

УДК 62:620.9

DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007

Моделирование интегрированной фотоэлектрической системы в условиях развития частной микрогенерации

Мальцев Илья Андреевич¹, Карамов Дмитрий Николаевич^{1,2}

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, *malcev.iluha@yandex.ru*

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск

Аннотация. В статье приведены результаты детального практического изучения законодательной базы Российской Федерации (на текущий момент ее реализации) по вопросу «развития микрогенерации». Выполнено исследование, включающее в себя моделирование системы электроснабжения, построенной на базе частной бытовой фотоэлектрической системы без использования накопителей энергии. Моделирование осуществляется с помощью компьютерной программы, которая учитывает климатические условия Иркутской области. На основе полученных данных даны рекомендации по совершенствованию действующих нормативно-правовых актов законодательства Российской Федерации с последующими предложениями по повышению эффективности стимулирования развития направления «микрогенерация» в России.

Ключевые слова: микрогенерация, возобновляемые источники энергии, зеленый тариф, модель энергетической системы

Цитирование: Мальцев И.А. Моделирование интегрированной фотоэлектрической системы в условиях развития частной микрогенерации / И.А. Мальцев, Д.Н. Карамов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 73-85. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007.

Введение. Ссылаясь на подробное исследование действующей законодательной базы Российской Федерации (РФ), регулирующей деятельность возобновляемой энергетики (ВИЭ) на территории страны, проанализированной в ранее опубликованной статье [1], в данной работе была рассмотрена эффективность применения методов стимуляции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории РФ на основе предыдущего анализа, а также исследования возможных перспектив использования разрабатываемых программ по развитию зеленой энергии [2] и опыта зарубежных стран [3]. Полученные данные являются основой для прогнозирования потенциальных препятствий в достижении намеченных Правительством целей, и позволяют сформулировать рекомендации по повышению эффективности методов стимуляции развития зеленой энергетики в России.

Основопологающим методом анализа данных является сравнение действующих законов и проектов по развитию ВИЭ с аналогами в странах, достигнувших немалого прогресса в указанной отрасли. Согласно приведенным данным [4], страны ЕС сформулировали достаточно высокие значения доли ВИЭ в энергетическом секторе к 2030 году, в 32% от общего производимого объема электроэнергии, и демонстрируют соблюдение плановых показателей наращивания рассматриваемых энергосистем. Правительство России сформулировало показатель в 4,5% к 2024 году [5], однако «зеленая энергетика» страны демонстрирует отставание от запланированных показателей.

Более подробное рассмотрение существующих законов и проектов по стимулированию развития источников возобновляемой энергии демонстрирует тенденцию несвоевременного реагирования законодательными структурами на актуальную ситуацию в энергетическом комплексе страны. Ссылаясь на данные исследования основ регулирования развития ВИЭ [6], обосновывается необходимость создания более развитого регулирования на федеральном, региональном, муниципальном уровнях, в противном случае, возникает тенденция затухания темпа развития ВИЭ вследствие изменения таких факторов, как: актуальная цена

электроэнергии, стоимость производства и итоговая стоимость оборудования, уровень развития сетей по транспортировке и распределению электроэнергии.

Правительство России принимает ряд законодательных мер с целью создания привлекательности налогообложения как для действующих систем генерации возобновляемой энергии, так и для инвестиции в них [6], Ряд постановлений Правительства РФ регулирует основополагающие взаимоотношения на рынке сбыта производимой энергии, а также регламенты выхода на эти рынки новых участников [7-9]. Основополагающим фактором повышения привлекательности систем генерации зеленой электроэнергии является гарантия компенсации затрат на технологическое присоединение генерирующих объектов мощностью не более 25 МВт к централизованным сетям [10].

Также следует упомянуть о действиях Правительства России по регулированию распределенной генерации энергии с использованием ВИЭ [11]. Стремление потребителя снизить расходы, как на электроэнергию, так и на теплоснабжение, обуславливает периодические частичные или полные отказы от использования единой электроэнергетической системы (ЕЭС) в пользу микрогенерации. Согласно [3], основные причины появления отказов от централизованных энергетических систем следующие: безальтернативные системы на базе возобновляемой энергетики в труднодоступных регионах, высокая стоимость передачи электроэнергии в такие регионы, отсутствие высокого уровня развития распределительных систем. Все выше перечисленное вынуждает потребителя искать альтернативы. Руководство страны предпринимает законодательные меры для урегулирования неконтролируемых всплесков развития распределенной энергетики, которые могут причинить ущерб централизованному энергокомплексу, а также энергетической безопасности указанных секторов [12, 13]. Создание сбалансированного и прогнозируемого плана развития распределенной генерации энергии относительно других стран потребовало от Правительства РФ внесения ряда поправок и новых законов [14, 15]. Основная цель указанных мер по регулированию заключается в установлении взаимосвязи централизованной и распределенной генерации энергии, за счет сбыта зеленой энергии в единую сеть на основе договора с четким формулированием взаимоотношений производителей и поставщиков [16].

Тем не менее, вышеуказанные инструменты руководства страны по взаимодействию с ВИЭ оцениваются как недостаточные, отсутствие развитого производства оборудования на территории страны подстегивает рост цен на создание генерирующих систем. Согласно рассматриваемым ранее данным в работах [1, 3], ключевым путем повышения привлекательности систем ВИЭ является снижение необходимых затрат на производство единицы электроэнергии, что в итоге снизит финансовое обременение конечного потребителя. Рассматриваемый анализ ученых-юристов, специализирующихся в ядерной энергетике, показывает, что на территории России итоговая стоимость электроэнергии, производимая ВИЭ, выше, чем стоимость атомной электроэнергии, что подтверждает необходимость доработок как регулирующих законов о генерации возобновляемой энергии, так и методов субсидирования, способных установить паритет стоимости создания систем ВИЭ относительно традиционных энергосистем. Микрогенерация (она же система «зеленого тарифа») требует особого внимания, так как нововведения, связанные с ней, сопровождаются массой неточностей, которые оказывают негативный эффект на развитие ВИЭ.

Основная задача данной статьи – это обоснование необходимых изменений в законодательной базе с целью дальнейшего улучшения показателей развития распределенной генерации с использованием модели энергосистемы ВИЭ, взаимодействующей с «зелёным тарифом».

1. Модель для проверки функционирования правового поля «зеленого тарифа».

Как было сказано выше, для создания стабильного уровня привлекательности процесса

внедрения распределенной генерации в централизованную сеть необходимо создание правового позитивного взаимодействия государства и граждан по вопросам развития системы «зеленого тарифа». Таким образом, необходимы изменения в законодательной базе для дальнейшего совершенствования данной системы на территории Российской Федерации. В статье рассматривается приближенная к реальным условиям виртуальная модель системы производства электроэнергии с установленной мощностью в диапазоне 5-25 кВт, построенная на возобновляемом энергетическом комплексе, подтверждающая необходимость совершенствования законодательного поля Российской Федерации в плане повышения привлекательности «микروгенерации». Нахождение оптимальной ставки «зеленого тарифа» на указанные мощности позволит найти наиболее рациональное решение по капитальным вложениям в построение системы и сроку окупаемости проекта. Ниже приведены начальные условия функционирования системы, а также описание работы с последующими результатами и выводами.

2. Исходные данные модели. Модель подразумевает построение системы на базе фотоэлектрической генерации (в диапазоне 5-25 кВт). Ее отличительными чертами являются: распространённость и доступность для приобретения, адаптация практически к любым условиям и относительно небольшие цены в сравнении с другими системами ВИЭ (к примеру, в сравнении с системой, построенной на ветроэнергетических установках одинаковой установленной мощности, где цена будет ощутимо выше). Следует учесть и тот факт, что срок службы солнечных батарей в среднем составляет 25 лет (что также превышает срок службы систем ветроэнергетических установок (ВЭУ)). Предоставленная в данной программе фотоэлектрическая система (ФЭС) функционирует без учета накопления генерируемой энергии (аккумуляторные батареи не используются в технологической цепи). Поскольку цель данной модели заключается в проверке законодательной базы, регулирующей основы микрогенерации, подразумевается, что система будет подключаться напрямую к централизованной сети (к линиям поставщика электроэнергии). Максимальный период окупаемости разных вариантов мощности ФЭС не будет превышать 25 лет. Данный срок обусловлен сроком службы основных фондов (фотоэлектрических панелей).

Система построена на базе частного домовладения. За основу расчета взят одноэтажный коттедж площадью в 100 м² с двухскатной плоской крышей с целью достижения максимального количества фотоэлектрических панелей и их комфортной настройки. Помимо этого, подразумевается специально выделенная перед домом территория для размещения дополнительных фотоэлектрических панелей с целью предотвращения возможной нехватки энергии, производимой фотоэлектрическими панелями, расположенными на крыше. В качестве геолокации применения модели выбрана Иркутская область с учетом всех климатических условий, которые необходимо учесть при эксплуатации ФЭС в указанном регионе. Помимо этого, взята типовая почасовая годовая электрическая нагрузка для данного дома в указанном регионе.

В качестве основного оборудования для построения системы использованы фотоэлектрические панели монокристаллического типа мощностью 330 Вт, паспортные данные взяты согласно данным официального сайта производителя [17], а также инверторы сетевого типа [18], 2 варианта однофазных инверторов мощностью: 5 и 6 кВт и 5 экземпляров трехфазных инверторов мощностью: 5, 10, 15, 20, 25, 30 кВт соответственно. Данные типы панелей и инверторов являются оптимальными решениями по соотношению цена/качество. Поскольку моделируемая система находится в Иркутской области, то и ценообразование оборудования взято у официального поставщика продукции [19] с актуальными ценами в данном регионе. Для остального вспомогательного оборудования для функционирования системы (кабеля, коммутационное оборудование и т.д.), а также монтажа и доставки, было принято решение,

для удобства расчетов капиталовложений, взять все вышеописанное оборудование за 30% от итоговой стоимости суммы основных фондов (фотоэлектрических панелей и инверторов).

3. Принцип работы модели. Модель имитирует ФЭС частного дома на протяжении одного года эксплуатации с разной установленной мощностью 5 до 25 кВт с шагом 1 кВт, которая учитывает покрытие собственной нагрузки дома и генерации в общую сеть излишков энергии и потребления энергии из сети. Во внимание взят фактор законодательной части в вопросе о максимальной допустимой установленной мощности. Она не должна превышать 15 кВт, однако для того, чтобы дать наилучшую рекомендательную характеристику для законодательной базы и найти оптимальную ставку «зеленого тарифа» на электроэнергию с точки зрения окупаемости, диапазон увеличен до 25 кВт.

Программа состоит из четырех основных блоков:

1. Рассчитывает рабочие характеристики для функционирования ФЭС.
2. Выполняет экономические расчеты по оборудованию ФЭС (стоимости, издержки).
3. Рассчитывает чистую приведенную стоимость состава оборудования и период окупаемости системы.
4. Вычисляет, на основании результатов предыдущих блоков, а также геолокационных данных, годовой электрической нагрузки домовладения и разных тарифов на электроэнергию, необходимую зависимость между сроком окупаемости систем и ставкой «зеленого тарифа».

На рис.1 приведена блок схема работы описываемой программы.

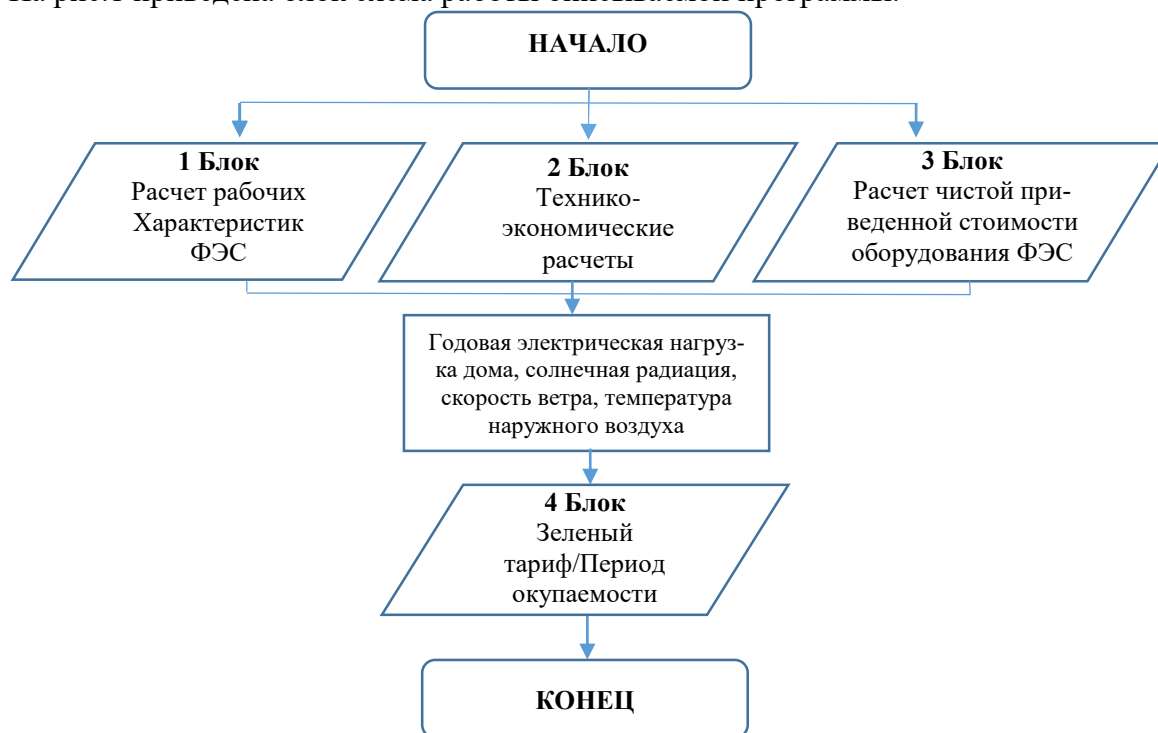


Рис. 1. Блок схема модели работы ФЭС

Комментарий к рис. 1. Каждый блок включает в себя определенное количество расчетных формул, таблиц с данными (массивов) и условий для выполнения тех или иных команд.

Рассмотрим работу блоков подробнее.

Первый блок вычисляет все характеристики, связанные с работой фотоэлектрических панелей и инверторов, а именно: необходимое количество солнечных панелей и инверторов в электростанции, установленную мощность сетевых инверторов и их капиталовложения, генерируемую мощность системы с учетом необходимого оборудования, а также с учетом проявляющихся потерь, максимальную генерацию ФЭС. Также следует учесть и температу-

ру солнечных панелей с учетом скорости ветра и КПД солнечной панели с учетом изменения рабочей температуры. Данный блок является особенно важным в данной модели, поскольку такие характеристики, как генерируемая мощность, выходной ток и напряжение, температура солнечных панелей и КПД, являются основополагающими. Без них дальнейшие расчеты в рамках модели невозможны. Данные выражения применяются в работе [20]:

$$P_{pv}(t) = I_A(t) \cdot \eta(t) \cdot A \cdot k_L, \quad (1)$$

где $I_A(t)$ – солнечная радиация, приходящая на наклонную поверхность фотоэлектрической панели, Вт/м²; A – установленная площадь фотоэлектрических модулей м²; k_L – коэффициент, учитывающий потери в диодах и из-за загрязнения и принимается равным 0,85-0,95 о.е.

Эффективность фотоэлектрического преобразователя пересчитывается в зависимости от уровня солнечной радиации (используются годовые показатели по Иркутской области имеются), температуры наружного воздуха, рабочей температуры солнечной панели и скорости ветра. Вычисление выполняется по формуле (2) (о.е).

$$\eta(t) = \bar{\eta} \cdot [1 - \beta \cdot (T_{PV}(t) - 48)], \quad (2)$$

где вычисление рабочей температуры фотоэлектрического преобразователя имеет следующий вид:

$$T_{PV}(t) = T_a(t) + \frac{\bar{I}_A(t)}{k_0 + k_1 \cdot V_w(t)}, \quad (3)$$

где $\bar{\eta}$ – паспортное значение КПД фотоэлектрического преобразователя, о.е.; $T_a(t)$ – температура наружного воздуха, °С; β – температурный коэффициент для кремниевых фотоэлектрических преобразователей (0,004-0,006), о.е./°С; k_0, k_1 – корреляционные коэффициенты Koehl (30,02 и 6,28) [20]; $V_w(t)$ – скорость ветра на поверхности Земли, м/с.

На следующем этапе рассчитывается фототок, (А).

$$I_{PH}(t) = \frac{\bar{I}_A(t)}{1000} \cdot [I_{SC} + k_1 \cdot (T_{PV}(t) - 25)], \quad (4)$$

где температурный коэффициент для тока принимается равным 0,0038 о.е./°С.

Наконец, определяется выходное напряжение (В).

$$U_{PV}(t) = P_{PV}(t) / I_{PH}(t). \quad (5)$$

Данные выражения необходимы для определения основных параметров ФЭС.

Второй блок на основании данных, полученных от первого блока, ведет технико-экономические расчёты, определяя стоимости всех солнечных панелей и сетевых инверторов ФЭС. Помимо этого, учитываются ежегодные издержки на обслуживание оборудования и суммарные капиталовложения в оборудование с учетом доставки и установки на объекте для каждой из приведённых мощностей.

Третий блок рассчитывает чистую приведенную стоимость (NPV) оборудования ФЭС на основании результатов расчетов двух предыдущих блоков, основываясь на показателях суммарных капитальных вложений в систему. NPV позволяет оценить ФЭС с точки зрения инвестиций, другими словами, показывает, стоит ли инвестировать средства для реализации генерирующей электросистемы дома. Также с использованием полученных данных NPV третий блок рассчитывает период окупаемости всей ФЭС, основываясь на разных ставках тарифа на электроэнергию.

Четвертый блок запускает предыдущие 3 блока системы, взяв за основу расчета массивы данных по годовой температуре наружного воздуха и скорости ветра на рассматриваемой территории в регионе, а также учитывая годовые замеры солнечной радиации. На основании годовой нагрузки потребителя (домовладения) блок выполняет расчеты различных вариантов ставок тарифа на электроэнергию в диапазоне 6-13 руб. за кВт/ч, тем самым демон-

стрируя результат взаимодействия изменяемых ставок тарифа различных сроков окупаемости при изменяемой установленной мощности системы ФЭС в диапазоне 5-25 кВт (рис. 2) при которых обосновывается целесообразность использования той или иной ставки «зеленого тарифа» для установленных мощностей ФЭС. Помимо этого, модель, на основании формул из первого блока, определяет суммарные капиталовложения для установки системы, годовую генерацию и перетоки электрической энергии из ФЭС в централизованную сеть и наоборот, по всем представленным вариантам мощности.

4. Результаты исследования. Как уже упоминалось в предыдущем разделе, основная задача расчетов по модели – находить оптимальную ставку тарифа на электричество для продажи в централизованную сеть по системе «зеленого тарифа», отталкиваясь от срока окупаемости. На рис. 2 приведены графики сроков окупаемости системы мощностей в диапазоне от 5 до 25 кВт с шагом 0,5-1 рубль за киловатт-часы, при разных ставках тарифа:

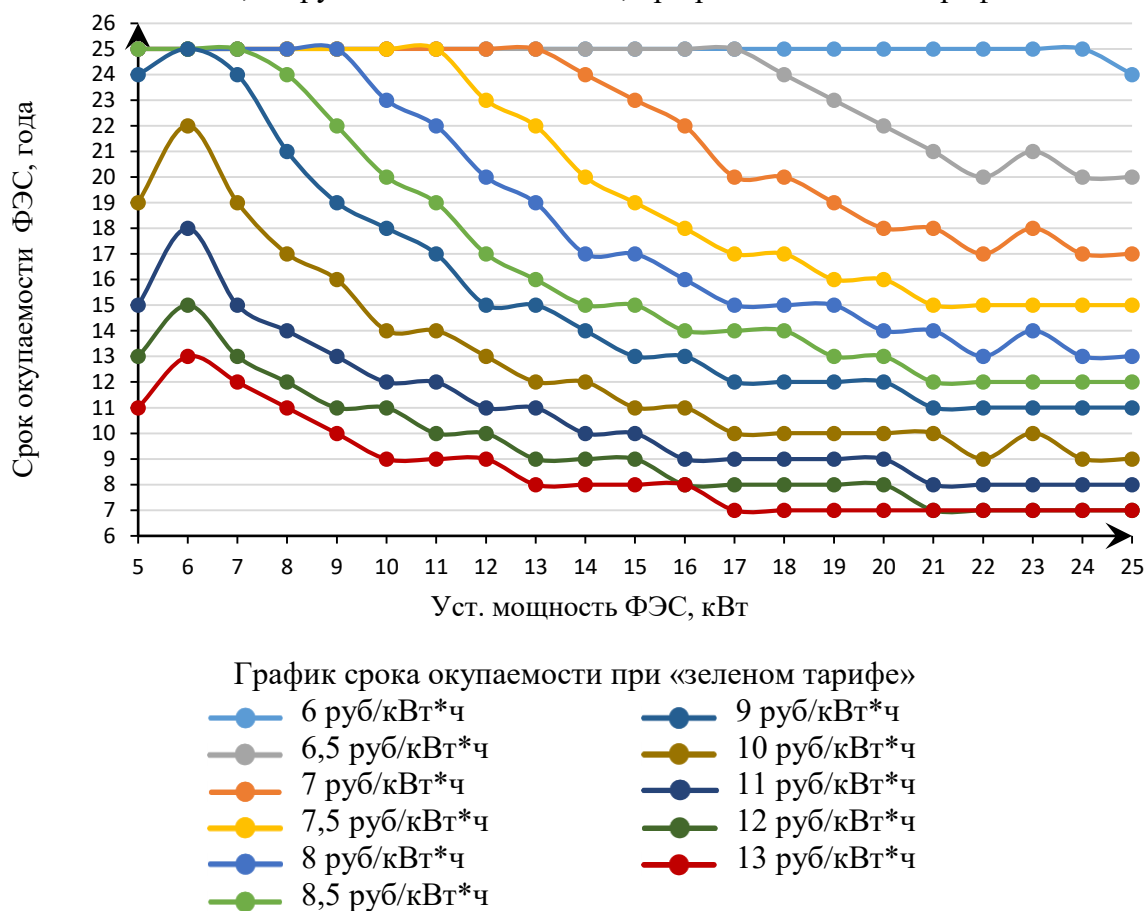


Рис. 2. График изменения срока окупаемости от величины «зеленого тарифа» и установленной мощности ФЭС

Комментарий к рис. 2. Как видно из рисунка, при тарифе в 6 рублей/кВт·ч минимального срока окупаемости можно достичь только при установленной мощности ФЭС в 25 кВт. По этой причине нет целесообразности анализировать ставки ниже описанного тарифа. Не следует превышать данный показатель и выше 13 рублей/кВт·ч, поскольку, хотя последующее увеличение ставки будет снижать срок окупаемости системы, тарифная ставка будет постоянно расти, превышая все мыслимые пороги с экономической точки зрения, например, согласно данным [21] в Чукотском автономном округе тариф на электроэнергию (наивысший по РФ) составляет 8,42 рублей/кВт·ч, что почти на 4,5 рубля меньше предложенного варианта. Так же по полученным данным можно сделать вывод, что при увеличении установленной

мощности станции срок окупаемости падает, так как увеличение генерации ФЭС позволяет покрывать собственную нагрузку (домовладения) и передавать излишки генерируемой электроэнергии в общую сеть.

Основываясь на законодательной базе по «зеленому тарифу», интересующий диапазон мощностей варьируется от 5 до 15 кВт. Например, для того, чтобы положить начало окупаемости системы в 5 кВт при наилучшем выборе оборудования, необходимо, чтобы в централизованную сеть электроэнергия продавалась по тарифу не менее 9 рублей за кВт/час. Тариф при системе в 10 кВт должен составлять не меньше 8 рублей за кВт/ч, а при установленном максимуме в 15 кВт мощности ФЭС данный показатель должен быть равен 7 рублям за кВт/ч.

Кроме этого, стоит упомянуть результаты технико-экономических расчетов и показатели потребления и генерации ФЭС. Если рассматривать мощность системы в правовом диапазоне (5-15 кВт), то суммарные капиталовложения в систему будут составлять 422-1173 тыс. руб. с учетом доставки и установки; ежегодные издержки на обслуживание ФЭС будут составлять 6-18 тыс. руб., при этом рабочие характеристики ФЭС в данном диапазоне при потреблении и генерации электроэнергии следующие: годовая генерация всей ФЭС составляет 9,54-23,65 тыс. кВт·ч, из которых на собственное покрытие годовой нагрузки уходит 5,04 - 7,00 тыс. кВт·ч, а переток энергии из частной системы в централизованную систему составляет 4,50-16,65 тыс. кВт·ч. Потребляемая же энергия из централизованной системы на собственные нужды в момент, когда не хватает генерации частной ФЭС, равна 14,70-12,74 тыс. кВт·ч соответственно.

Относительно установленных мощностей ФЭС свыше 15 кВт, которые не подлежат развитию с точки зрения «зеленого тарифа» в диапазоне 16-25 кВт, получены следующие характеристики: суммарные капиталовложения 1235-1867 тыс. руб., издержки на обслуживание 19-30 тыс. руб. Годовая генерация всей ФЭС – 24,98-37,94 тыс. кВт·ч, годовой переток энергии из ФЭС в общую систему 17,90-30,36 тыс. кВт·ч, потребление собственной генерируемой энергии 7,08-7,58 тыс. кВт·ч, потребляемая электрическая энергия из централизованной системы будет составлять 12,16-12,66 тыс. кВт·ч.

В целом, анализируя полученные графики, экономические и рабочие расчеты, наблюдаем практически линейную зависимость от рассматриваемых характеристик (не считая срока окупаемости в ряде рассматриваемых в модели систем установленной мощностью 6 кВт. Это связано с несколько завышенной ценой инвертора на 6 кВт, согласно [18], при увеличении установленной мощности ФЭС значительно растут показатели по генерируемой мощности и падают значения потребления электроэнергии в/из централизованной сети. Также растут капиталовложения и издержки ФЭС, тем не менее, если рассматривать соотношение генерации и капиталовложений, варианты систем с большей мощностью более привлекательны в реализации.

На основании полученных рабочих характеристик системы, а именно, данных по потребляемой мощности из централизованной системы и потребляемой генерируемой энергии ФЭС на собственные нужды дома, построен график (рис. 3), иллюстрирующий точку баланса системы.

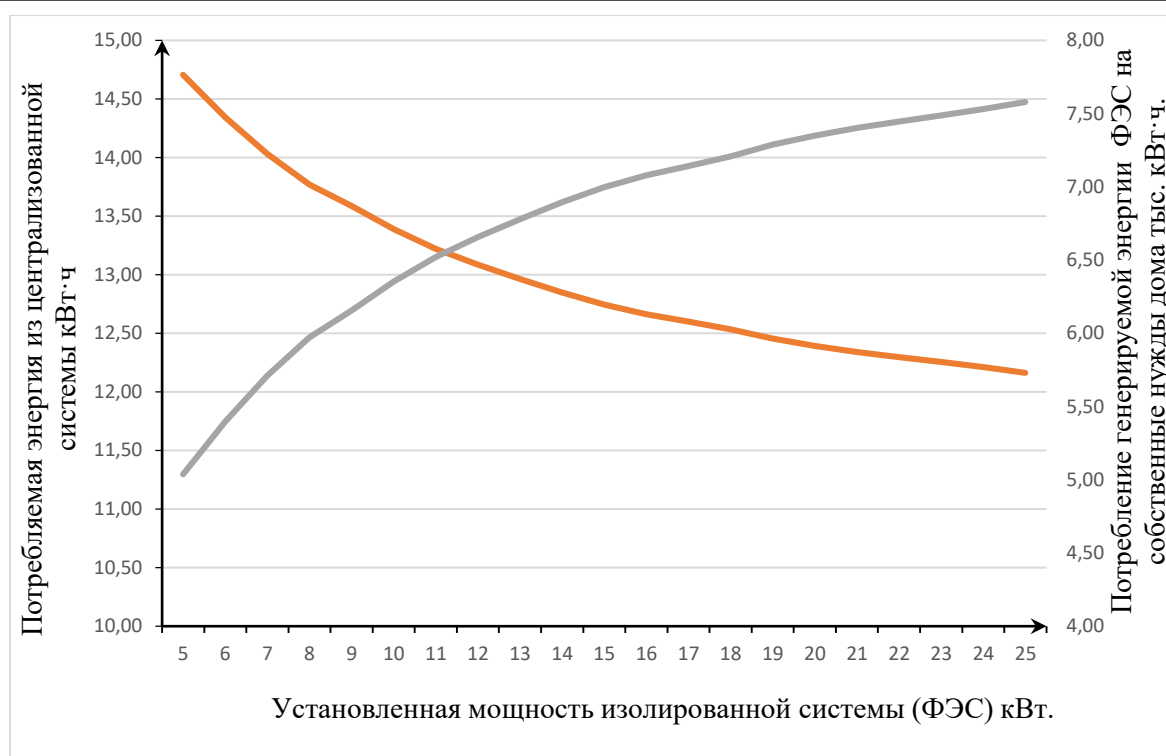


Рис. 3. График зависимости энергии, потребляемой домом из централизованной системы, и собственной генерируемой энергии от установленной мощности ФЭС

Комментарий к рис. 3. Данный рисунок иллюстрирует точку баланса перетоков электрической энергии между ФЭС и общей сетью поставщика электроэнергии. Она позволяет найти оптимальную мощность системы с точки зрения капиталовложений и окупаемости в рассматриваемом регионе. Согласно полученным данным, она равна $11,75 \text{ кВт} \approx 12 \text{ кВт}$.

Заключение. Таким образом, с использованием модели, приближенной к реальным условиям эксплуатации, имитирующей работу, на территории Иркутской области с учетом климатических особенностей, системы электроснабжения, построенной на базе фотоэлектрической системы частного домовладения, были получены данные, описывающие всевозможные варианты поведения установки на базе ВИЭ в рамках требуемых затрат, возможных выгод и других условий. С 2017 г. со стороны Правительства РФ делаются первые шаги, касающиеся поддержки возобновляемого энергетического комплекса. В частности, с 2019 г. появились первые действия, направленные на поддержку развития микрогенерации. Однако, давая оценку на основе проведенной работы, можно сделать вывод, что текущих мер по развитию системы «зеленого тарифа» на территории РФ недостаточно. Акцентируя внимание на реалиях Иркутской области, в частности, низкого тарифа на электроэнергию ($0,819 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ согласно данным [21]) и учитывая, что сбыт электроэнергии, производимой ФЭС, в общие сети осуществляется в рамках «зеленого тарифа», по средневзвешенной цене, то соответственно, тариф на электроэнергию, при которой участник сможет продавать электроэнергию в централизованную сеть, будет в значительной мере ниже вышеупомянутого тарифа. Это создает для участника программы высокий порог требуемых вложений, а также иррациональный срок окупаемости для создания подобной системы. Таким образом, реализация текущих планов по стимулированию развитию ВИЭ невозможна в Иркутской области, а также малоперспективна в других регионах России.

Для решения описанных выше проблем рекомендуется рассмотреть ряд мер по улучшению условий реализации проектов и повышению доходности в целом, ранее упомянутых в [1]:

1. Предоставить участникам программы «микрогенерации» некоторую компенсацию затрат или предоставить субсидии на приобретение и установку генерирующих систем, поскольку описанная выше модель позволяет оценить влияние на рентабельность изменений ценообразующих составляющих ФЭС.
2. Предоставить возможность приобретения оборудования по специальной льготной цене или кредитной программе, а также отсрочку от первых платежей на длительный срок по данному кредиту.
3. Установить гарантированный (фиксированный) тариф, который обеспечит привлекательность работы с ВИЭ как для собственника генерирующей системы, так и для энергосбытовых компаний (централизованных сетей).
4. Создать специальный льготный тариф, который позволит владельцам объектов микрогенерации покупать электроэнергию в централизованных сетях по привлекательной цене.
5. Используя опыт других стран по стимулированию развития ВИЭ с помощью системы стандарта портфеля возобновляемых источников энергии [2], обязать энергосбытовые компании приобретать сертификаты на электроэнергию, произведенную ВИЭ, тем самым создавая дополнительный спрос на зеленую энергию и повышая рентабельность проектов ВИЭ в целом.
6. Повысить лимит на максимальную мощность системы, которая бы проходила в рамках правового поля; данная мера положительно скажется на скорости окупаемости проекта.

ВИЭ становятся одним из основных инструментов по генерации электроэнергии и борьбе с ухудшением климатической обстановки в мире. Кроме этого, возобновляемая энергетика зарекомендовала себя как эффективный метод снижения нагрузки на традиционный сектор производства энергии. Опыт зарубежных стран по стимулированию развития возобновляемой энергетике от лица государственных структур показывает, что поддержка возобновляемого энергетического сектора является одним из самых приоритетных направлений в сфере электроэнергетики.

Представляется, что основным принципом регулирования развития ВИЭ на территории России является своевременное принятие новых мер, которые позволят взаимодействовать с возобновляемым энергетическим сектором, исходя из актуальных событий в стране. Применение выше упомянутой модели уже позволяет оценить важность применяемых нововведений. Даже такие меры, как повышение ставки на электроэнергию, позволяют увеличить рентабельность проектов и повысить участие в их развитии. При отсутствии постоянных нововведений в регулирующие инструменты законодательной базы темп развития ВИЭ будет демонстрировать отставание и стагнацию от запланированных Правительством показателей.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Карамов Д.Н. Анализ мирового опыта стимулирования развития возобновляемой энергетике и возможностей его применения в России / Д.Н. Карамов, И.А. Мальцев, П.В. Илюшин, К.В. Суслов, В.В. Скутельник, Е.П. Емельянова // Энергетик, 2022. – № 9. – С. 39-49. – DOI: 10.34831/EP.2022.14.92.009
2. Karamov D.N., Maltsev I.A., Tsyrendorzhiyev B.B. Analysis of world practices for stimulating the development of renewable energy sources. A case study for Russian conditions. E3S Web of Conferences, 2021, vol. 289, 01017, DOI: 10.1051/e3sconf/202128901017.
3. Символоков О.А. Договоры в электроэнергетике: проблемы теории и практики: монография / О.А. Символоков. – Москва: Инфотропик Медиа, 2021. – С. 143-168. – ISBN 978-5-9998-0361-0.

4. Директива 2018/2001 Европейского парламента и Совета от 11.12.2018 о содействии использованию энергии из возобновляемых источников // EU: Journal of the European Union. L 328/82 N. – URL: EUR-Lex - 32018L2001 - EN - EUR-Lex (eur-lex.europa.eu) (дата обращения: 19.10.2022).
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 г. N 1-п «Об основных направлениях государственной политики в области повышения энергоэффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии». на период до 2035 года». – URL: <http://government.ru/docs/all/66930/> (дата обращения: 20.10.2022).
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 17 июня 2015 г. № 600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, относящихся к объектам и технологиям высокой энергоэффективности». – URL: <http://government.ru/docs/all/102323/> (дата обращения: 26.10.2022).
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности». – URL: <http://government.ru/docs/all/76726/> (дата обращения: 26.10.2022).
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2013 г. № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» (вместе с «Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии»). – URL: <http://government.ru/docs/all/87499/> (дата обращения: 26.10.2022).
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 10 ноября 2015 г. № 1210 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». – URL: <http://government.ru/docs/all/104143/> (дата обращения: 26.10.2022).
10. Приказ Минэнерго России от 22 июля 2013 г. № 380 «Об утверждении правил предоставления из федерального бюджета субсидий в порядке компенсации стоимости технологического присоединения генерирующих объектов с установленной генерирующей мощностью не более 25 мвт, признанных квалифицированными объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, юридическим лицам, которым такие объекты принадлежат на праве собственности или на ином законном основании» – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70400104/> (дата обращения: 26.10.2022).
11. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации». – URL: <http://government.ru/docs/all/121866/> (дата обращения: 11.10.2022).
12. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-п «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года». – URL: <http://government.ru/docs/all/120647/> (дата обращения: 11.10.2022).
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. N 2101-п «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.»). – URL: <http://government.ru/docs/all/118785/> (дата обращения: 11.10.2022).
14. Федеральный закон Российской Федерации от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении». – URL: <http://government.ru/docs/all/99596/> (дата обращения: 11.10.2022).
15. Федеральный закон Российской Федерации от 27 декабря 2019 г. № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации». – URL: <http://government.ru/docs/all/125447/> (дата обращения: 11.10.2022).
16. Приказ Минпромторга России от 22 февраля 2011 г. № 206 «Об утверждении Стратегии развития энергомашиностроения Российской Федерации на 2010 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года». – URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-22.02.2011-N-206/> (дата обращения: 11.10.2022).
17. Официальный сайт производителя солнечных батарей «SILA». – URL: <https://sila-solarpanel.ru/mono-panels> (дата обращения: 15.10.2022).
18. Официальный сайт производителя Инверторов для фотоэлектрических систем «SofarSolar». – URL: <https://www.sofarsolar.com> (дата обращения: 15.10.2022).
19. Официальный поставщик оборудования для фотоэлектрических систем в Иркутской области «Технолайн». – URL: <https://e-solarpower.ru> (дата обращения: 15.10.2022).

20. Карамов Д.Н. Моделирование солнечной электростанции с учётом изменения параметров окружающей среды / Д.Н. Карамов, И.В. Наумов // Электрические станции, 2020. – № 6 (1067). – С. 21-28, – DOI: 10.34831/EP.2020.1067.6.004.
21. Тарифы на электроэнергию в разных регионах РФ. – URL: <https://energo-24.ru/tariffs/electro.html> (дата обращения: 15.10.2022).

Карамов Дмитрий Николаевич. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.kararov@mail.ru, 664033, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

Мальцев Илья Андреевич. Аспирант, инженер-исследователь Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, SPIN: 6134-2190, malcev.iluha@yandex.ru, 664033, Иркутская обл., г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

UDC 62:620.9

DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007

Modelling of an integrated photovoltaic system in the conditions of development of private microgeneration

Ilia A. Maltsev¹, Dmitriy N. Karamov^{1,2}

¹Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, malcev.iluha@yandex.ru

²Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The article presents the results of a detailed practical study of the legislative framework of the Russian Federation (at the current moment of its implementation) on the issue of “development of microgeneration”. A study has been carried out, including the modeling of a power supply system built on the basis of a private household photovoltaic system without the use of energy storage devices. Modeling is carried out using a computer program that takes into account the climatic conditions of the Irkutsk region. Based on the data obtained, recommendations are given for improving the current regulatory legal acts of the legislation of the Russian Federation with subsequent proposals for increasing the effectiveness of stimulating the development of the “microgeneration” direction in Russia.

Keywords: microgeneration, renewable energy sources, feed in tariff, photovoltaic system, energy system model

Acknowledgments: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.СКР.21.0038).

References

1. Karamov D.N., Maltsev I.A., Piyshin P.V., Suslov K.V., Skutelnik V.V., Emelyanova E.P. Analiz mirovogo opyta stimulirovaniya razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki i vozmozhnostey yego primeneniya v Rossii [World experience analysis in stimulation of renewable energy development and the possibilities of its application in Russia]. *Energetik*, 2022, no. 9, pp. 39-49, DOI: 10.34831/EP.2022.14.92.009 (in Russian).
2. Karamov D.N., Maltsev I.A., Tsyrendorzhiev B.B. Analysis of world practices for stimulating the development of renewable energy sources. A case study for Russian conditions. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 289, 01017, DOI: 10.1051/e3sconf/202128901017.
3. Simvolokov O.A. Dogovori v elektroenergetike: problemi teorii i praktiki_ monografiya [Contracts in the electric power industry: problems of theory and practice]. Infotropik Media, 2021, pp. 143-168, ISBN 978-5-9998-0361-0 (in Russian).
4. Directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 12/11/2018 on promoting the use of energy from renewable sources. EU: Journal of the European Union. L 328/82 N. – URL: EUR-Lex - 32018L2001 - EN - EUR-Lex (europa.eu) (accessed: 10/19/2022).

5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 08.01.2009 N 1-r "Ob osnovnih napravleniyah gosudarstvennoi politiki v oblasti povisheniya energoeffektivnosti elektroenergetiki na osnove ispolzovaniya vozobnovlyаемih istochnikov energii" na period do 2035 goda" [Order of the Government of the Russian Federation of January 8, 2009 No. 1-r "On the main directions of state policy in the field of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources" for the period up to 2035"], available at: <http://government.ru/docs/all/66930/> (accessed: 10/20/2022) (in Russian).
6. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.06.2015 no. 600 "Ob utverzhdenii perechnya ob"ektov i tekhnologij, odnosyashchih'sya k ob"ektam i tekhnologiyam vysokoj energoeffektivnosti" [Resolution of the Government of the Russian Federation of June 17, 2015 no. 600 "On approval of the list of facilities and technologies related to high energy efficiency facilities and technologies"], available at: <http://government.ru/docs/all/102323/> (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
7. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.12.2010 no. 1172 "Ob utverzhdenii Pravil optovogo rynka jelektricheskoy jenerгии i moshhnosti i o vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federacii po voprosam organizacii funkcionirovaniya optovogo rynka jelektricheskoy jenerгии i moshhnosti" [Resolution of the Government of the Russian Federation of December 27, 2010 no. 1172 "on approval of the rules of the wholesale market of electric energy and capacity and on amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the organization of the functioning of the wholesale market of electric energy and capacity"], available at: <http://government.ru/docs/all/76726/> (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
8. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 28.05.2013 no. 449 "O mehanizme stimulirovaniya ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov jenerгии na optovom rynke jelektricheskoy jenerгии i moshhnosti" [Resolution of the Government of the Russian Federation of May 28, 2013 no. 449 "On the mechanism for stimulating the use of renewable energy sources in the wholesale electricity and capacity market"], available at: <http://government.ru/docs/all/87499/> (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
9. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 10.11. 2015 no. 1210 "O vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federacii po voprosam ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov jenerгии na optovom rynke jelektricheskoy jenerгии i moshhnosti" [Resolution of the Government of the Russian Federation of November 10, 2015 no. 1210 "On amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the use of renewable energy sources in the wholesale electricity and capacity market"], available at: <http://government.ru/docs/all/104143/> (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
10. Prikaz Minjenergo Rossii ot 22.07.2013 no. 380 "Ob utverzhdenii pravil predostavleniya iz federal'nogo bjudzhet subsidij v porjadke kompensacii stoimosti tekhnologicheskogo prisoedineniya generirujushhiih ob"ektov s ustanovlennoj generirujushhej moshhnost'ju ne bolee 25 mvt, priznannyh kvalificirovannymi ob"ektami, funkcionirujushhimi na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov jenerгии, juridicheskim licam, kotorym takie ob"ekty prinadlezhat na prave sobstvennosti ili na inom zakonnom osnovanii" [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of July 22, 2013 no. 380 "On approval of the rules for granting subsidies from the federal budget in order to compensate for the cost of technological connection of generating facilities with an installed generating capacity of no more than 25 MW, recognized as qualified facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources, to legal entities to which such facilities belong by right of ownership or on another legal basis], available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70400104/> (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
11. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 13.05.2019 no. 216 "Ob utverzhdenii Doktriny jenergeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii" [Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2019 no. 216 "On approval of the energy security doctrine of the Russian Federation"], available at: <http://government.ru/docs/all/121866/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
12. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 13.02.2019 no. 207-r "Ob utverzhdenii Strategii prostanstvennogo razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2025 goda" [Order of the Government of the Russian Federation of February 13, 2019 no. 207-r "On approval of the spatial development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025], available at: <http://government.ru/docs/all/120647/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
13. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 30.09.2018 no. 2101-r "Ob utverzhdenii kompleksnogo plana modernizacii i rasshirenija magistral'noj infrastruktury na period do 2024" [Order of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018 no. 2101-r "On approval of a comprehensive plan for modernization and expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024"], available at: <http://government.ru/docs/all/118785/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
14. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 27.07.2010 no. 190-FZ "O teplosnabzhenii" [Federal Law of the Russian Federation of July 27, 2010 no. 190-FZ "On heat supply"], available at: <http://government.ru/docs/all/99596/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).

15. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 27.12. 2019 no. 471-FZ "O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon «Ob jelektroenergetike» v chasti razvitija mikrogeneracii" [Federal Law of the Russian Federation of December 27, 2019 no. 471-FZ "On amendments to the Federal Law "On electric power industry" regarding the development of microgeneration"], available at: <http://government.ru/docs/all/125447/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
16. Prikaz Minpromtorga Rossii ot 22.02.2011 no. 206 "Ob utverzhdenii Strategii razvitija jenergomashinostroenija Rossijskoj Federacii na 2010 - 2020 gody i na perspektivu do 2030 goda" [Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation of February 22, 2011 no. 206 "On approval of the Strategy for the development of power engineering of the Russian Federation for 2010-2020 and for the future until 2030"], available at: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-22.02.2011-N-206/> (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
17. Official site of "SILA" company, available at: <https://sila-solarpanel.ru/mono-panels> (accessed: 10/15/2022) (in Russian).
18. Official site of "SofarSolar" company, available at: <https://www.sofarsolar.com> (accessed: 10/15/2022)
19. Official site of "TechnoLine" company, available at: <https://e-solarpower.ru> (accessed: 10/15/2022) (in Russian).
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modelirovanie solnechnoj elektrostancii s uchyotom izmeneniya parametrov okruzhayushchej sredy [Modelling of a photovoltaic system in the context of varying weather conditions]. Elektricheskiye stantsii [Electrical stations], 2020, no. 6 (1067), pp. 21-28, DOI: 10.34831/EP.2020.1067.6.004 (in Russian).
21. Tarify na elektroenergiyu v raznyh regionah RF [Tariffs for electricity in different regions of the Russian Federation], available at: <https://energo-24.ru/tariffs/electro.html> (accessed: 10/15/2022) (in Russian).

Karamov Dmitriy Nikolaevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov, 130, Russia.

Maltsev Ilya Andreevich. Postgraduate student and research engineer at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, SPIN: 6134-2190, malcev.iluha@yandex.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov, 130, Russia.

Статья поступила в редакцию 13.12.2022; одобрена после рецензирования 14.03.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 12/13/2022; approved after reviewing 03/14/2023; accepted for publication 03/20/2023.