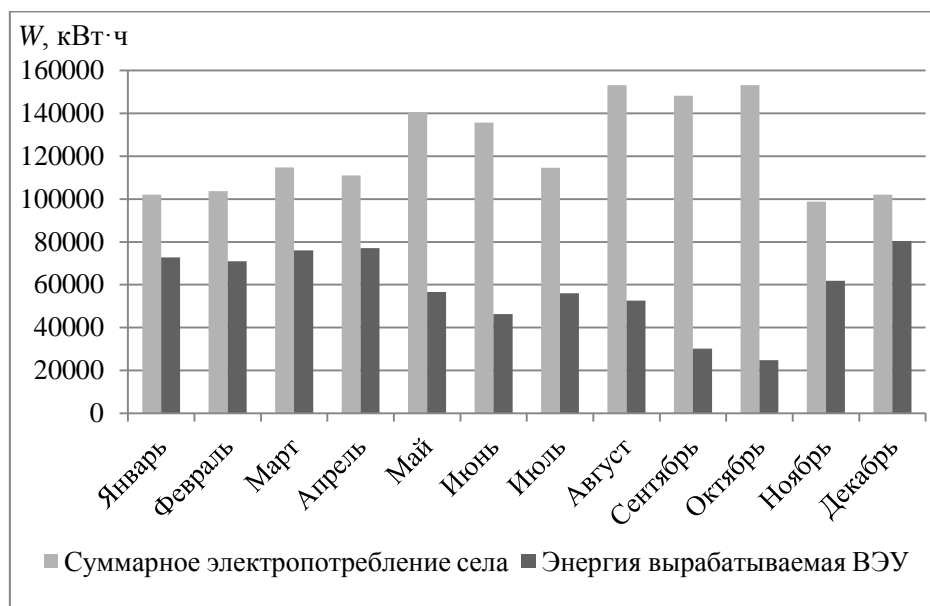


Рис. 4. Соотношение потребляемой электроэнергии и вырабатываемой ветроустановками

Результаты анализа экономической эффективности проекта

Для расчета себестоимости электроэнергии определен расход топлива ДЭС по формуле (5). Из паспортной характеристики дизель-генераторов известно, что расход топлива для Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт) при 80% нагрузке составляет 10,2 л/ч; а для Iveco (FPT) GE NEF125M (100 кВт) при 75% нагрузке – 24,1 л/ч [7]. Для обеих ДЭС расход топлива для выработки 1 кВт·ч электроэнергии равен 0,32 л.

Стоимость дизельного топлива в Мурманской области составляет 37,7 руб./л [8]. Учитывая электропотребление п. Чапома 1477251 кВт·ч в год, себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, рассчитанная по формуле (3), равна 18,51 руб./кВт·ч.

При эксплуатации ВДЭС, электропотребление поселения, непокрытое ВЭУ, составит 771852,68 кВт·ч в год (рис. 4). Тогда себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии от ВДЭС составит 10,74 руб./кВт·ч.

Из проведенного расчета видно, что внедрение четырех установок ВЭУ типа Condor Air - 50 кВт с заменой старых дизель-генераторов на новые: (три дизель-генератора 40 кВт и 1 дизель-генератор 100 кВт) является эффективным способом снижения стоимости электроэнергии. Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии снизилась в 1,723 раза, или на 41,98 %.

Капитальные вложения на сооружение ВДЭС, приобретение, доставку и установку оборудования (табл. 1) составят 22,260 млн руб. Положительный эффект от сооружения ВДЭС, определенный по формуле (6), уже в первом году с учетом текущей цены на топливо составил 11,5 млн руб.

Чистый дисконтированный доход составил 949 307,46 руб., индекс доходности равен 1,043 руб., что указывает на эффективность проекта. Внутренняя норма доходности также превышает коэффициент дисконтирования. Рассчитан срок окупаемости проекта (рис. 5).

Недисконтированный срок окупаемости составляет 2 года, дисконтированный - 3 года. Таким образом, доказывается высокая эффективность проекта, в котором инвестиции окупаются уже на третий год эксплуатации ВДЭС. Учитывая, что срок службы основного оборудования ВДЭС составляет 20 лет, проект гарантирует конечную окупаемость инвестиций по истечении срока его реализации.

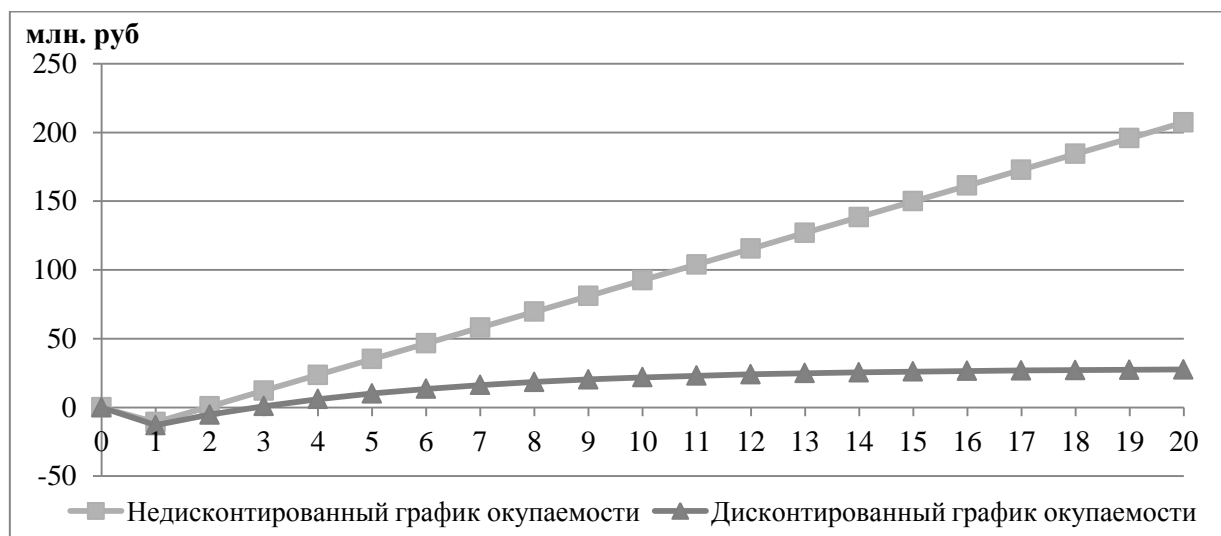


Рис. 5. Недисконтированный и дисконтированный срок окупаемости

Выводы

Произведен технико-экономический анализ применения ВДЭС для электроснабжения энергоудаленных потребителей.

На примере с. Чалома Мурманской области рассмотрен вариант замены существующих ДЭС на ВДЭС, определены основные этапы проектирования ВДЭС и проведены соответствующие расчеты. Для объекта исследования выбрана комбинация источников энергии: ВЭУ Condor Air в количестве четырех штук мощностью 50 кВт каждая, ДЭС Ivesco в количестве трех штук мощностью 40 кВт каждая и одна ДЭС Ivesco мощностью 100 кВт, позволяющая покрывать большую часть потребляемой мощности за счет ВЭУ.

Выполнен сравнительный анализ себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии при существующем варианте электроснабжения (только от ДЭС) и при сооружении ВДЭС. Экономическая оценка показала, что проект эффективен и позволяет снизить количество потребляемого ДЭС топлива на 225 727,49 л в год. Вследствие этого снижается себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии на 42 %.

Библиографический список

1. **Ермоленко, Г.В.** Оптимизация схем децентрализованного энергоснабжения с использованием возобновляемых источников и накопителей энергии / Г.В. Ермоленко, Б.В. Ермоленко, Ю.А.Фетисова // Энергия: экономика, техника, экология. 2013. № 12. С. 11–19.
2. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://russiagreen.ru> (дата обращения: 13.09.2015).
3. **Лукутин, Б.В.** Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2015. – 128 с.
4. Архив погоды в Пялице // Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Пялице (дата обращения: 03.12.2015).
5. **Соснина, Е.Н.** Исследование устойчивости электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями / Е.Н. Соснина [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2015. № 1 (108). С. 203–208.
6. Ветрогенератор Condor Air 380-50 кВт // EDS Group [Электронный ресурс]. URL: <http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-air-20-60kvt/vetrogenerator-condor-air-380-50-kvt.html> (дата обращения: 20.12.2015)

7. Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт) // Бриз Моторс® – дизельные электростанции. Авторизованный дистрибьютор Iveco Motors [Электронный ресурс]. URL: <http://www.brizmotors.ru/equipment/iveco/gef50ma/> (дата обращения: 24.12.2015).
8. Цены на бензин, ДТ, газ в Мурманской области // Цены на бензин и карта АЗС России [Электронный ресурс]. URL: http://www.benzin-price.ru/price.php?region_id=51 (дата обращения: 20.12.2015).

*Дата поступления
в редакцию 15.01.2016*

E.N. Sosnyna, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, T.A. Alexandrova

FEASIBILITY STUDY OF WIND-DIESEL POWER STATIONS FOR ELECTRIC POWER SUPPLY OF ENERGY REMOTE SETTLEMENTS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

Purpose: The article is devoted to the justification of the economic efficiency of combined energy sources on the basis of diesel generator and wind power plants in the design and reconstruction of local power supply systems of energy remote facilities.

Methodology: The main stages of the design of wind-diesel power station and technique of assessing the economic efficiency of its construction are presented. There are three stages of wind-diesel power station design: evaluation of the feasibility of using wind turbines; determining the power of power plants and diesel generator; developing an electric block diagram; selection of electrical equipment.

Results: The economic efficiency replacing the existing diesel power plants in the wind-diesel power station are calculated on the example of energy remote settlements of the Murmansk region. The construction of a combined wind-diesel power station will reduce the generated electricity cost by more than 40% showed the calculation results.

Key words: wind-diesel power station, energy remote consumer, local power supply system, economic efficiency.