

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Применение альтернативных источников энергии для электроснабжения
коттеджного поселка

Обучающийся

О.А. Романова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, А.Н. Черненко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Проблема надёжности электроснабжения и возможные пути её решения.....	6
1.1 Проблема надёжности электроснабжения.....	6
1.2 Возобновляемые источники энергии.....	12
1.2.1 Ветровая энергия.....	13
1.2.2 Геотермальная энергия.....	14
1.2.3 Солнечная энергия.....	15
1.2.4 Энергия биомассы.....	15
1.2.5 Основные преимущества и недостатки возобновляемых источников энергии.....	16
1.3 Ветроэнергетическая установка.....	19
1.4 Фотоэлектрические системы.....	23
1.5 Гибридная ветросолнечная электроустановка.....	27
2 Электроснабжение коттеджа с использованием электроустановок, работающих на альтернативных источниках энергии.....	31
2.1 Характеристика посёлка.....	31
2.2 Электроснабжение посёлка.....	33
2.3 Объект исследования.....	36
2.4 Питание от фотоэлектрической системы.....	42
2.4.1 Определение нагрузки и потребляемой энергии.....	43
2.4.2 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества.....	46
2.4.3 Определение необходимого количества фотоэлектрических модулей.....	53
2.4.4 Выбор инвертора.....	55
2.4.5 Выбор зарядного устройства (контроллера).....	59
2.4.6 Питание части нагрузки от фотоэлектрической системы.....	60

2.5 Питание от ветроэнергетической электроустановки.....	64
2.5.1 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества.....	65
2.5.2 Определение требуемой номинальной мощности ветроэнергетической электроустановки.....	67
2.6 Питание от гибридной ветросолнечной электроустановки.....	70
2.6.1 Выбор солнечных батарей.....	71
2.6.2 Выбор ветрогенератора.....	72
2.6.3 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей.....	74
3 Оценка полученных результатов.....	76
3.1 Электроснабжение коттеджа с использованием фотоэлектрической системы.....	76
3.2 Электроснабжение коттеджа с использованием гибридной ветросолнечной электроустановки.....	78
Заключение.....	80
Список используемой литературы и используемых источников.....	82

Введение

Настоящая диссертация посвящена проблеме надёжности электроснабжения бытовых потребителей. Проблема стояла остро во все времена и по сей день не потеряла своей актуальности. Надёжность является одной из важнейших характеристик системы электроснабжения, во многом определяющей возможность её практического использования. В сельской местности вопрос надёжности стоит особенно остро, так как имеют место частые перебои в электроснабжении жилых домов, вызванные не только авариями, но и плановыми работами. Согласно ПУЭ к электроприемникам первой категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения. Во вторую категорию входят электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей. Все остальные электроприемники, не подпадающие под определения первой и второй категорий относят к третьей категории. Для потребителей 1-2 категории надёжности конечно предусмотрено резервирование, но жилые дома по большей части являются потребителями 3 категории.

Выходом из сложившегося положения для потребителя 3 категории, в данном случае для физического лица, проживающего в сельской местности, является использование независимого от электросети источника питания. В качестве такого источника наиболее часто используются жидкотопливные генераторы, как правило, дизельные или бензиновые. Применение подобных электроустановок отрицательно влияет на здоровье человека и состояние окружающей среды. Кроме того, для запуска такого генератора необходимо

определённое количество времени. Конечно, перерыв в электроснабжении потребителей 3 категории допускается в течение суток, однако естественно желание потребителя восстановить электроснабжение в максимально быстро.

Ещё одним решением для обеспечения питания потребителя от автономного источника является применение электроустановок, работающих на возобновляемых (альтернативных) источниках энергии. Подобные электроустановки не требуют топлива, оказывают минимальное отрицательное воздействие на здоровье человека и состояние окружающей среды или не оказывают его вообще.

Однако установки, работающие на альтернативных источниках энергии, имеют существенный недостаток - зависимость количества вырабатываемой электроэнергии от погодных условий и времени суток, а значит его неравномерность. По этой причине использование подобных электроустановок для электроснабжения энергоёмких потребителей не представляется возможным, по крайней мере, на данном этапе развития альтернативной энергетики. Наилучшей сферой применения источников возобновляемой энергии является жилой сектор.

Цель данной работы - повышение надёжности электроснабжения индивидуального коттеджа за счёт использования в качестве автономного источника питания электроустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Анализ источников альтернативной энергии в отношении пригодности их использования для электроснабжения потребителей на территории Самарской области.

- Расчёт параметров электроустановок, работающих на альтернативных источниках энергии, выбранных в результате анализа.

- Расчёт сроков окупаемости рассмотренных электроустановок и выбор наименее затратного варианта.

1 Проблема надёжности электроснабжения и возможные пути её решения

1.1 Проблема надёжности электроснабжения

Надёжность электроснабжения - проблема, над решением которой усиленно работало и продолжает работать не одно поколение электроэнергетиков. Один из способов решения данной проблемы - резервирование на всех уровнях системы электроснабжения, однако для обеспечения максимально бесперебойной работы системы, необходимо, чтобы все её элементы находились в удовлетворительном состоянии. Территория России огромна, и также огромна протяжённость электрических сетей. Обеспечить удовлетворительное состояние всех её элементов - очень непростая задача. Большое число аварий в сетях происходит как раз из-за потери элементами работоспособности по причине износа.

Особенно часто проблема надёжности проявляется в распределительных сетях (РС). На территории России распределительные сети обеспечивают электроснабжение примерно 150 тыс. населенных пунктов и 3000 городов. При этом более 40% воздушных и кабельных линий, а также около 30% подстанций напряжением 110 кВ и ниже находятся в эксплуатации больше допустимого нормами срока.

«Естественные результаты высокого процента физического износа оборудования, конструкций и материалов в РС - снижение надёжности электроснабжения и качества электроэнергии, растущие потери электроэнергии в сетях и низкий уровень автоматизации объектов РС» [26].

«Основными направлениями инвестиционной политики в сетях должны быть реконструкция и техническое перевооружение действующих объектов электросетевого хозяйства» [23].

При проведении реконструкции и технического перевооружения распределительных сетей предусматривается:

- повышение надежности электроснабжения потребителей и повышение качества электрической энергии; снижение потерь электроэнергии в элементах сети;

- адаптация сетей к проведению ремонтных работ под напряжением и применение электротехнического оборудования, требующего минимальных затрат и времени на обслуживание;

- совершенствование мероприятий по точному определению места повреждения в линии и, как следствие, уменьшению времени восстановления поврежденного участка и ущерба у потребителя из-за перерывов в электроснабжении;

- увеличение продолжительности межремонтного эксплуатационного периода с сохранением надежности электроснабжения;

- повышение безопасности как электрической, так и экологической.

«Надежность электроснабжения должна соответствовать возросшим требованиям потребителей. Соответствие требованиям достигается в основном за счёт применения нового электрооборудования, новых конструкций проводов и силовых кабелей, линейной арматуры, соединительных муфт, новых типов изоляторов и других новых элементов, а также применения усовершенствованных конструкций РУ, РТП и РП 6-20 кВ, ТП 6-20/0,4 кВ.

Эксплуатация сетей должна происходить при оптимальном уровне оснащения РС средствами связи, телеизмерения, телесигнализации и телеуправления и внедрении новых устройств релейной защиты. Необходимо применение АВР и АПВ, а также более высокого уровня изоляционных материалов в сетях 6-20 кВ.

В процессе развития сети необходимо учитывать возможность роста нагрузки, а также восприимчивости к применению новых технологий обслуживания, автоматизации и управления. Конструкции опор ВЛ и ТП должны позволять выполнение ремонтных работ без снятия напряжения.

Затраты на обслуживание распределительных сетей нового поколения должны быть минимальными» [20].

«Реализация этих принципов предполагает принятие комплексных научно-технических программ для разработки совокупности технических решений, позволяющих реализовать комплексные проблемы развития и функционирования распределительных электрических сетей, а также использование на электросетевых объектах нового сертифицированного электрооборудования, конструкций и материалов. Применение на практике требований единой технической политики должно способствовать постепенному переходу к распределительным сетям нового поколения. Такие сети должны обеспечивать:

- уровни надежности электроснабжения, согласованные с потребителями, а также соответствующее нормам качества электроэнергии;

- адаптацию и восприимчивость к растущим электрическим нагрузкам, новым технологиям обслуживания, использованию передового оборудования и средств автоматизации;

- электрическую и экологическую безопасность;

- сокращение технических и коммерческих потерь электроэнергии»

[17].

«Основные технические решения, закладываемые при проектировании электросетевых объектов, заключаются в применении нового электрооборудования, конструкций и материалов, а также новых схемных решений.

При обосновании направлений развития РС вопросы надежности электроснабжения потребителей являются наиболее важными. Это связано с тем, что именно требования к надежности более чем другие характеристики поставляемой электроэнергии формируют схему электрических сетей и характер резервирования.

Расчетные модели для нормирования надежности основываются на двухуровневом принципе конфигурации РС - головные участки (магистраль)

и отходящие линии (ответвления) или потребительские, подсоединенные непосредственно к отходящим фидерам.

Конфигурация сети должна соответствовать условиям эксплуатации сетей в конкретном регионе. Магистральные линии 6-20 кВ в РС включают в себя устройства автоматики и выключатели различных конструкций, распределенные по линии для локализации мест аварий» [3].

«Продолжительность допустимых пределов в перерывах электроснабжения варьируется в зависимости от требований потребителя. Их длительность определяется топологией сети и процедурами восстановления. В теоретических расчетах при проектировании надежность электроснабжения оценивается с использованием анализа статистических параметров надёжности.

Для оценки надежности дополнительно используется экономический критерий - затраты за полный срок эксплуатации сетей, а также экологический критерий.

Сравнение вариантов сети проводится для возможных вариантов конфигурации в зависимости от плотности нагрузки и числа РТП и ТП, а также от нагрузки фидера при использовании различных технических решений. Сравнение вариантов следует проводить при условии, что анализируемая структура не будет изменяться в течение этого периода и будет адаптирована к возможному росту нагрузок.

Обоснование методов учета надежности в задачах выбора направлений развития электрических сетей заключается в ответе на следующие вопросы - какие требования предъявляют потребители к надежности электроснабжения и каким способом наиболее эффективно выполнить требования потребителей к надежности электроснабжения» [13].

«У основной массы сельских потребителей последствия нарушений электроснабжения приводят к ущербу сначала незначительному, а через некоторое время – большому» [21].

«Распределительные сети в сельской местности имеют низкую степень резервирования элементов, низкие уровни автоматизации и оснащенности коммутационной аппаратурой. Это определяет соответствующую организацию системы обслуживания: ПС 110-35/10 кВ, как правило, не имеют обслуживающего персонала, основные оперативные операции в РС осуществляются действиями оперативно-выездных бригад. Учет этих особенностей приводит к тому, что методы расчета показателей надежности для сетей 35-110 кВ и сетей 0,38-10 кВ должны быть различны: первые относятся к автоматизированным сетям с высокой степенью резервирования, вторые практически не имеют автоматизации» [17].

«В сети 6-20 кВ практически любое устойчивое повреждение приводит к погашению нагрузки, присоединенной к отключившемуся участку ВЛ 6-20 кВ. Время простоя потребителя здесь определяется не только длительностью ремонта отказавшего оборудования, но и продолжительностью выполнения операций по вводу резервного питания, если таковое имеется. Время восстановления электроснабжения потребителя, присоединенного к сети 6-20 кВ, зависит от взаимного расположения потребителя и поврежденного участка ВЛ относительно источника питания» [21].

«Оптимизация надежности при решении задачи развития сельских распределительных сетей заключается в выборе состава, объема, мест размещения и очередности ввода разнообразных средств повышения надежности» [13].

В качестве целевой функции рекомендуется принимать величину недоотпуска электроэнергии которая определяется как произведение отключений нагрузки (P), частоты отказов (ω) и времени восстановления (τ):

$$\Delta W = P \cdot \omega \cdot \tau \quad (1)$$

В таблице 1 приведены некоторые параметры надёжности элементов РС.

Таблица 1 - Параметры надёжности элементов РС

Наименование объекта	Частота отключений, ω , 1/год на 100 км	Время восстановления, τ	Частота плановых ремонтов, μ , 1/год	Продолжительность планового ремонта, Т, ч
Трансформатор с ВН 35 – 220 кВ	0,02	150	1	30
Трансформатор с ВН 6 – 10 кВ (воздушная сеть)	0,05	100	0,5	10
Трансформатор с ВН 6 – 10 кВ (кабельная сеть)	0,005	100	0,5	10
ВЛ 35 кВ	1,2	8	6	8
ВЛ 10 кВ	2	5	4	8
КЛ 6 - 10 кВ в грунте	3	40	1	8
КЛ 6 - 10 кВ в блоках	0,5	5	1	8

«Изменение недоотпуска ΔW может быть достигнуто за счет применения технических средств, воздействующих на один или несколько параметров одновременно, причем эти параметры изменяются дискретно. Например, применение вариантов деления ВЛ 6-20 кВ на участки автоматическими секционными устройствами (реклоузерами) дает значительный эффект в повышении надежности сетей в сельской местности, что подтверждается международным опытом применения децентрализованной автоматизации на базе реклоузеров» [23].

Все вышеназванные меры по повышению надёжности электроснабжения потребителей должны быть предприняты со стороны владельца распределительных сетей. Реконструкция сетей проводится по мере поступления финансовых средств. В настоящее время электроснабжения огромного числа потребителей осуществляется без должного уровня надёжности, Качество напряжения часто также оставляет желать много лучшего. Имеют место скачки напряжения, приводящие к

выходу из строя бытовых приборов. Отклонение напряжения у абонентов, наиболее удалённых от трансформаторной подстанции часто превышает допустимые 5 %.

А что же может предпринять потребитель для скорейшего повышения надежности электроснабжения? Выход из подобной ситуации – резервный источник питания. Наиболее распространёнными резервными источниками питания в настоящее время являются генераторы на жидком топливе: бензиновые или дизельные.

Они легко заводятся, экономичны, долговечны, просты в использовании. Но в то же время подобные генераторы пожароопасны, имеют низкую экологичность, высокий уровень шума и вибрации. Кроме того, дизельное топливо при низких температурах замерзает.

Еще один вариант резервного питания - установки, основанные на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

1.2 Возобновляемые источники энергии

Принимая во внимание последние тенденции роста цен на энергоносители и всё большее загрязнение окружающей среды продуктами производства электроэнергии из традиционных видов топлива, можно констатировать как факт огромную перспективность альтернативных источников энергии в качестве основных энергоносителей. На российском электроэнергетическом рынке намечается тенденция минимизации использования нефтегазовых ресурсов для различных производств. Уже сейчас электроустановки, работающие на энергии альтернативных источников, нашли применение не только за рубежом, но и в России.

«К возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) обычно относят солнечную, ветровую и геотермальную энергию, энергию морских приливов и волн, биомассы (растения, различные виды органических отходов), низкопотенциальную энергию окружающей среды. К ВИЭ также принято

относить малые ГЭС (мощностью до 30 МВт при мощности единичного агрегата не более 10 МВт), которые отличаются от традиционных - более крупных - ГЭС только масштабом» [5]. Рассмотрим наиболее распространённые из них, а именно:

- Ветровую энергию;
- Геотермальную энергию;
- Солнечную энергию;
- Энергию биомассы.

1.2.1 Ветровая энергия

«Наибольшее применение получил самый изменчивый и непостоянный вид энергии – ветер. Суммарная мировая установленная мощность всех ВЭУ и ВЭС приблизительно составляет 743 ГВт» [32].

«Энергия ветра производится массивными трехлопастными ветротурбинами, устанавливаемыми на самом вершине высоких башен и работающими подобно вентиляторам, но в обратном порядке. В общих чертах, устройство ветровой электростанции выглядит следующим образом. Ветер вращает лопасти, а лопасти крутят вал, который соединен с набором зубчатых колес, приводящих в действие электрогенератор. Крупные турбины для электроснабжения могут вырабатывать от 750 киловатт до 1,5 мегаватт электроэнергии.

В ветровых установках группы турбин связаны вместе с целью выработки электроэнергии для энергосистем общего пользования. Электричество подается потребителям посредством линий электропередач и распределительных линий» [33].

«Современные генераторы работают при скоростях ветра от 3-4 м/с до 25 м/с» [34]. «Мощность ветрогенератора зависит от площади, заметаемой лопастями генератора. Наибольшее распространение в мире получила конструкция ветрогенератора с тремя лопастями и горизонтальной осью вращения, хотя кое-где ещё встречаются и двухлопастные. Были попытки

построить ветрогенераторы так называемой ортогональной конструкции, то есть с вертикальным расположением оси вращения. Считается, что они имеют преимущество в виде очень малой скорости ветра, необходимой для начала работы ветрогенератора. Главная проблема таких генераторов - механизм торможения. В силу этой и некоторых других технических проблем ортогональные ветроагрегаты не получили практического распространения в ветроэнергетике» [12].

«Наиболее перспективными местами для производства энергии из ветра считаются прибрежные зоны. В море, на расстоянии 10-12 км от берега (а иногда и дальше), строятся офшорные ветряные электростанции. Башни ветрогенераторов устанавливаются на фундаментах из свай, забитых на глубину до 30 метров. Могут использоваться и другие типы подводных фундаментов, а также плавающие основания» [6].

1.2.2 Геотермальная энергия

«Второе место по объему применения занимает геотермальная энергетика. Суммарная мировая мощность ГеоТЭС составляет около 13 ГВт. Они вполне конкурентоспособны по сравнению с традиционными топливными электростанциями» [4].

«Геотермальная энергия - это энергия, получаемая из природной тепла Земли. Достичь этого тепла можно с помощью скважин. Геотермический градиент в скважине возрастает на 1 °С каждые 36 метров. Это тепло доставляется на поверхность в виде пара или горячей воды. Термальные регионы имеются во многих частях мира.

Чем глубже скважина, тем выше температура, но в некоторых местах геотермальная температура поднимается быстрее. Такие места обычно находятся в зонах повышенной сейсмической активности, где сталкиваются или разрываются тектонические плиты. Именно поэтому наиболее перспективные геотермальные ресурсы находятся в зонах вулканической активности. Чем выше геотермический градиент, тем дешевле обходится добыча тепла, за счет уменьшения расходов на бурение и качание. В

наиболее благоприятных случаях, градиент может быть настолько высок, что поверхностные воды нагреваются до нужной температуры. Примером таких случаев служат гейзеры и горячие источники» [7].

1.2.3 Солнечная энергия

Суммарная мировая мощность всех фотоэлектрических установок достигла 760 ГВт. На практике солнечная радиация может быть преобразована в электроэнергию непосредственно или косвенно.

«Косвенное преобразование может быть осуществлено путем концентрации радиации с помощью следящих зеркал для превращения воды в пар и последующего использования пара для генерирования электричества обычными способами. Такая система может работать только при прямом освещении солнечными лучами» [15].

«Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую может быть осуществлено с использованием фотоэлектрического эффекта. Элементы, изготовленные из специального полупроводникового материала, например, кремния, при прямом солнечном облучении обнаруживают разность в вольтаже на поверхности т.е. наличие электрического тока» [18].

1.2.4 Энергия биомассы

«Биомасса - это собирательный термин для возобновляемых за короткое время органических материалов. Это довольно универсальный материал, который может использоваться для выработки энергии (для нагрева воды и помещения); выработки электричества; а может делать и то и другое одновременно» [9].

Биомассу можно разделить на две категории:

- Древесная биомасса. Данная категория включает в себя лесоматериалы; необработанные или оставшиеся от переработки остатки дерево- и пиломатериалов; быстро растущие молодые деревья, специально посаженные для вырубki (например, ива, тополь):

- Не древесная биомасса. Включает в себя муниципальные и промышленные отходы; продукты жизнедеятельности, оставшейся после

выращивания сельскохозяйственных животных; сельскохозяйственные и водные растения; зерновые, после сбора урожая, с которых остается большое количество растительной части пригодной для сжигания (например, кукуруза, свекла, рапс).

«Энергия, запасенная в первичной и вторичной биомассе может конвертироваться в технически удобные виды топлива или энергии несколькими путями. Термохимическое преобразование биомассы при высоких температурах: прямое сжигание для производства тепла; пиролиз для получения пиролитических жидкостей и других веществ; газификация для производства газов с низкой промежуточной теплотворной; сжижение для получения тяжелой топливной нефти или бензина» [16].

1.2.5 Основные преимущества и недостатки возобновляемых источников энергии

Использование каждого из рассмотренных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приближает человечество к решению проблемы загрязнения окружающей среды и повышения цен на традиционные энергоносители. Однако каждый источник имеет свои плюсы и минусы. Основные преимущества и недостатки рассмотренных ВИЭ приведены в таблице 2.

Из всех вышперечисленных источников альтернативной энергии наиболее перспективными для использования на территории Самарской области являются солнце и ветер. В соответствии с картой распределения солнечной радиации по территории России Самарская область получает в день 3,5 - 4 кВт·ч/м² солнечной энергии (рисунок 1), что вполне достаточно для успешного функционирования солнечных батарей в качестве источников электрической энергии.

Таблица 2 - Преимущества и недостатки ВИЭ

Ветровая энергия		Геотермальная энергия		Солнечная энергия		Энергия биомассы	
+	-	+	-	+	-	+	-
Повсеместная распространённость	Малая удельная мощность	Стабильность энергетического потока	Географическая «привязанность» к месторождениям парогидротерм или термоаномалиям	Повсеместная распространённость	Малая удельная мощность	Повсеместная распространённость	Возможность обеднения и эрозии почв в результате интенсификации выращивания «энергетических» культур
Неисчерпаемость	Повышенные капиталовложения	Неисчерпаемость	Повышенные капиталовложения	Неисчерпаемость	Повышенные капиталовложения	Стабильность энергетического потока	Программы выращивания энергетических растений конкурируют с выращиванием пищевых культур
Экологическая чистота	Изменчивость во времени энергетического потока	Экологическая чистота	-	Экологическая чистота	Изменчивость во времени энергетического потока	Экологическая чистота	-
Низкие эксплуатационные затраты	Низкий КПД	Низкие эксплуатационные затраты	-	Низкие эксплуатационные затраты	-	Низкие эксплуатационные затраты	-
Эргономичность ветроэнергетической установки	Высокий уровень шума	-	-	Высокий КПД солнечных коллекторов	-	-	-

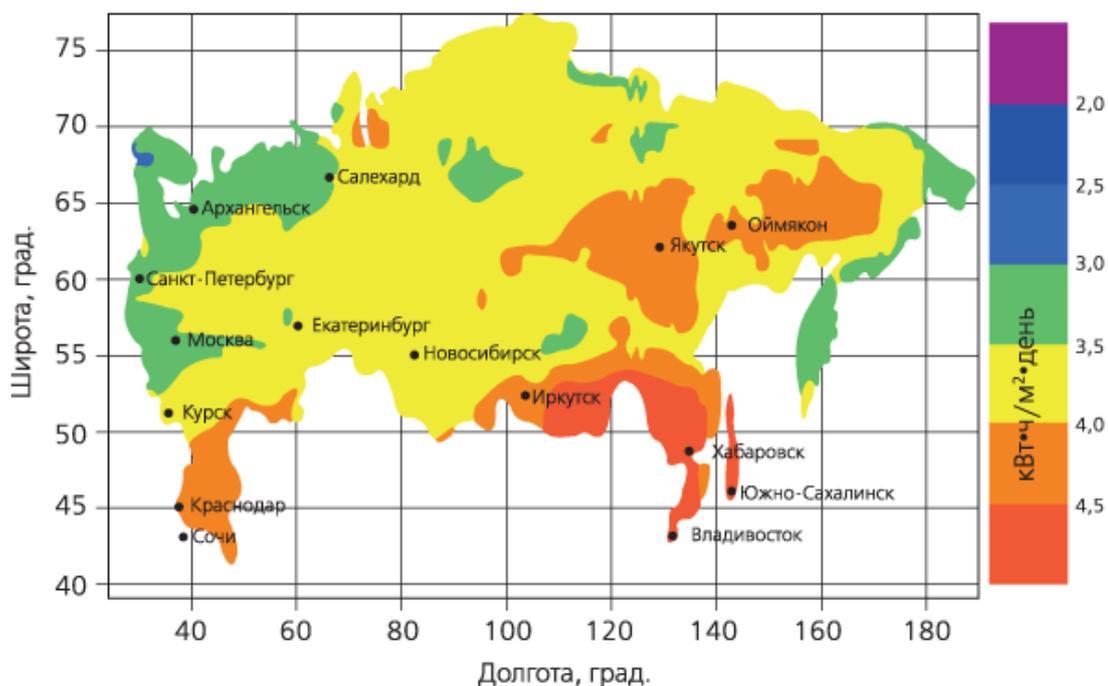


Рисунок 1 - Среднедневная сумма солнечной радиации за год на территории России

Скорость ветра на территории Самарской области также достаточно высока для рентабельного использования ветровых генераторов в целях обеспечения электроэнергией жилого сектора. В соответствии с картой распределения значений среднегодовых скоростей ветра по территории России для Самарской области они составляют 4 - 6 м/с (рисунок 2).

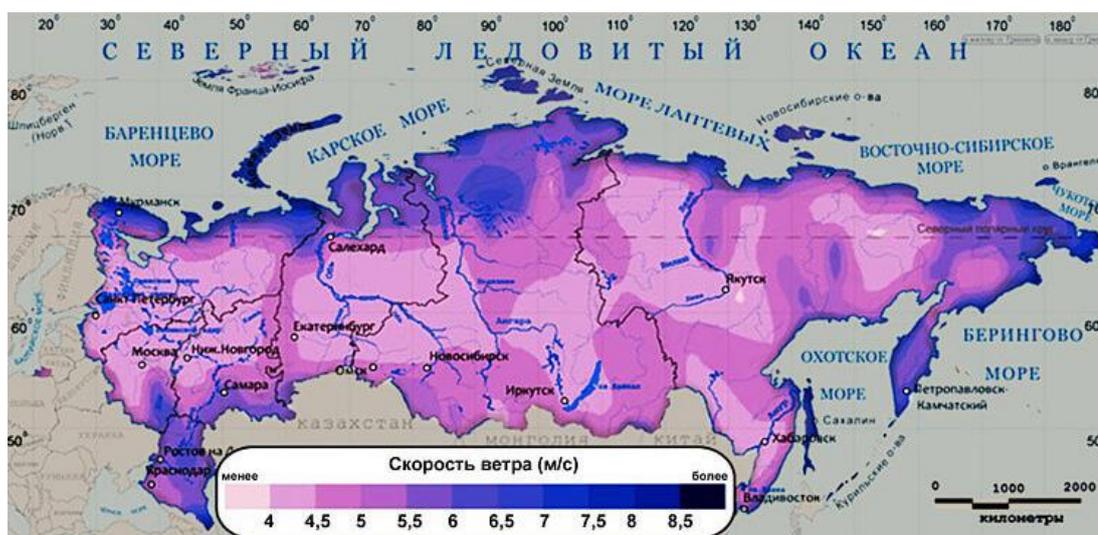


Рисунок 2 - Распределение значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м по территории России

Принимая во внимание последние тенденции роста цен на энергоносители и всё большее загрязнение окружающей среды продуктами производства электроэнергии из традиционных видов топлива, можно констатировать как факт перспективность альтернативных источников энергии в качестве основных энергоносителей.

Примем к рассмотрению автономные источники, работа которых основана на энергии ветра и солнца. Максимальная мощность подобных источников конечно ниже, чем у жидкотопливных генераторов, да и стоимость их достаточно высока. Однако установки, основанные на использовании ВИЭ несравнимо экологичнее, обладают более низким уровнем шума и вибрации. Кроме того, они не требуют топлива и эксплуатационные затраты для таких установок пойдут только на ремонт и обслуживание.

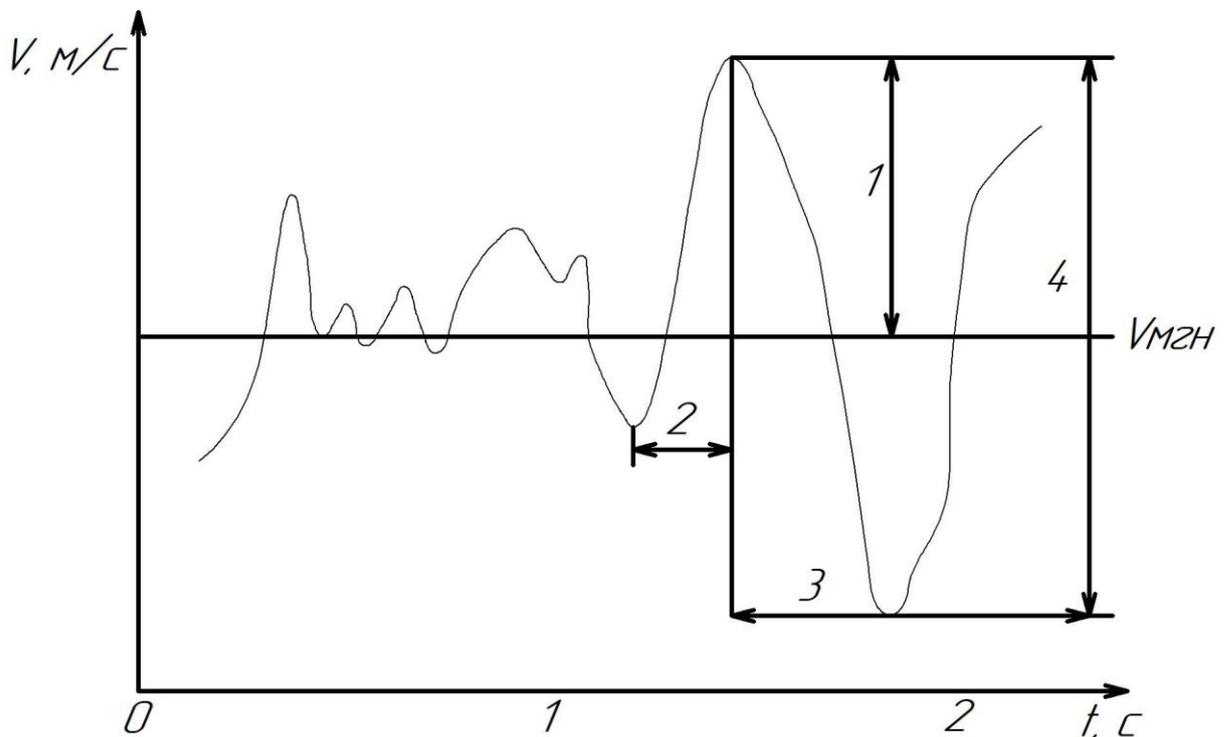
1.3 Ветроэнергетическая установка

«Ветер является одним из наиболее мощных энергетических источников, который издавна используется человеком. По ориентировочным оценкам, энергия, которая непрерывно поступает от солнца, соответствует суммарной мощности, превышающей 10^{11} ГВт. Это определяет возможную годовую выработку энергии ветроагрегатами, равную $1,18 \cdot 10^{13}$ кВт·ч, что во много раз превышает количество энергии, потребляемой сегодня в мире» [14].

«Важнейшей характеристикой, определяющей энергетическую ценность ветра, является его скорость. В силу ряда метеорологических факторов (возмущения атмосферы, изменения солнечной активности, количества тепловой энергии, поступающей на Землю, и других причин), а также вследствие влияния рельефных условий непрерывная длительность ветра в данной местности, его скорость и направление изменяются по случайному закону. Поэтому мощность, которую может вырабатывать

ветроустановка в различные периоды времени, удастся предсказывать с очень малой вероятностью. В тоже время суммарную выработку агрегата, особенно за длительный промежуток времени, можно рассчитать с высоким уровнем достоверности, так как средняя скорость ветра и частота распределения скоростей в течение года или сезона изменяются мало» [28].

Ветер - это сложный геофизический процесс, который можно прогнозировать только с определенной степенью вероятности. На рисунке 3 показан пример формирования порыва ветра. Амплитуда порыва 1 в течение 0,3-0,35 секунд, то есть за время формирования порыва 2, достигла максимального значения в два раза превышающего среднюю мгновенную скорость $V_{\text{мгн}}$, за 3 секунды. Время спадания порыва оказалось примерно равным времени формирования, а максимальная величина изменения скорости 4 более чем в 2 раза превышает амплитуду 1.



1 – амплитуда порыва, 2 – время формирования порыва, 3 – время падения скорости, 4 – максимальная величина изменения скорости ветра

Рисунок 3 - Схема формирования порыва ветра

«Расчет и проектирование ветродвигателя осуществляются на основе законов аэродинамики. Применительно к ветроэнергетике аэродинамика изучает поведение ветроколеса и других элементов ветродвигателя при действии на них воздушного потока, имеющего определенную скорость и давление» [29].

«Взаимодействие между ветродвигателем и потоком ветра достаточно сложное, так как последний неоднороден даже в небольшом сечении: скорость в различных сечениях различна, порывы смещены по фазе один относительно другого, вектор скорости всё время изменяется по величине направлению» [22].

Воздушный поток, как и любое движущееся тело, обладает энергией движения, или запасом кинетической энергии. Последняя с помощью ветроколеса или другого рабочего органа преобразуется в механическую энергию.

Секундная кинетическая энергия E воздушного потока равна:

$$E = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2)$$

$$E = \frac{\rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot R}{2} \quad (3)$$

Следовательно, секундная энергия, или мощность воздушного потока, пропорциональна его плотности, площади поперечного сечения и кубу скорости.

Часть полной энергии потока, воспринятой ветроколесом, которую ветродвигатель преобразует в механическую энергию, оценивается коэффициентом использования энергии ветра:

$$\xi = \frac{E_{\text{вд}}}{E} \quad (4)$$

где $E_{\text{вд}}$ - энергия ветра, которую ветродвигатель преобразует в механическую энергию.

Секундная работа или мощность, развиваемая ветроколесом, определяется по формуле:

$$P = \rho \cdot V^3 \cdot S \cdot \frac{\xi}{2} \quad (5)$$

Так как плотность воздуха очень мала (в 800 раз меньше плотности воды), то для получения относительно больших мощностей приходится применять ветродвигатели со значительной поверхностью ветроколеса.

Постоянные изменения скорости V приводят к тому, что мощность, развиваемая двигателем, изменяется в очень больших пределах: от нуля во время штиля до величины, в десятки раз превосходящей установленную мощность, на которую рассчитывают ветродвигатель при расчётной скорости ветра.

Для работы ветроэнергетической установки возможно применение любого типа генератора. Используются как генераторы постоянного тока, так и переменного (синхронные и асинхронные).

Наиболее распространенные в применении в составе ВЭУ малой мощности:

- Синхронные генераторы с комбинированным возбуждением (от постоянных магнитов и обмотки возбуждения), которые на выходе выдают постоянное по величине напряжение за счет стабилизации его с помощью обмотки.

- Асинхронные многополюсные генераторы, которые, будучи подключены к сети переменного тока, потребляют реактивную энергию из сети и отдают активную в сеть, при этом самостоятельно синхронизируя свою частоту с частотой сети.

Шум и вибрации генератора присущи каждой ветроустановке в той или иной степени. Для снижения шума и вибраций применяют виброгасители, виброразвязки.

1.4 Фотоэлектрические системы

«Солнце - источник энергии очень большой мощности. 22 дня солнечного сияния по суммарной мощности, приходящей на Землю, равны всем запасам органического топлива на Земле. При использовании высокоэффективных методов преобразования энергии Солнце может - обеспечивать бурно растущие потребности человечества в энергии практически вечно» [25].

«Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция на Солнце. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне длин волн $\lambda=0,2-3$ мкм. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном за счет поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения - озоном и рассеяния излучения молекулами газов и находящимися в воздухе частицами пыли, и аэрозолями. Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, является атмосферная (или воздушная) масса (AM). При нулевой воздушной массе AM0 у верхней границы атмосферы интенсивность излучения равна $E_S = 1360$ Вт/м². Величина AM1 соответствует прохождению солнечного излучения через безоблачную атмосферу до уровня моря при зенитальном расположении Солнца. Наиболее характерной в земных условиях является величина AM1,5. Она принята за стандартную при интегральной поверхностной плотности солнечного излучения $E_S = 835$ Вт/м²» [2].

«Для преобразования солнечной энергии в электрическую служат батареи (или как их ещё называют фотоэлектрических преобразователей -

ФЭП). Преобразование энергии в ФЭП основано на эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения» [1].

«Простейшая конструкция солнечного элемента (СЭ) прибора для образования энергии солнечного излучения на основе монокристаллического кремния показана на рисунке 4. На малой глубине от поверхности кремниевой пластины р-типа сформирован р-n-переход с тонким металлическим контактом. На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Когда СЭ освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электрон - дырочные пары. Электроны, генерируемые в р-слое вблизи р-n-перехода, подходят к р-n-переходу и существующим в нем электрическим полем выносятся в n-область.

Аналогично и избыточные дырки, созданные в n-слое, частично переносятся в р-слой (рисунок 5, а). В результате n-слой приобретает дополнительный отрицательный заряд, а р-слой - положительный. Снижается первоначальная контактная разность потенциалов между р- и n-слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется напряжение (рисунок 5, б).

Отрицательному полюсу источника тока соответствует n-слой, а р-слой – положительному» [19].

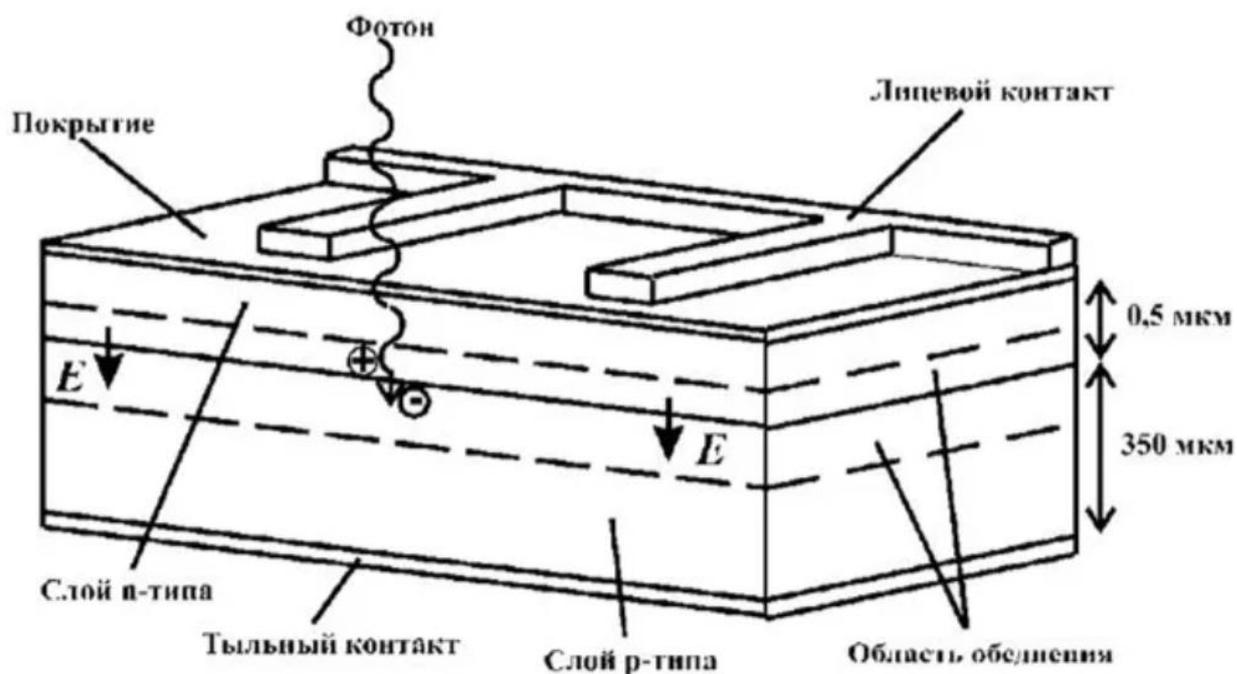


Рисунок 4 - Конструкция солнечного элемента на основе монокристаллического кремния

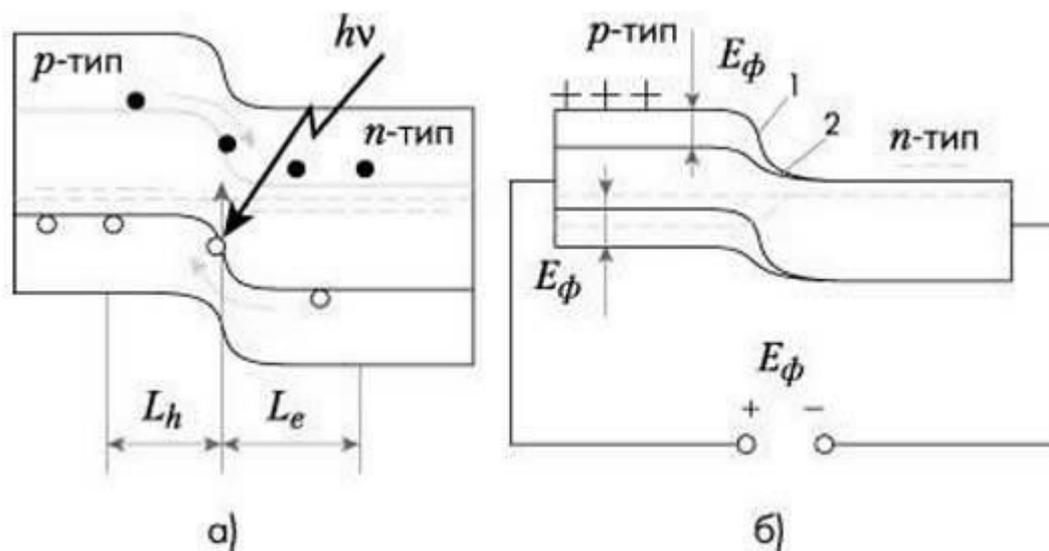


Рисунок 5 - Модель p-n-перехода: а) в начальный момент освещения; б) изменение под действием излучение и возникновение фото-ЭДС

Величина установившейся фото-ЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольтамперной характеристики (ВАХ) (рисунок 6).

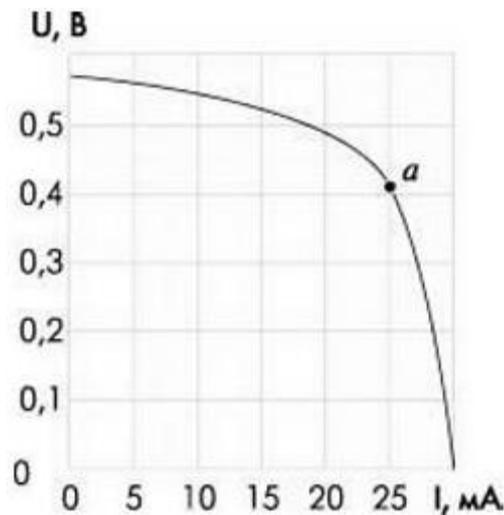


Рисунок 6 - Вольтамперная характеристика солнечного элемента

$$U = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln((I_{ph} - I) \cdot I_s + 1) \quad (6)$$

где I_s - ток насыщения;

I_{ph} - фототок;

k - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T - температура;

q - заряд электрона.

ВАХ поясняет эквивалентная схема фотоэлемента (рисунок 7), включающая источник тока:

$$I = I_{ph} \cdot S_q \cdot N_0 \cdot Q \quad (7)$$

где S_q - площадь фотоэлемента;

Q - коэффициент собирания, показывающий, какая доля электронно-дырочных пар (NO) собирается р-п-переходом.

Параллельно источнику тока включен р-п-переход, ток через который равен:

$$I = I_s \cdot (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) \quad (8)$$

P-n-переход шунтирует нагрузку, и при увеличении напряжения ток через него быстро возрастает. В нагрузку (сопротивление R) отбирается ток I.

Уравнение ВАХ справедливо и при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава, изменяется лишь значение фототока I_{ph} . Максимальная мощность вырабатывается в том случае, когда фотоэлемент находится в режиме, отмеченном точкой а.

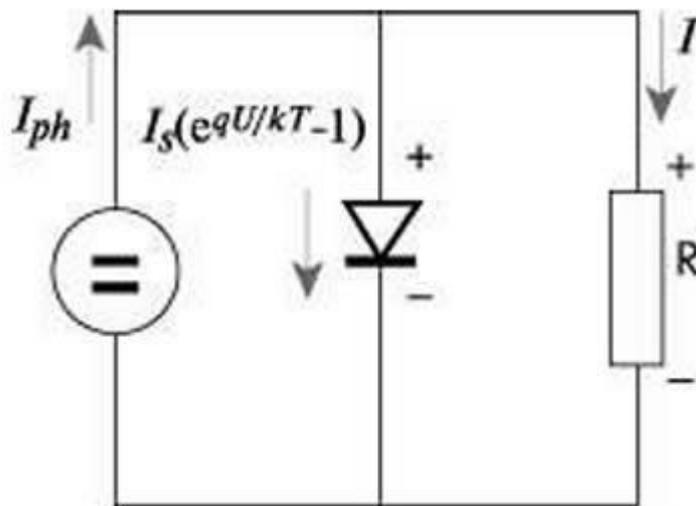


Рисунок 7 - Эквивалентная схема солнечного элемента

1.5 Гибридная ветросолнечная электроустановка

В большинстве районов приход солнечной радиации и наличие ветра находятся в противофазе (т.е. когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то нет солнца). Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения автономного объекта, уменьшения необходимой мощности: ветротурбины и солнечной батареи и ёмкости аккумуляторной батареи, улучшения режимов работы станции во многих

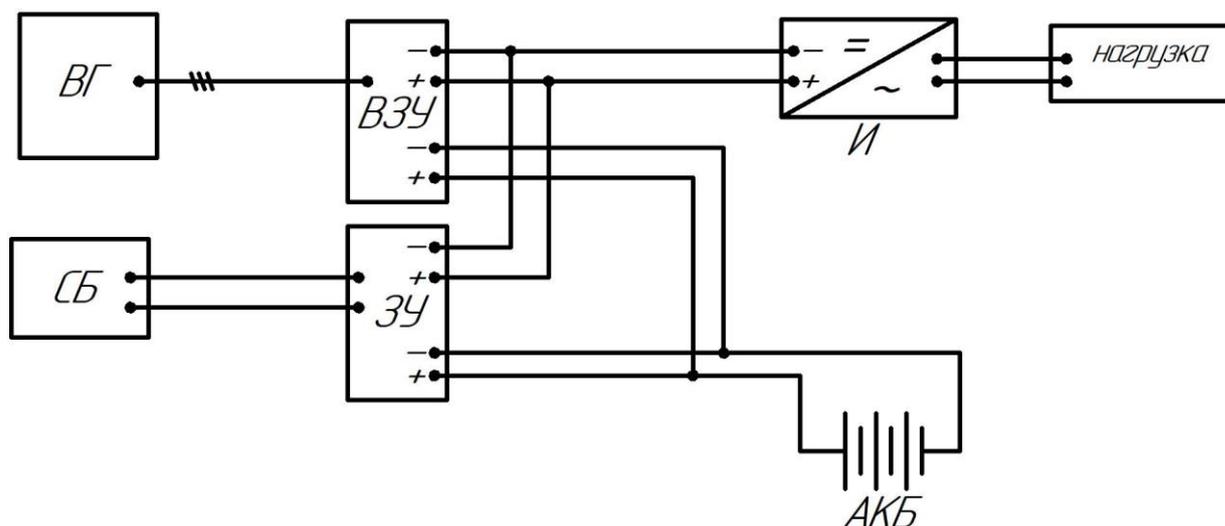
случаях целесообразно использование гибридной ветросолнечной электроустановки.

Особенно ощущаются преимущества гибридных станций при круглогодичном использовании. При этом в зимнее время основная выработка электроэнергии приходится на ветроэлектрическую установку, а летом - на солнечные фотоэлектрические модули.

Гибридная ветросолнечная электростанция состоит из следующих компонентов:

- Ветроэнергетической установки (ВЭУ), включающей ветрогенератор, мачту, блок контроля и управления зарядом аккумуляторной батареи, балластную нагрузку;
- Фотоэлектрического модуля;
- Контроллера заряда для солнечных батарей;
- Инвертора;
- Аккумуляторных батарей;
- Соединительных кабелей.

Электроэнергия, вырабатываемая ветрогенератором, установленным на мачте, поступает на выпрямительно-зарядное устройство и используется для подзарядки аккумуляторных батарей постоянным током. Энергия фотоэлектрической системы через специальный контроллер также используется для зарядки аккумуляторных батарей постоянным током. Питание потребителей осуществляется через инвертор, преобразующий постоянный ток с аккумуляторных батарей в переменный (рисунок 8).



ВГ – ветрогенератор, СБ – солнечные батареи, ВЗУ – выпрямительно-зарядное устройство (контроллер), ЗУ – зарядное устройство (контроллер), АКБ – аккумуляторная батарея, И – инвертер

Рисунок 8 - Структурная схема гибридной электроустановки

Рассмотренные электроустановки можно использовать как автономно, так параллельно с сетью. Если использовать установку параллельно с сетью как основной источник питания, то в случае полного разряда аккумуляторных батарей (т.е. при потере питания) можно с помощью устройства АВР переключить питание нагрузок на основную сеть; если же использовать электроустановку в качестве резервного источника питания, то при аварии в основной сети с помощью устройства АВР возможно переключение питания нагрузок на аккумуляторные батареи электроустановки (рисунок 9).

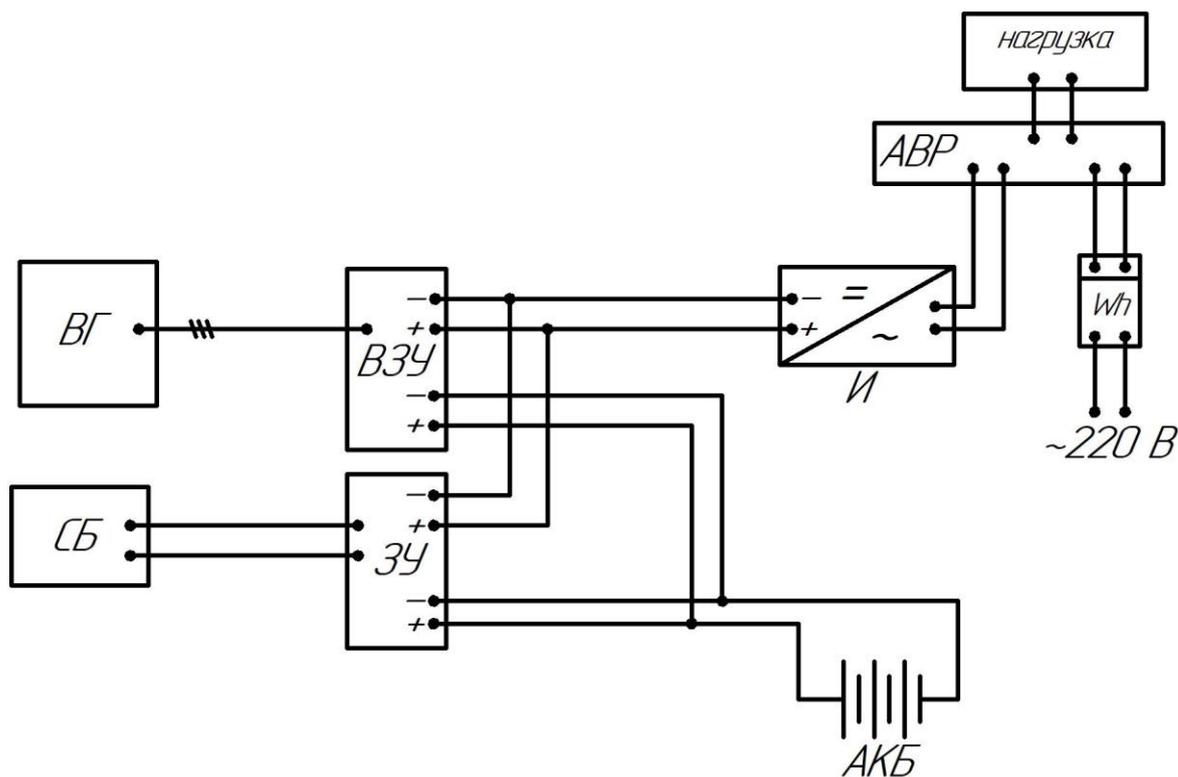


Рисунок 9 - Структурная схема гибридной электроустановки, работающей параллельно с сетью

Рассмотрим использование вышеуказанных электроустановок для электроснабжения загородного коттеджа.

Выводы по разделу 1. Описана проблема надёжности электроснабжения. Приведены варианты повышения надёжности электроснабжения. Произведен выбор наиболее приемлемого способа повышения надёжности посредством применения электроустановок на основе возобновляемых источников энергии.

2 Электроснабжение коттеджа с использованием электроустановок, работающих на альтернативных источниках энергии

2.1 Характеристика посёлка

Коттеджный посёлок европейского типа «Сад» находится в 30 км от города Самара. На территории посёлка расположены:

- 62 двухэтажных коттеджа;
- общественный центр, включающий в себя продовольственный и непродовольственный магазины, ресторан, салон красоты, химчистку, кинотеатр с двумя залами, клуб, паркинг;
- детский сад - начальная школа;
- поликлиника;
- сауна/бассейн;
- конюшня;
- ветеринарная-клиника;
- пасека;
- насосная станция;
- пост охраны.

Климат района характеризуется как континентальный климат умеренных широт. Особенностью его является засушливость, высокая континентальность и большая изменчивость от года к году, особенно по количеству выпавших осадков. Среднегодовая температура воздуха +3,8 градуса по Цельсию, средняя месячная температура воздуха изменяется от +20,1 градуса по Цельсию в июле, до -13,9 градуса по Цельсию в январе. Среднегодовая сумма осадков около 400 мм. Средняя годовая относительная влажность воздуха 71 - 75%. Средняя годовая скорость ветра 3,2 - 4,4 м/с.

Почва суглинистая, обладает низкой коррозионной активностью, удельное электрическое сопротивление около 40 Ом/м.

План посёлка представлен на рисунке 10.



к1 - к62 – коттедж, 1 – общественный центр, 2 – сауна/бассейн, 3 – конюшня, 4 – ветклиника, 5 – насосная станция, 6 – пасека, 7 – поликлиника, 8 – детский сад – начальная школа, 9 – пункт охраны

Рисунок 10 – Генплан коттеджного поселка «Сад»

2.2 Электроснабжение поселка

Питание посёлка осуществляется от подстанции 110/35/10 кВ Озерки по двум воздушным линиям 10 кВ, которые подходят к секциям шин распределительного пункта 10 кВ. Распределительная сеть 10 кВ выполнена кабельными линиями, проложенными в траншее, по кольцевой схеме соединения. Распределительная сеть 10 кВ включает в себя две однотрансформаторные и две двухтрансформаторные КТП. Структурная схема распределительной сети 10 кВ представлена на рисунке 11.

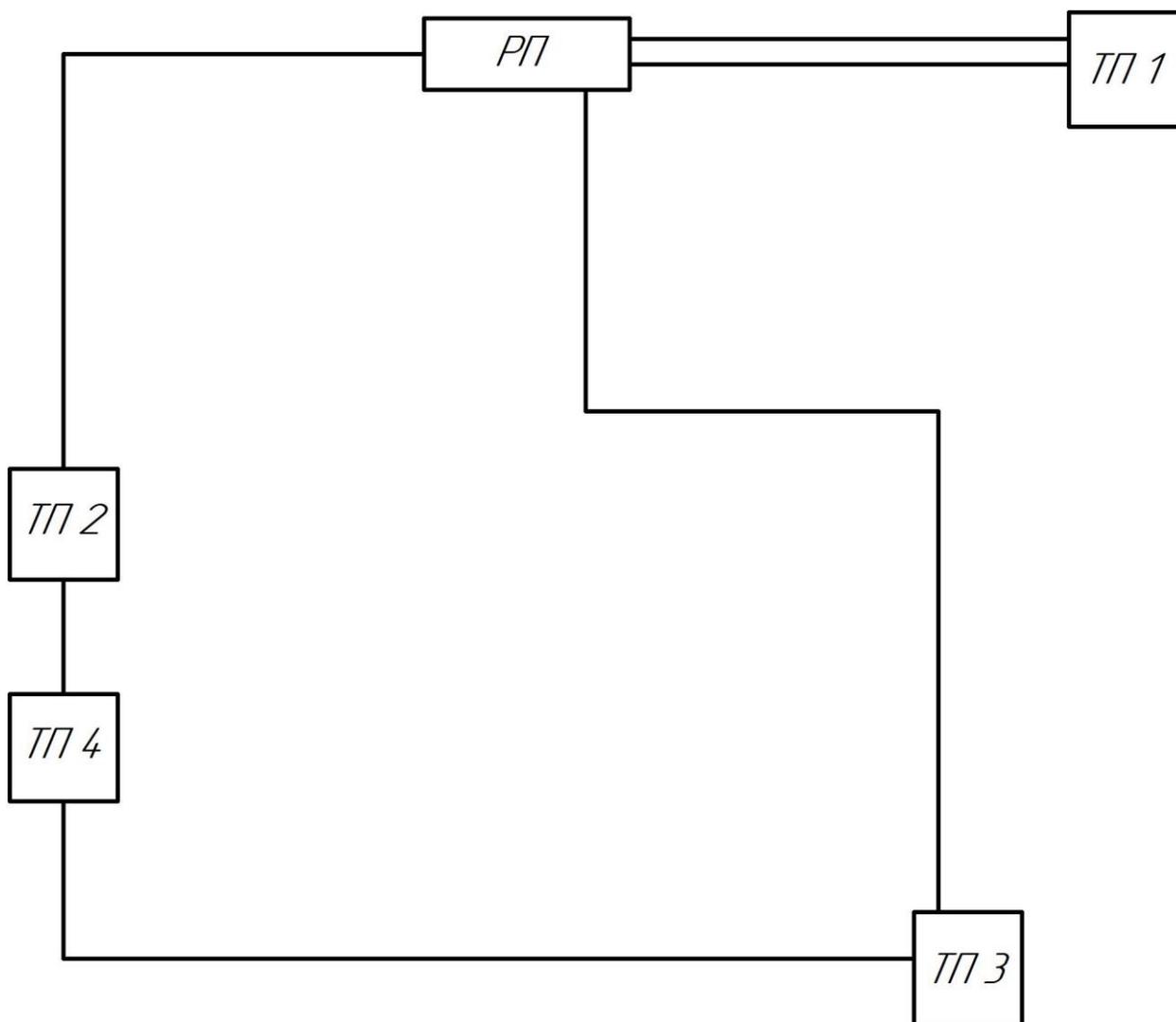


Рисунок 11 - Структурная схема распределительной сети 10 кВ

От ТП 1 запитаны общественный центр, сауна/бассейн, конюшня, ветеринарная клиника; от ТП 2 - пост охраны, 22 коттеджа и третья часть наружного освещения; от ТП 3 - поликлиника, детский сад - начальная школа, пасека, насосная станция; от ТП 4 - 40 коттеджей и две трети наружного освещения.

Электроприемники, питаемые ТП 1 относятся ко 2 категории по надёжности электроснабжения, питаемые ТП 2 - к 3 категории, ТП 3 - ко 2 категории, к ТП 4 - к 3 категории.

Таким образом, схема выполнена с соблюдением требуемой надёжности потребителей - трансформаторные подстанции, питающие потребителей 2 категории надёжности, имеют два независимых источника питания. Другими словами, для потребителей 2 категории предусмотрено резервирование питания, а для потребителей 3 категории нет.

Распределительная сеть 0,4 кВ выполнена по радиально - магистральной схеме соединения.

Схема электроснабжения посёлка представлена на рисунке 12.

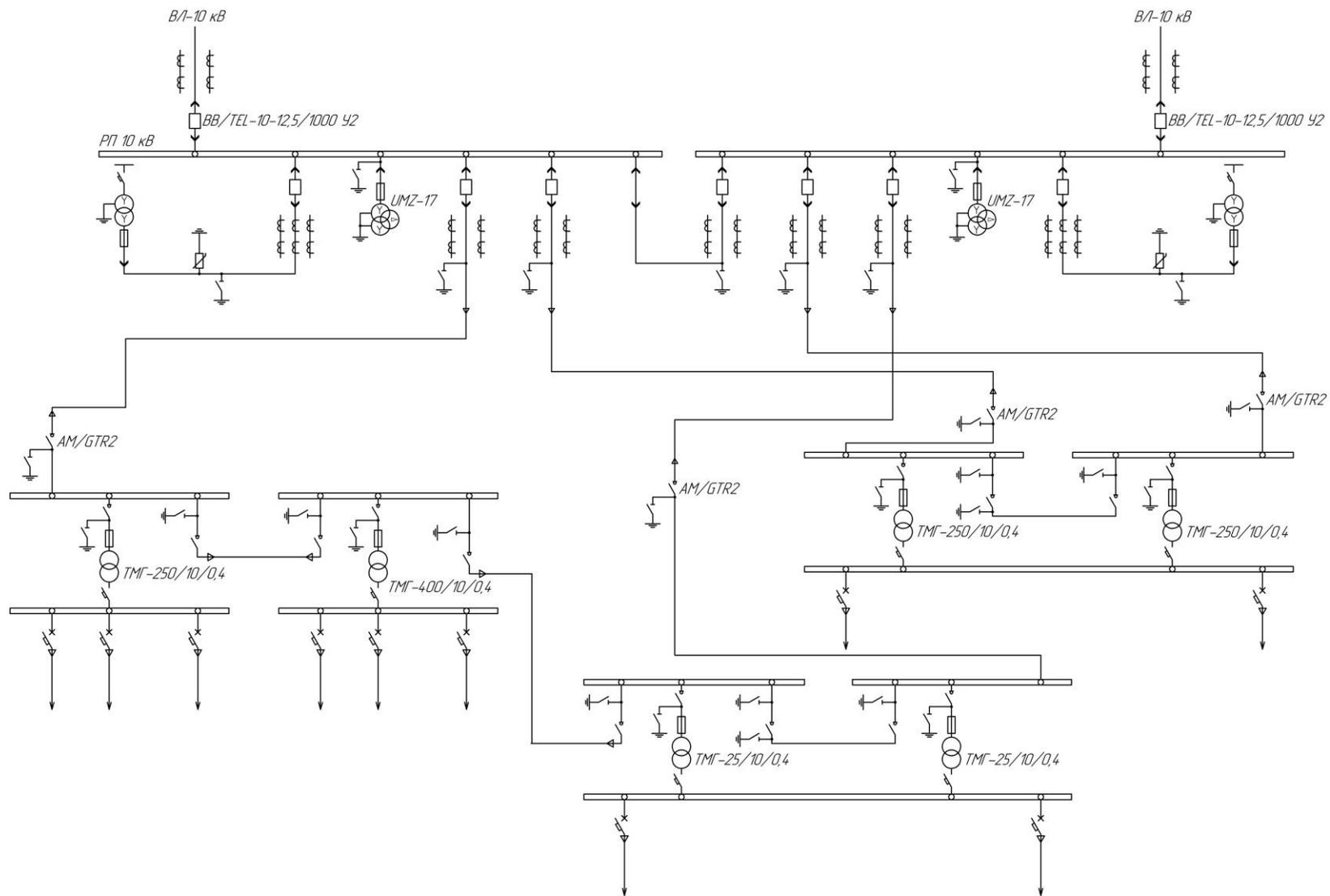
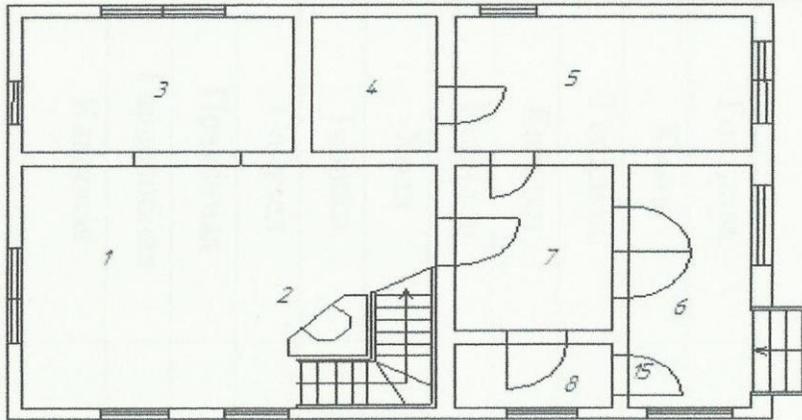


Рисунок 12 – Схема электроснабжения посёлка

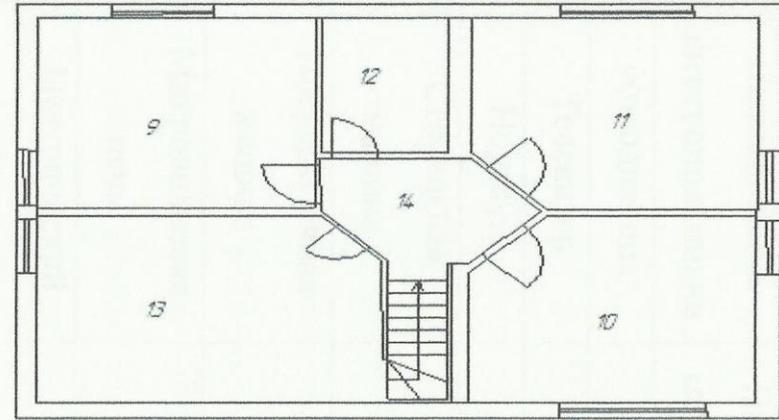
2.3 Объект исследования

Как уже было сказано выше, для повышения надёжности электроснабжения коттеджа используем электроустановку, работающую на альтернативных источниках энергии в качестве основного источника питания для его электроприемников. Электрическая сеть будет выступать в качестве резервного источника питания.

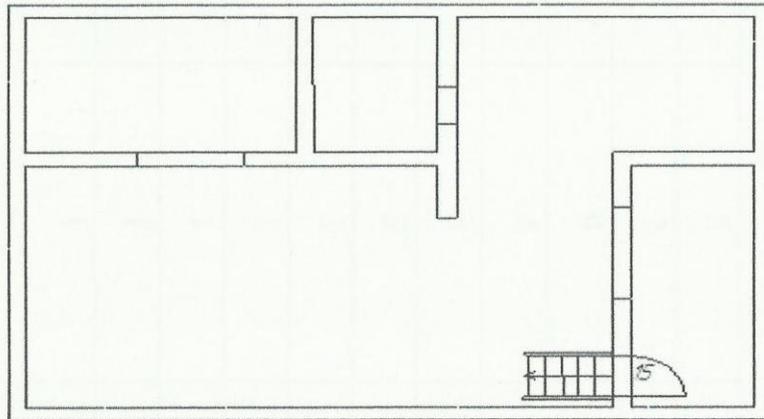
На территории коттеджного посёлка «Сад» расположены коттеджи различной этажности и площади. Рассмотрим в качестве объекта проводимого исследования двухэтажный коттедж с подвалом общей площадью 150 м². Посёлок газифицирован, поэтому плита в коттедже газовая. Поэтажный план коттеджа приведён на рисунке 13. В коттедже проживает семья из четырёх человек.



1 - й этаж



2 - й этаж



Подвал

- 1 - гостиная, 2 - камин,
 3 - кухня, 4 - прачечная,
 5 - санузел, 6 - терраса,
 7 - холл, 8 - гардеробная,
 9-11 - спальня, 12 - кладовая, 13 - кабинет, 14 - коридор,
 15 - вход в подвал.

Рисунок 13 - Поэтажный план коттеджа

Расчётная электрическая нагрузка для такого коттеджа в соответствии с РД 34.20.185 - 94 - «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» составляет 11,5 кВт. Рассчитаем, какова суммарная мощность электроприемников рассматриваемого коттеджа. Необходимо учесть, что бытовая техника, установленная в коттедже, имеет класс энергосбережения А и выше, а освещение осуществляется светодиодными лампами, которые при световом потоке, аналогичном лампе накаливания мощностью 100 Вт потребляют всего 7 Вт [30, 31]. В таблице 3 приведён перечень электроприемников коттеджа.

Таблица 3 - Перечень электроприемников коттеджа

Наименование электроприемника	Номинальная мощность, кВт	Количество, шт.	Общая мощность, кВт
Холодильник	0,3	1	0,3
Телевизор	0,2	3	0,6
Ноутбук	0,06	4	0,24
Стиральная машина	0,9	1	0,9
Посудомоечная машина	0,8	1	0,8
Микроволновая печь	1,0	1	1,0
Электрический чайник	1,7	1	1,7
Утюг	0,8	1	0,8
Пылесос	1,2	1	1,2
Освещение			
Гостиная	0,007	8	0,056
Кухня	0,007	2	0,014
3 спальни	0,007	9	0,063
Кабинет	0,007	4	0,028
Коридор	0,007	3	0,021
Холл	0,007	3	0,021
Терраса	0,007	3	0,021
Санузел	0,007	1	0,007
Прачечная	0,007	1	0,007
Гардеробная	0,007	1	0,007
Кладовая	0,007	1	0,007
Подвал	0,007	6	0,042
Итого освещение			0,315
Итого			7,834

При подсчёте количества ламп учитывались все возможные в помещении светильники: потолочные, настенные.

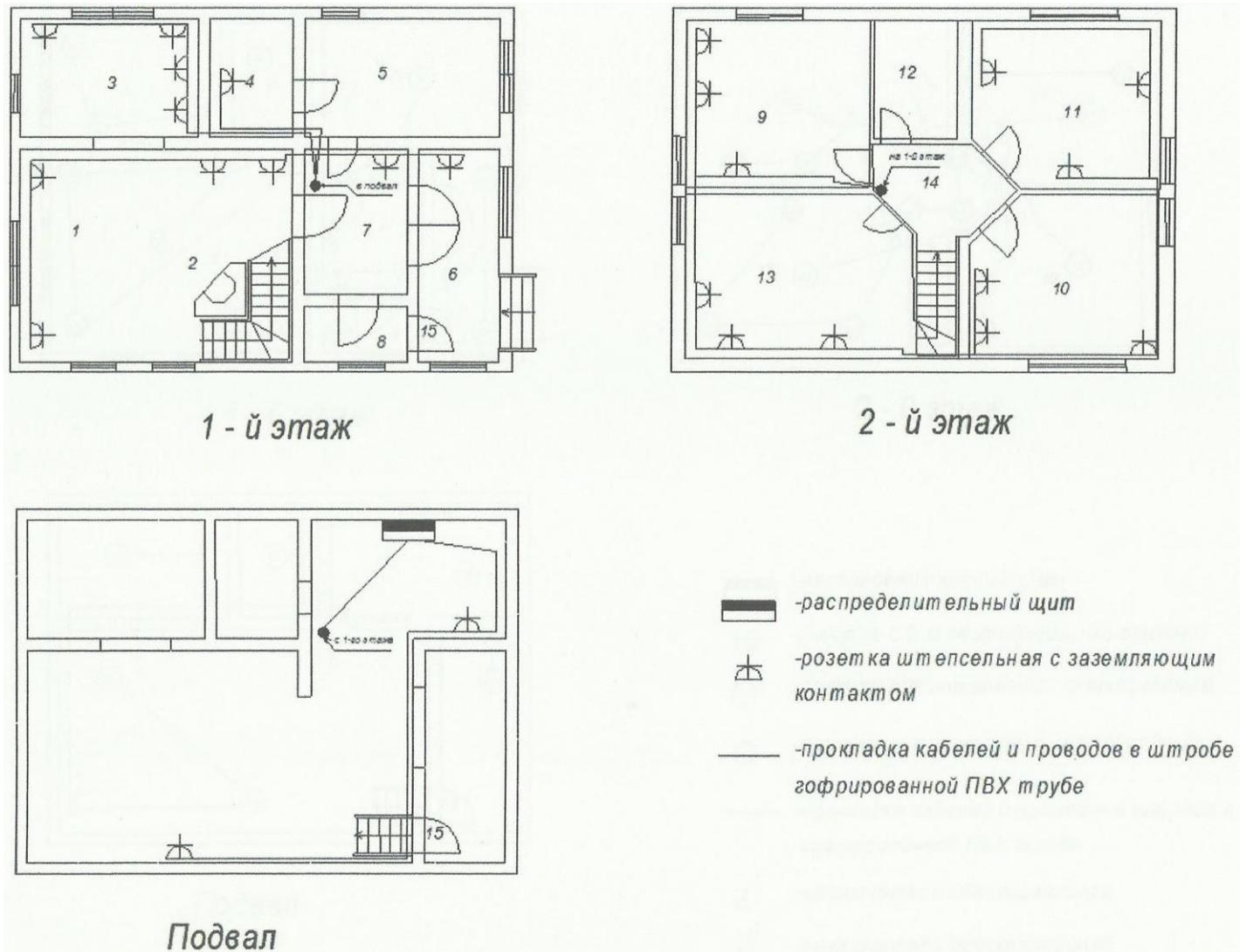
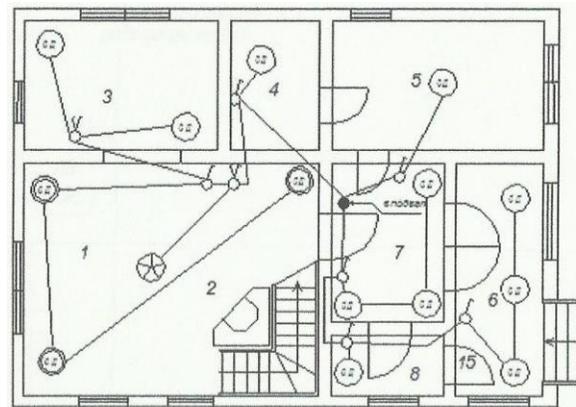
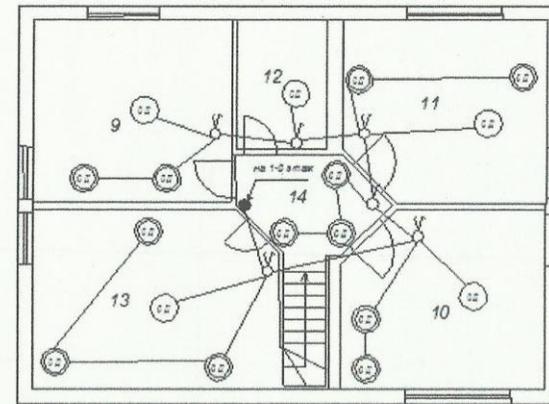


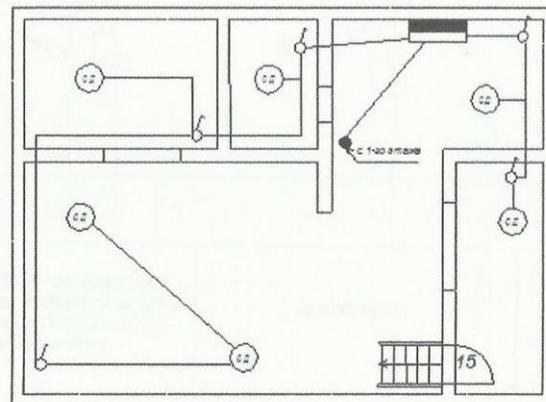
Рисунок 14 - План коттеджа с расположением розеток



1 - й этаж



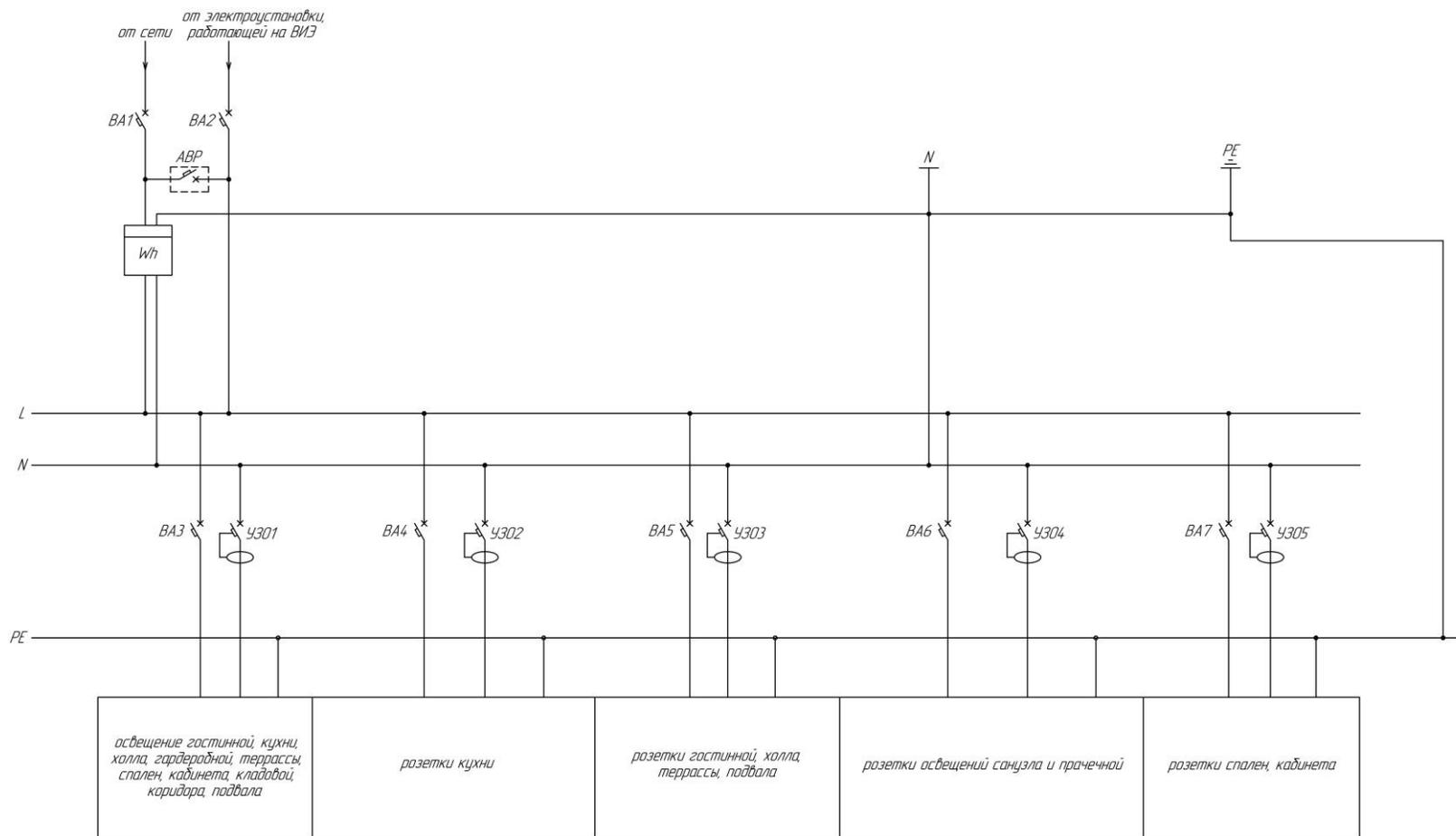
2 - й этаж



Подвал

-  -распределительный щит
-  -люстра с 5-ю светодиодными лампами
-  -светильник потолочный светодиодный
-  -светильник настенный светодиодный
-  -прокладка кабелей и проводов в штробе в гофрированной ПВХ трубе
-  -выключатель одноклавишный
-  -выключатель двухклавишный

Рисунок 15 - План коттеджа с расположением осветительных приборов



BA1 – BA7 – вводные автоматы; УЗО1 – УЗО5 – устройства защитного отключения; АВР – автоматическое включение резерва; Wh – счетчик электрической энергии однофазный

Рисунок 16 - Схема распределительного щита коттеджа

На рисунке 14 показано расположение розеток в коттедже, на рисунке 15 - расположение осветительных приборов.

Схема распределительного щита коттеджа представлена на рисунке 16. Питание нагрузки осуществляется от электроустановки, работающей на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). В случае разрядки аккумуляторов питание с помощью АВР переводится на электрическую сеть.

Далее рассчитаем параметры электроустановок, работающих на альтернативном источнике энергии для питания нагрузки общей мощностью 7,834 кВт.

2.4 Питание от фотоэлектрической системы

Фотоэлектрическая система (солнечная электроустановка) состоит из солнечных батарей, аккумулятора, зарядного устройства аккумулятора (контроллера), инвертора, соединительных кабелей. Для работы параллельно с сетью необходимо также устройство автоматического включения резерва (АРВ).

Структурная схема солнечной электроустановки используемой параллельно с сетью представлена на рисунке 17.

Расчёт параметров фотоэлектрической системы можно разделить на 3 основных этапа:

- Определение нагрузки и потребляемой энергии;
- Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества;
- Определение необходимого количества фотоэлектрических модулей, исходя из данных по приходу солнечной радиации в месте установки системы.

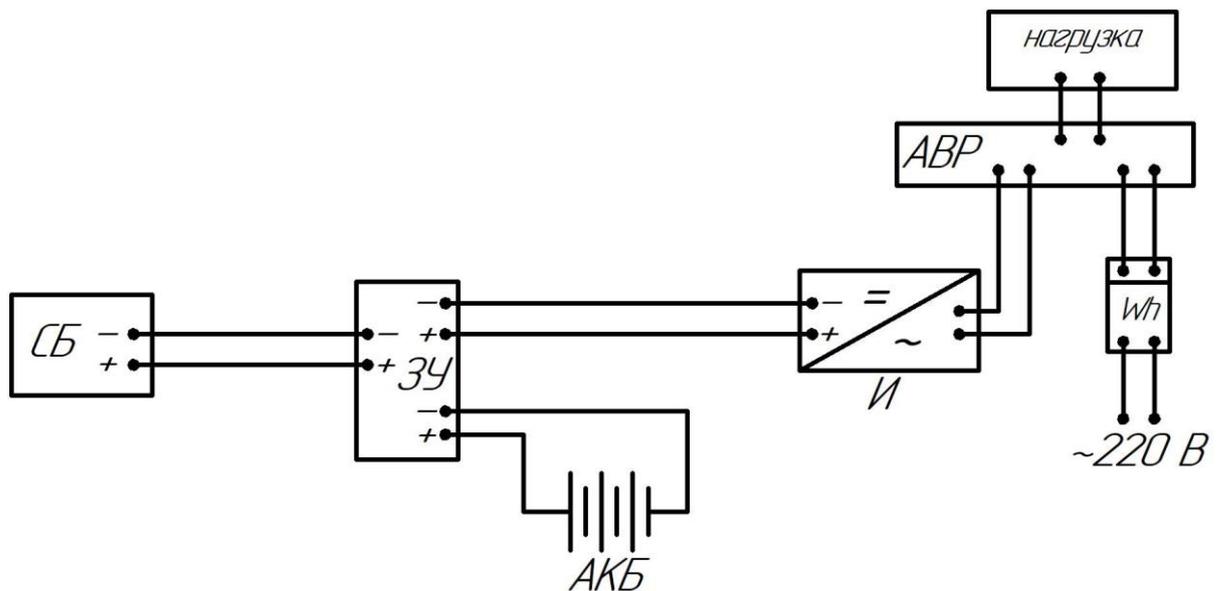


Рисунок 17 - Использование солнечной электроустановки параллельно с сетью

2.4.1 Определение нагрузки и потребляемой энергии

Максимальная нагрузка переменного тока в соответствии с таблицей 3 составляет $P_{\text{max.пер.}}=7,834$ кВт. Рассчитаем суточное энергопотребление электроприемников $W_{\text{пер.}}$, умножив их мощность на число часов работы в сутки (таблица 4). Холодильник работает 24 часа в сутки, однако в течение этого времени потребляемая им мощность ниже номинальной, поэтому примем к счёту паспортное значение суточного энергопотребления. Пылесос пользуется не каждый день. В среднем он работает 3 раза в неделю по 30 минут, то есть 1,5 часа в 7 дней. Тогда на один день придётся 0,2 часа его работы. Стиральная машина также работает не каждый день. В среднем она совершает по 2 цикла стирки 3 раза в неделю, то есть получается 6 циклов в неделю или 0,85 цикла в час.

Таблица 4 - Суточное энергопотребление электроприемников

Наименование электроприемника	Номинальная мощность, кВт	Количество, шт.	Общая мощность, кВт	Время работы в сутки, ч	Потребляемая за сутки электроэнергия, кВт·ч
Холодильник	-	-	-	-	0,6
Телевизор	0,2	3	0,6	4	2,4
Ноутбук	0,06	4	0,24	4	0,96
Стиральная машина	0,9	1	0,9	0,75	0,68
Посудомоечная машина	0,8	1	0,8	0,6	0,48
Микроволновая печь	1,0	1	1,0	0,3	0,3
Электрический чайник	1,7	1	1,7	0,15	0,26
Утюг	0,8	1	0,8	0,2	0,16
Пылесос	1,2	1	1,2	0,2	0,24
Освещение					
Гостиная	0,007	8	0,056	5	0,280
Кухня	0,007	2	0,014	2	0,028
3 спальни	0,007	9	0,063	12	0,756
Кабинет	0,007	4	0,028	3	0,084
Коридор	0,007	3	0,021	0,5	0,011
Холл	0,007	3	0,021	0,5	0,011
Терраса	0,007	3	0,021	1	0,021
Санузел	0,007	1	0,007	2	0,014
Прачечная	0,007	1	0,007	0,25	0,001
Гардеробная	0,007	1	0,007	0,5	0,003
Кладовая	0,007	1	0,007	0,16	0,001
Подвал	0,007	6	0,042	0,25	0,001
Итого освещение					1,211
Итого					7,291

Чтобы определить на какое время суток приходится пик нагрузки и в течение какого времени он продолжается, построим суточный график нагрузки коттеджа (рисунок 18).

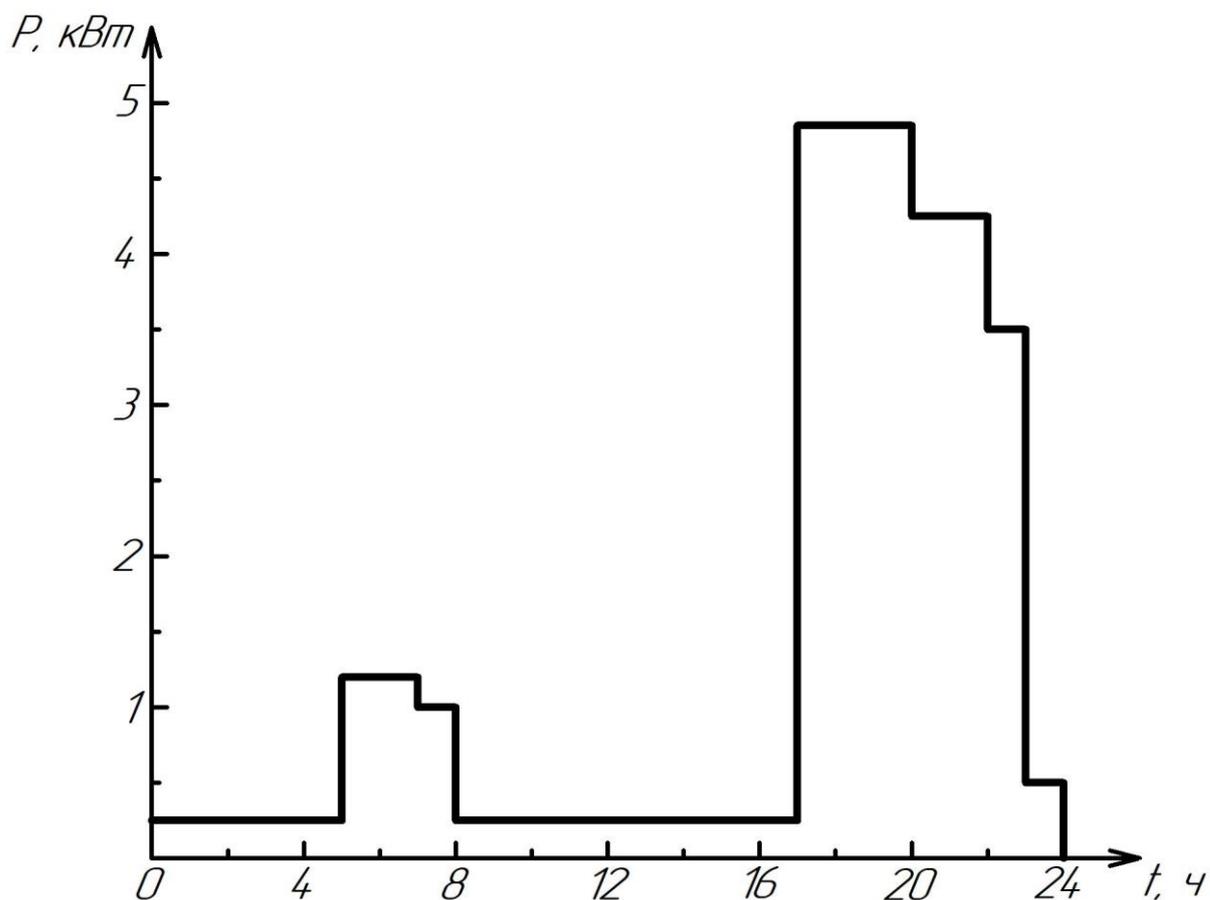


Рисунок 18 - Суточный график нагрузки коттеджа

Как видно из графика, пик нагрузки составляет 4,8 кВт и продолжается с 17.00 до 20.00, то есть в течение трёх часов. Как правило в это время солнце близится к закату, поэтому питание нагрузки обеспечивают аккумуляторные батареи.

Чтобы определить требуемую энергию постоянного тока, умножим получившееся значение суточного энергопотребления нагрузки переменного тока на коэффициент, учитывающие потери в инверторе ($K_{инв}$):

$$W_{пост} = W_{пер} \cdot K_{инв} \quad (9)$$

$$W_{пост} = 7,291 \cdot 1,12 = 8,02 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Входное напряжение инвертора принимаем $U_{инв}=24$ В. Разделив полученное значение $W_{пост}$ на величину входного напряжения инвертора, получим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки.

$$W_{Ач} = \frac{W_{пост}}{U_{инв}} \quad (10)$$

$$W_{Ач} = \frac{8,02}{24} = 0,334 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

2.4.2 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества

Далее необходимо выбрать аккумуляторы, которые будут использоваться в фотоэлектрической системе. Существуют различные типы аккумуляторных батарей. Рассмотрим основные и выберем наиболее подходящий.

Никелево-кадмиевые (Ni-Cd) аккумуляторы.

«На сегодняшний день более 50% всех аккумуляторов для портативного оборудования являются никелево-кадмиевыми.

Основные преимущества этого типа аккумуляторов:

- низкая стоимость;
- высокая устойчивость к перепадам температур;
- хорошая устойчивость к большим токам заряда и разряда, так как малое внутреннее сопротивление позволяет отдавать большие токи (другие типы аккумуляторов это не устраивает);
- большое количество циклов «заряда-разряда».

Среди всех типов аккумуляторов никелево-кадмиевый - единственный, который лучше всего отдает максимальную емкость, обеспечивает большое количество циклов заряда, разряда, если периодически осуществляются глубокие разряды (до 1 В на элемент).

Недостатки никелево-кадмиевого типа аккумулятора:

- наличие так называемого «эффекта памяти» (в настоящий момент под эффектом памяти понимается обратимая потеря ёмкости, имеющая место в некоторых типах электрических аккумуляторов при нарушении рекомендованного режима зарядки, в частности, при подзарядке не полностью разрядившегося аккумулятора. Название связано с внешним проявлением эффекта: аккумулятор как будто «помнит», что в предыдущие циклы работы его ёмкость не была использована полностью, и при разряде отдаёт ток до «запомненной границы»);

- данный тип аккумулятора экологически загрязнен, так как кадмий является высокотоксичным веществом. Также появляются дополнительные проблемы с его переработкой;

- сравнительно низкая удельная емкость, хотя и не во всех случаях это является критичным» [11].

Никелево-металлогидридный (Ni-MH) тип аккумулятора.

«Толчком к разработке и производству этого типа аккумуляторов явилась, главным образом, их более высокая плотность энергии по сравнению с Ni-Cd.

Некоторые из отличительных преимуществ сегодняшнего Ni-MH типа аккумулятора по сравнению с Ni-Cd:

- большая удельная емкость (при тех же габаритных размерах значение емкости на 30% больше);

- меньший вес;

- менее склонен к «эффекту памяти»;

- в состав данного типа аккумулятора входит меньшее количество токсичных металлов, и в настоящее время он считается экологически чистым.

К сожалению, Ni-MH тип аккумулятора обладает и недостатками по сравнению с Ni-Cd типом аккумулятора, а именно:

- имеет гораздо меньшее количество циклов заряда разряда;

- цена Ni-MH типа аккумулятора выше, чем Ni-Cd, хотя и не всегда может быть главной проблемой, если пользователь предпочитает небольшой размер и вес;

- температурный режим работы меньше, чем у Ni-Cd типа аккумулятора.

- по сравнению с Ni-Cd типом аккумулятора, у Ni-MH типа аккумулятора самая низкая нагрузочная способность - не может отдавать большие токи;

- этот тип аккумуляторов «боится» глубоких разрядов, так как долговечность батареи непосредственно связана с глубиной разряда;

- саморазряд более чем в 1,5 раза выше, чем у Ni-Cd типа аккумулятора, что является важным параметром при хранении;

- Ni-MH не любит большого зарядного тока, как Ni-Cd, так как в процессе зарядки выделяется значительно большее количество тепла. Кроме того, в зарядном устройстве требуется более сложный алгоритм для обнаружения полного заряда, чем для Ni-Cd типа аккумулятора.

Современная Ni-MH батарея оборудована внутренним считывателем температуры, чтобы помочь обнаружению полного заряда. Перезаряд аккумулятора в дешевом зарядном устройстве (ЗУ) (не имеющем автоматического отключения) может привести к перегреву и полному разрушению аккумулятора» [27].

Литиево-ионный (Li-Ion) тип аккумуляторных батарей.

«Главные преимущества литиево-ионного типа аккумуляторов:

- высокая удельная емкости Li-Ion, по крайней мере, в два раза большей чем у Ni-Cd типа аккумулятора;

- литий очень легкий металл, имеет самый большой электрохимический потенциал и обеспечивает самое большое содержание энергии;

- имеет относительно низкий саморазряд и в нем полностью отсутствует «эффект памяти».

- благодаря низкому саморазряду время от времени можно дозаряжать и не совсем разряженный аккумулятор. Количество циклов заряда-разряда по данным большинства производителей (так как у каждого производителя свои технологии и соответственно количество циклов несколько отличается) немного больше, чем у Ni-MH типа аккумулятора.

Основные недостатки литиево-ионного (Li-Ion) типа аккумуляторов:

- высокая стоимость;
- малый диапазон рабочих температур, хотя это и не всегда является критичным фактором.

В конструкции современных литиево-ионного (Li-Ion) типа аккумуляторов присутствуют так называемые smart-микросхемы. Это позволяет управлять зарядным устройством таким образом, чтобы процесс зарядки был наиболее эффективным в зависимости от проработавшего количества циклов заряда-разряда» [11].

Литиево-полимерный (Li-polymer) аккумулятор.

«Первоначальная концепция батареи литий-полимера основана на использовании твердого электролита на полимерной основе. Эта идея предусматривает технологичность в производстве, и соответственно низкую цену.

Основные преимущества Li-polymer батарей:

- большая плотность энергии, т.е. примерно в три раза выше, чем у никелево-кадмиевого типа аккумулятора;
- очень малый саморазряд;
- малые габариты.

Использование твердого электролита позволяет довести размеры элементов аккумулятора до 1 мм в толщине. Так как данная конструкция не содержит жидкого электролита и реализуется набором различных пленок, то можно получать очень гибкие конструктивные формы. Аккумулятор такого типа имеет очень малую толщину, что позволяет ему придавать необходимую форму (например, повторить форму сотового телефона).

Недостатки литиево-полимерного типа аккумулятора:

- не может отдавать большие токи разряда;
- не любит низких температур» [5].

Свинцово-кислотный (LEAD ACID) аккумулятор.

«В отличие от других типов аккумуляторов свинцово-кислотная батарея обычно используется, когда нужна большая емкость, требования к весу не критические и стоимость батареи должна сохраниться низкой.

Достоинства герметичных свинцово-кислотного (SLA) типа аккумуляторов:

- относительно невысокая стоимость;
- полное отсутствие «эффекта памяти»;
- низкий саморазряд;
- в современных герметичных свинцово-кислотных аккумуляторах, в зависимости от средней глубины разрядки, количество циклов может достигать 800-1000.

Недостатки SLA-батарей:

- среди перезаряжающихся батарей SLA имеют самую низкую предельную емкость, хотя во многих случаях это может быть и некритичным;
- отличие от Ni-Cd SLA страшны глубокие циклы разряда (это непосредственно ведет к сокращению количества циклов заряда-разряда)» [8].

По результатам проведенного анализа принимаем к использованию герметичные необслуживаемые свинцово - кислотные аккумуляторы. А точнее гелиевые свинцово кислотные аккумуляторы, которые наиболее рекомендованы для применения в системах, использующих возобновляемые источники энергии. Конструкция гелиевых аккумуляторов представляет собой модификацию свинцово - кислотного аккумулятора. К электролиту добавляется гелиевый компонент для сокращения движения внутри аккумулятора. Во многих гелиевых аккумуляторах также используются

одноходовые клапаны вместо открытых воздушных, это способствует тому, что выделяющиеся газы снова растворяются в воде внутри аккумулятора, подавляется газообразование. В аккумуляторах на «гелиевых элементах» исключено пролитие даже в случае поломки. Гелиевые аккумуляторы допускают разрядку до 60% практически без сокращения срока службы.

Далее необходимо определить их ёмкость с учётом количества дней, в течение которых аккумуляторная батарея будет питать нагрузку самостоятельно = n. Предположим, что максимальное число дней без солнца n=6. Тогда максимальное энергопотребление, которое должна удовлетворить батарея без подзаряда составит:

$$W_{\max} = W_{Ac} \cdot n \quad (11)$$

$$W_{\max} = 0,334 \cdot 6 = 2,004 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Необходимо задать глубину разряда батареи $K_{\text{разр}}$. Для выбранного типа аккумулятора максимальная глубина разряда 60 %.

Тогда требуемая ёмкость составит:

$$W_{\text{треб}} = \frac{W_{\max}}{K_{\text{разр}} / 100\%} \quad (12)$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{2,004}{60 / 100} = 3,34 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

С учётом зависимости ёмкости батареи от температуры помещения, в котором она будет располагаться, требуемая ёмкость составит:

$$W_{AB} = W_{\text{треб}} \cdot K_{o.c.} \quad (13)$$

$$W_{AB} = 3,34 \cdot 1,04 = 3,47 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

где $K_{o.c.}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение ёмкости батареи при понижении температуры окружающей среды (взято для температуры 21 °С).

Рассмотрим несколько вариантов гелиевых аккумуляторных батарей и выберем наиболее подходящую. Варианты и их характеристики представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Аккумуляторные батареи

Параметры	Haze HZY-24-230	Ventura GPL 24-250	Prosolar R RA24-260DG
Ёмкость, А·ч	230	250	260
Номинальное напряжение, В	24	24	24
Диапазон рабочих температур, °С	от -20 до +50	от -20 до +50	от -20 до +50
Срок службы, лет	10-15	10-15	10-15
Габариты (Д×В×Ш), мм	521×269×203	521×269×220	520×268×212
Цена, руб.	14300	13500	15800

Выбираем аккумуляторные батареи Prosolar R RA24-260DG ёмкостью $W_{ном}=0,260$ кА·ч на номинальное напряжение 24 В. Они имеют оптимальные габаритные параметры, и при этом приемлемы по цене.

Количество параллельно соединённых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$n = \frac{W_{AB}}{W_{ном}} \quad (14)$$

$$n = \frac{3,47}{0,26} = 13,3 \approx 14$$

Число аккумуляторных батарей получилось достаточно большое в то время как стоимость их довольно высока. Такое количество аккумуляторов

гарантирует электроснабжение коттеджа даже в случае максимального количества дней без солнца подряд, и в то же время гарантирует очень длительные сроки окупаемости. Однако, как правило, число дней без солнца на территории Самарской области обычно меньше 6. Вполне возможно сократить количество аккумуляторных батарей, приняв число дней без солнца подряд равным 2. В случае разряда аккумуляторных батарей (число дней без солнца окажется больше 2) их подзарядку можно осуществить от основной электрической сети.

Рассмотрим вариант, когда число дней без солнца равно 2. Тогда:

$$W_{\max} = 0,334 \cdot 2 = 0,668 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{0,668}{\frac{60}{100}} = 1,11 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$W_{AB} = 1,11 \cdot 1,04 = 1,16 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$n = \frac{1,16}{0,26} = 4,4 \approx 5$$

2.4.3 Определение необходимого количества фотоэлектрических модулей

Прежде всего, необходимо определить число пиковых солнце-часов в день.

Несколько факторов влияют на то, как много солнечной энергии будет принимать солнечная батарея:

- в какое время года будет использоваться система;
- типичные погодные условия местности;
- будет ли система ориентироваться на солнце;
- расположение и угол наклона фотоэлектрических модулей.

Выработка электроэнергии солнечной батареей зависит от угла падения на нее солнечных лучей. Максимум бывает при угле 90 градусов. При

отклонении от этого угла все большее количество лучей отражается, а не поглощается солнечной батареей.

Для надежного электроснабжения выбираем из среднемесячных значений наименьшее для периода, в течение которого будет использоваться ФЭС.

Выбранное среднемесячное значение для худшего месяца нужно разделить на число дней в месяце. Получим среднемесячное число пиковых солнце-часов. Для рассматриваемой местности количество пиковых солнце-часов равно 6.

Для определения тока, который должна генерировать солнечная батарея, разделим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки, на число пиковых солнце-часов:

$$I_{м.р.} = \frac{W_{Ач} \cdot K_{ак}}{t_{пик}} \quad (15)$$

$$I_{м.р.} = \frac{334 \cdot 1,2}{6} = 66,8 \text{ А}$$

где $K_{ак}$ - коэффициент, учитывающий потери на заряд-разряд аккумуляторной батареи.

В таблице 6 представлены несколько вариантов солнечных батарей их характеристики.

Таблица 6 - Солнечные батареи

Параметры	ТСМ-220А	RZMP-220-T	MSW185/100
Мощность, Вт	230	230	185
Напряжение, В	24	24	24
Ток, А	12,8	8,7	6,5
Габариты (Д×В×Ш), мм	1633×1006×38	1642×984×36	1575×807×46
Диапазон рабочих температур, °С	от -40 до +70	от -40 до +85	от -40 до +85
Цена, руб.	29000	27000	26800

Выбираем модуль ТСМ-220А с максимальным током $I_m=12,8$ А на напряжение 24 В, так как он имеет оптимальные габаритные показатели и максимальный ток.

Необходимое количество параллельно соединённых модулей определяется по формуле:

$$n = \frac{I_{м.р.}}{I_m} \quad (16)$$
$$n = \frac{66,8}{12,8} = 5,2 \approx 6$$

Номинальное напряжение постоянного тока системы и номинальное напряжение модуля совпадают, поэтому последовательно соединённых батарей не требуется.

Кроме того, необходимо выбрать инвертор и зарядное устройство (контроллер).

2.4.4 Выбор инвертора

Инвертор. напряжения (ИН) - устройство, преобразующие электрическую энергию источника напряжения постоянного тока в электрическую энергию переменного тока.

«Инверторы могут применяться в виде отдельного законченного устройства или входить в состав источников и систем бесперебойного питания аппаратуры электрической энергией переменного тока. Как и любое другое силовое устройство, инвертор должен иметь высокий КПД, обладать высокой надежностью и иметь приемлемые массогабаритные характеристики. Кроме того, инвертор должен иметь допустимый уровень высших гармонических составляющих в кривой выходного напряжения (допустимое значение коэффициентов гармоник) и не создавать при работе недопустимый для других потребителей уровень пульсации на зажимах источника энергии» [24].

Выделяют три основные схемы инверторов напряжения:

- С нулевым выходом источника (полумостовой ИН).

Область применения: устройства бесперебойного питания мощностью лее 500 ВА, установки с высоким значением энергии (220...360 В).

- С нулевым выводом трансформатора.

Область применения: устройства бесперебойного питания компьютеров мощностью (250...500 ВА), при низком значении напряжения (12...24 В), преобразователи напряжения для подвижных систем радиосвязи.

- Мостовая схема.

Область применения: устройства бесперебойного питания ответственных потребителей с широким диапазоном мощностей.

Наиболее часто применяется мостовая схема. На рисунке 19 приведена однофазная мостовая схема инвертора напряжения, а на рисунке 20 - диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие её работу.

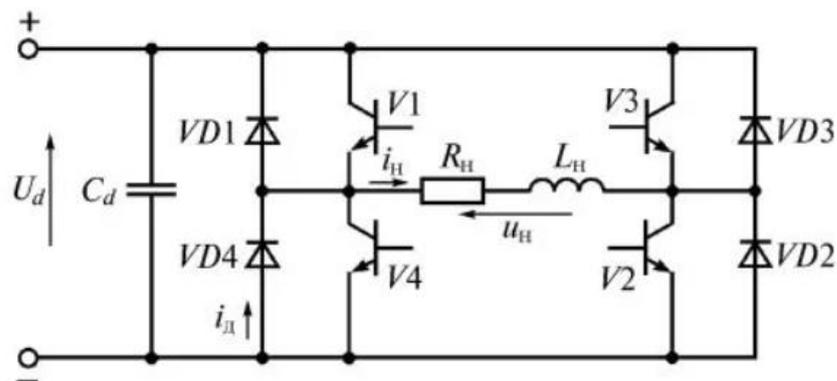


Рисунок 19 - Однофазная мостовая схема инвертора напряжения

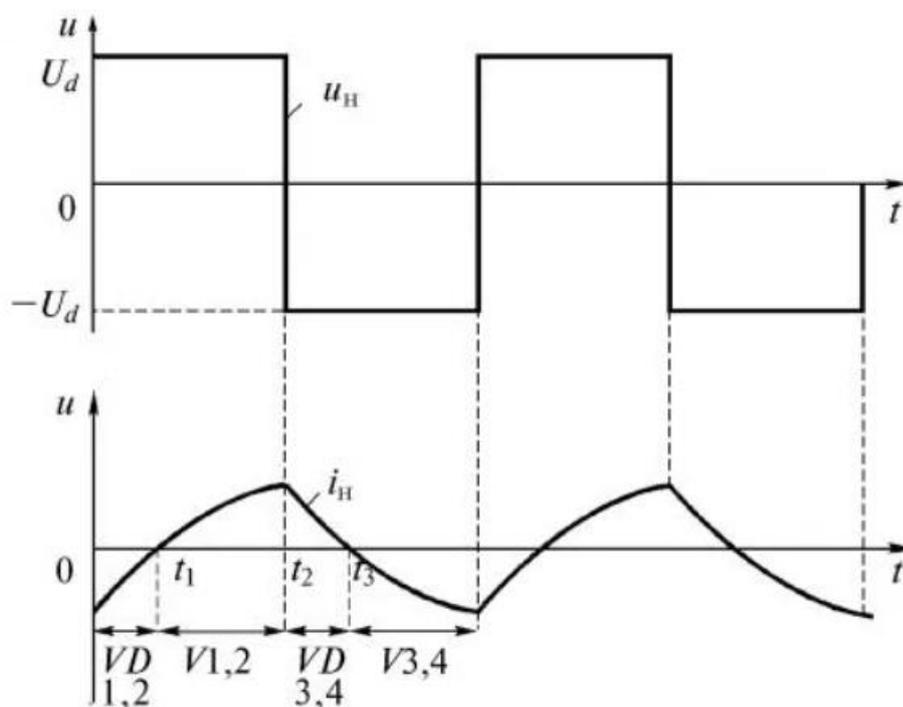


Рисунок 20 - Диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие работу однофазной мостовой схемы инвертора напряжения

Пары транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 образуют диагонали моста, а пары транзисторов VT1, VT4 и VT2, VT3 образуют стойки моста. При парном включении транзисторов VT1, VT2 или VT3, VT4 знаки напряжения нагрузке противоположны. Рассмотрим подробнее процессы при работе АИН на активно-индуктивную нагрузку. При включении транзисторов VT1, VT2 с момента t_1 ток проходит по цепи +, VT1, R_n , L_n , VT2 - источника питания. После выключения транзисторов VT1, VT2 в момент t_2 управляющие импульсы подаются на транзисторы VT3, VT4, но они не могут включиться, так как ток в индуктивности не может мгновенно изменить направление. Поэтому, после выключения транзисторов VT1, VT2 ток проходит по цепи L_n , VD3, источник питания, VD4, R_n . Энергия, запасенная в индуктивности нагрузки, возвращается в источник питания. После спада тока до нуля в момент t_3 открываются транзисторы VT3, VT4 и ток в нагрузке меняет направление. Далее процессы идут аналогично. Трёхфазная мостовая схема инвертора напряжения приведена на рисунке 21.

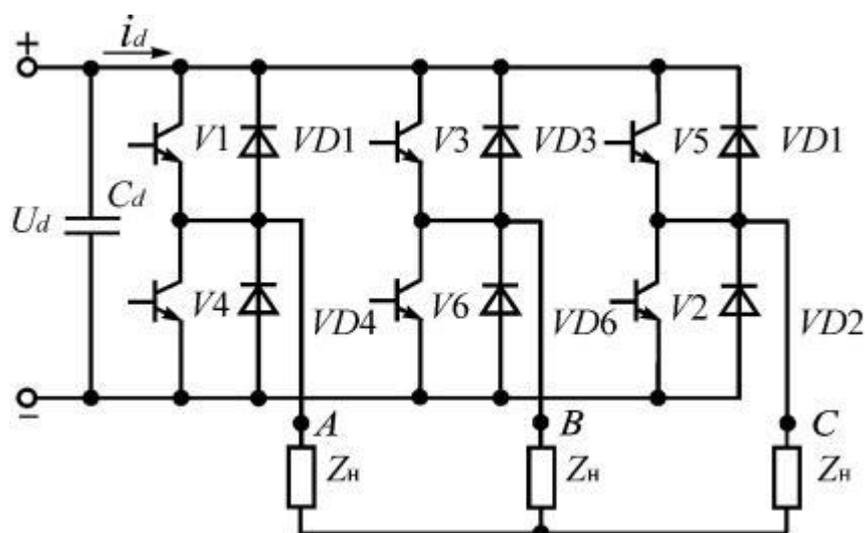


Рисунок 21 - Трёхфазная мостовая схема инвертора напряжения

Исходя из вышесказанного, остановим выбор на инверторе, выдающем синусоидальное напряжение. Согласно суточному графику нагрузки (рисунок 18) пиковая мощность составляет 4,8 кВт, значит мощность должна быть больше или равна 4,8 кВт.

В таблице 7 представлены несколько вариантов инверторов и их характеристики.

Таблица 7 - Модели инверторов

Параметры	RE CombiPlus CP-3000 (ББП)	Victron MultiPlus 24/3000/70-50 (ББП)	Quattro 24/8000/190-100/100
Номинальная мощность, кВт	6	6	8
Номинальное входное напряжение, В	24	24	24
Номинальное выходное напряжение, В	230±3%	230±4%	230±1%
Длительный ток зарядки, А	140	120	190
Гармонические искажения, %	< 5	4	3
Форма волны	Чистая синусоида	Чистая синусоида	Чистая синусоида
Цена, руб.	97000	93000	120000

Выбираем инвертор Victron MultiPlus 24/3000/70-50 (ББП). В инвертор строено зарядное устройство, осуществляется функция контроля заряда.

2.4.5 Выбор зарядного устройства (контроллера)

«Простейшие контроллеры просто отключают источник энергии (солнечную батарею) при достижении номинального напряжения на аккумуляторной батарее (АБ). При снижении напряжения на АБ снова подключается солнечная батарея и заряд возобновляется. При этом максимальный уровень заряженности АБ при этом составляет 60-70%. При регулярном недозаряде происходит сульфатация пластин и резкое сокращение срока службы АБ.

Более сложные контроллеры на завершающей стадии заряда используют так называемую широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) тока заряда. При этом возможен заряд АБ до 100%.

Заряд аккумулятора от солнечной батареи имеет 4 стадии:

- Заряд максимальным током.

На этой стадии батарея получает весь ток, поступающий от солнечных модулей.

- ШИМ заряд.

Когда напряжение на АБ достигает определенного уровня, контроллер начинает поддерживать постоянное напряжение за счет ШИМ тока заряда. Это предотвращает перегрев и газообразование в аккумуляторе. Ток постепенно уменьшается по мере заряда аккумуляторной батареи.

- Выравнивание.

Многие батареи с жидким электролитом улучшают свою работу при периодическом заряде до газообразования, при этом выравниваются напряжения на различных банках АБ и происходит очищение пластин и перемешивание электролита.

- Поддерживающий заряд.

Когда АБ полностью заряжена, зарядное напряжение уменьшается для предотвращения дальнейшего нагрева или газообразования в батарее. АБ поддерживается в заряженном состоянии» [10].

Отдельно зарядное устройство выбирать нет необходимости, так как оно уже встроено в инвертор.

2.4.6 Питание части нагрузки от фотоэлектрической системы

Затраты на оснащение коттеджа фотоэлектрической системой, способной питать всю нагрузку, достаточно велики. Они составляют около 400000 руб. при варианте подзарядки аккумуляторов от сети в случае их разрядки (т.е. когда число дней без солнца равно 2). Срок окупаемости у такой системы будет значительно больше срока службы. Рассмотрим вариант питания от фотоэлектрической системы части нагрузки коттеджа. В таблице 8 представлена часть электроприемников коттеджа, запитанная от фотоэлектрической системы.

Таблица 8 - Электроприемники, запитанные от фотоэлектрической системы

Наименование электроприемника	Номинальная мощность, кВт	Количество, шт.	Общая мощность, кВт
Холодильник	0,3	1	0,3
Телевизор	0,2	1	0,2
Ноутбук	0,06	2	0,12
Освещение			
Гостиная	0,007	8	0,056
Кухня	0,007	2	0,014
3 спальни	0,007	9	0,063
Кабинет	0,007	4	0,028
Холл	0,007	3	0,021
Итого освещение			0,182
Итого			0,802

В таблице 9 представлено суточное потребление вышеназванной нагрузки.

Таблица 9 - Суточное потребление электроприемников, запитанных от фотоэлектрической системы

Наименование электроприемника	Номинальная мощность, кВт	Количество, шт.	Общая мощность, кВт	Время работы в сутки, ч	Потребляемая за сутки электроэнергия, кВт·ч
Холодильник	-	-	-	-	0,6
Телевизор	0,2	1	0,2	4	0,8
Ноутбук	0,06	2	0,12	4	0,48
Освещение					
Гостиная	0,007	8	0,056	5	0,280
Кухня	0,007	2	0,014	2	0,028
3 спальни	0,007	9	0,063	12	0,756
Кабинет	0,007	4	0,028	3	0,084
Холл	0,007	3	0,021	0,5	0,011
Итого освещение					1,159
Итого					3,039

Чтобы определить требуемую энергию постоянного тока, умножим получившееся значение суточного энергопотребления нагрузки переменного тока на коэффициент, учитывающие потери в инверторе ($K_{инв}$):

$$W_{пост} = W_{пер} \cdot K_{инв} \quad (17)$$

$$W_{пост} = 3,039 \cdot 1,1 = 3,34 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Входное напряжение инвертора принимаем $U_{инв}=24$ В. Разделив полученное значение $W_{пост}$ на величину входного напряжения инвертора, получим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки.

$$W_{Ач} = \frac{W_{пост}}{U_{инв}} \quad (18)$$

$$W_{Ач} = \frac{3,34}{24} = 0,139 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Определим ёмкость аккумуляторных батарей. Максимальное количество дней без солнца $n=6$. Тогда максимальное энергопотребление, которое должна удовлетворить батарея без подзаряда составит:

$$W_{\max} = W_{Ac} \cdot n \quad (19)$$

$$W_{\max} = 0,139 \cdot 6 = 0,834 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Тогда требуемая ёмкость с учётом глубины разряда аккумулятора составит:

$$W_{\text{треб}} = \frac{W_{\max}}{K_{\text{разр}} / 100\%} \quad (20)$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{0,834}{60 / 100} = 1,39 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

С учётом зависимости ёмкости батареи от температуры помещения, в котором она будет располагаться, требуемая ёмкость составит:

$$W_{AB} = W_{\text{треб}} \cdot K_{o.c.} \quad (21)$$

$$W_{AB} = 1,39 \cdot 1,04 = 1,45 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

где $K_{o.c.}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение ёмкости батареи при понижении температуры окружающей среды (взят для температуры 21 °С).

Выбираем аккумуляторные батареи Prosolar R RA24-260DG ёмкостью $W_{\text{ном}}=0,260$ кА·ч на номинальное напряжение 24 В. Они имеют оптимальные габаритные параметры, и при этом приемлемы по цене.

Количество параллельно соединённых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$n = \frac{W_{AB}}{W_{ном}} \quad (22)$$

$$n = \frac{1,45}{0,26} = 5,6 \approx 6$$

Для определения тока, который должна генерировать солнечная батарея, разделим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки, на число пиковых солнце-часов:

$$I_{м.р.} = \frac{W_{Ач} \cdot K_{ак}}{t_{пик}} \quad (23)$$

$$I_{м.р.} = \frac{139 \cdot 1,2}{6} = 27,8 \text{ А}$$

где $K_{ак}$ - коэффициент, учитывающий потери на заряд-разряд аккумуляторной батареи.

Выбираем модуль ТСМ-220А с максимальным током $I_{м}=12,8$ А на напряжение 24 В.

Необходимое количество параллельно соединённых модулей определяется по формуле:

$$n = \frac{I_{м.р.}}{I_{м}} \quad (24)$$

$$n = \frac{27,8}{12,8} = 2,2 \approx 3$$

Кроме того, выбираем инвертор Simin SIM-3000М мощностью 3 кВт, с входным напряжением постоянного тока 24 В, входным напряжением 230 В, гармоническими искажениями менее 4%. В инвертор встроено зарядное устройство, присутствует функция контроля разряда аккумулятора.

2.5 Питание от ветроэнергетической электроустановки

Ветроэнергетические электроустановки состоят из генератора, мачты, контроллера заряда, инвертора и аккумуляторных батарей (рисунок 22). Вращаясь, ротор генератора создает трехфазный переменный ток, который передается на контроллер, далее ток преобразуется в постоянное напряжение и подается на аккумуляторную батарею. Ток, проходя по аккумуляторам, одновременно и подзаряжает их и используется на инвертор, где преобразуется в переменный ток 220 В, 50 Гц. Для работы параллельно с сетью необходимо так же устройство автоматического включения резерва (АВР).

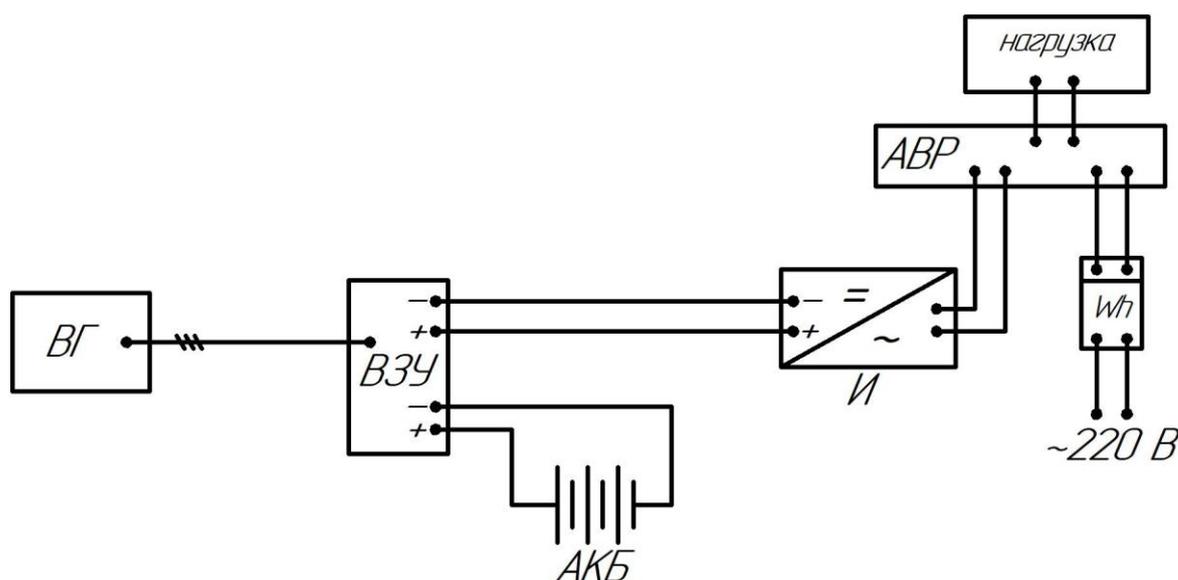


Рисунок 22 - Структурная схема ветроэнергетической электроустановки, работающей параллельно с сетью

Расчёт ветроэнергетической электроустановки можно разделить на 3 основных этапа:

- Определение нагрузки и потребляемой энергии;
- Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества;

- Определение требуемой номинальной мощности ветроэнергетической электроустановки.

Определение нагрузки и потребляемой энергии производится аналогично данному этапу при расчёте фотоэлектрической системы. Таким образом, в соответствии с формулой (10) число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки $W_{Aч}=0,334$ кА·ч.

2.5.1 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества

Принимаем к использованию гелиевые аккумуляторы.

Необходимо определить их ёмкость с учётом количества дней, в течение которых аккумуляторная батарея будет питать нагрузку самостоятельно - n (то есть n дней подряд погода будет безветренной). Предположим, что $n=5$. Тогда максимальное энергопотребление, которое должна удовлетворить батарея без подзаряда составит:

$$W_{\max} = W_{Aч} \cdot n \quad (25)$$
$$W_{\max} = 0,334 \cdot 5 = 1,67 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Необходимо задать глубину разряда батареи $K_{\text{разр}}$. Глубину разряда батареи зададим 60%. Тогда требуемая ёмкость составит:

$$W_{\text{треб}} = \frac{W_{\max}}{K_{\text{разр}} / 100\%} \quad (26)$$
$$W_{\text{треб}} = \frac{1,67}{60 / 100} = 2,78 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

С учётом зависимости ёмкости батареи от температуры помещения, в котором она будет располагаться, требуемая ёмкость составит:

$$W_{AB} = W_{треб} \cdot K_{о.с.} \quad (27)$$

$$W_{AB} = 2,78 \cdot 1,04 = 2,89 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

где $K_{о.с.}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение ёмкости батареи при понижении температуры окружающей среды (взяты для температуры 21°C).

Выбираем аккумуляторные батареи Prosolar R RA24-260DG ёмкостью $W_{ном} = 0,260$ кА·ч на номинальное напряжение 24 В.

Количество параллельно соединённых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$n = \frac{W_{AB}}{W_{ном}} \quad (28)$$

$$n = \frac{2,89}{0,26} = 11,1 \approx 12$$

Чтобы определить количество последовательно соединённых блоков из n параллельно соединённых аккумуляторных батарей, необходимо разделить напряжение системы на напряжение аккумуляторной батареи.

Число аккумуляторных батарей получилось достаточно большое, в то время как стоимость их довольно высока. Такое количество аккумуляторов гарантирует электроснабжение коттеджа даже в случае максимального количества дней без солнца подряд, и в то же время гарантирует очень длительные сроки окупаемости. Однако, как правило, число дней без ветра на территории Самарской области обычно меньше 5. Вполне возможно сократить количество аккумуляторных батарей, приняв число дней без ветра подряд равным 2. В случае разрядки аккумуляторных батарей (число дней без ветра окажется больше 2) их подзарядку можно осуществить от основной электрической сети.

Рассмотрим вариант, когда число дней без ветра равно 2. Тогда:

$$W_{\max} = 0,334 \cdot 2 = 0,668 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{0,668}{\frac{60}{100}} = 1,11 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$W_{AB} = 1,11 \cdot 1,04 = 1,16 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

$$n = \frac{1,16}{0,26} = 4,4 \approx 5$$

2.5.2 Определение требуемой номинальной мощности ветроэнергетической электроустановки

Номинальная мощность ветроэнергетической электроустановки равна:

$$P_{\text{ном}} = \xi \cdot \pi \cdot \frac{R^2}{2} \cdot V_{\text{расч}}^3 \cdot \rho \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (29)$$

где ξ - коэффициент использования энергии ветра (отношение механической энергии, развиваемой ветроколесом, к полной энергии ветра, проходящей через ометаемую площадь ветроколеса);

R - радиус ротора, м;

V -расчётная скорость ветра, м/с;

ρ - плотность воздуха, кг/м³;

$\eta_{\text{ред}}$ - КПД редуктора;

$\eta_{\text{ген}}$ - КПД генератора.

Расчётная - это скорость ветра, при которой генератор ветроустановки выдаёт номинальную мощность. Обычно её принимают равной 10-12 м/с в зависимости от региона. Естественно, что скорость ветра не может быть постоянно равна расчётной, а значит и ветрогенератор выдаёт номинальную мощность не постоянно.

Пиковая мгновенная мощность согласно суточному графику нагрузки коттеджа равна 4,8 кВт. Определим требуемую номинальную мощность

ветрогенератора, считая, что расчётная скорость равна 10 м/с, а мгновенная скорость ветра большую часть суток равна 4,3 м/с:

$$P_{ном} = \frac{P_{мгн} \cdot V_{расч}^3}{V_{мгн}^3} \quad (30)$$

$$P_{ном} = \frac{4,8 \cdot 10^3}{4,3^3} = 60,3 \text{ кВт}$$

Таким образом, генератор мощностью 60,3 кВт выдаёт при скорости ветра 4,3 м/с мощность 4,8 кВт.

Ветрогенератор мощностью 60 кВт имеет очень высокую стоимость порядка 1500000 руб., поэтому наиболее приемлемым вариантом использования ветроэнергетической электроустановки для электроснабжения коттеджа является питание части его нагрузки от данной установки. Воспользуемся расчётами, выполненными для варианта питания части нагрузки от фотоэлектрической системы (таблица 9).

Чтобы определить требуемую энергию постоянного тока, умножим получившееся значение суточного энергопотребления нагрузки переменного тока на коэффициент, учитывающие потери в инверторе ($K_{инв}$):

$$W_{пост} = W_{пер} \cdot K_{инв} \quad (31)$$

$$W_{пост} = 3,039 \cdot 1,1 = 3,34 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Входное напряжение инвертора принимаем $U_{инв}=24$ В. Разделив полученное значение $W_{пост}$ на величину входного напряжения инвертора, получим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки.

$$W_{Ач} = \frac{W_{пост}}{U_{инв}} \quad (32)$$

$$W_{Ач} = \frac{3,34}{24} = 0,139 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Определим ёмкость аккумуляторных батарей. Максимальное количество дней без ветра $n=4$. Тогда максимальное энергопотребление, которое должна удовлетворить батарея без подзаряда составит:

$$W_{\max} = W_{Ac} \cdot n \quad (33)$$

$$W_{\max} = 0,139 \cdot 4 = 0,556 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Тогда требуемая ёмкость с учётом глубины разряда аккумулятора составит:

$$W_{\text{треб}} = \frac{W_{\max}}{K_{\text{разр}} / 100\%} \quad (34)$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{0,556}{60 / 100} = 0,93 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

С учётом зависимости ёмкости батареи от температуры помещения, в котором она будет располагаться, требуемая ёмкость составит:

$$W_{AB} = W_{\text{треб}} \cdot K_{o.c.} \quad (35)$$

$$W_{AB} = 2,78 \cdot 1,04 = 2,89 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

где $K_{o.c.}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение ёмкости батареи при понижении температуры окружающей среды (взят для температуры 21 °С).

Выбираем аккумуляторные батареи Prosolar R RA24-260DG ёмкостью $W_{\text{ном}}=0,260$ кА·ч на номинальное напряжение 24 В.

Количество параллельно соединённых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$n = \frac{W_{AB}}{W_{ном}} \quad (36)$$

$$n = \frac{0,96}{0,26} = 3,6 \approx 4$$

Далее рассчитаем необходимую номинальную мощность ветрогенератора. Пиковая мгновенная мощность согласно таблице 9 равна 3,039 кВт. Определим требуемую номинальную мощность ветрогенератора, считая, что расчётная скорость равна 10 м/с, а мгновенная скорость ветра большую часть суток равна 4,3 м/с:

$$P_{ном} = \frac{P_{мгн} \cdot V_{расч}^3}{V_{мгн}^3} \quad (37)$$

$$P_{ном} = \frac{3,039 \cdot 10^3}{4,3^3} = 38,2 \text{ кВт}$$

Мощность ветрогенератора снова получилась достаточно большая, как, впрочем, и его стоимость (порядка 800000 руб.). Делаем вывод, что питание от ветроэнергетической электроустановки не является рентабельным, так как срок её окупаемости значительно превосходит срок службы.

2.6 Питание от гибридной ветросолнечной электроустановки

Рассмотрим вариант питания части нагрузки от гибридно ветросолнечной электроустановки.

При комплектации ветросолнечной электроустановки предполагаем, что ветрогенератор будет питать большую часть нагрузки, чем солнечные батареи. Пусть из 3,039 кВт·ч, потребляемых нагрузкой в сутки на ветрогенератор приходится 1,8 кВт·ч, а на солнечные батареи 1,239 кВт·ч.

2.6.1 Выбор солнечных батарей

Чтобы определить требуемую энергию постоянного тока, умножим получившееся значение энергопотребления нагрузки переменного тока на коэффициент, учитывающие потери в инверторе ($K_{инв}$):

$$W_{пост} = W_{пер} \cdot K_{инв} \quad (38)$$

$$W_{пост} = 1,239 \cdot 1,1 = 1,369 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Входное напряжение инвертора принимаем $U_{инв}=24$ В. Разделив полученное значение $W_{пост}$ на величину входного напряжения инвертора, получим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки.

$$W_{Ач} = \frac{W_{пост}}{U_{инв}} \quad (39)$$

$$W_{Ач} = \frac{1,363}{24} = 0,057 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Для определения тока, который должна генерировать солнечная батарея, разделим число ампер-часов в сутки, необходимое для покрытия нагрузки, на число пиковых солнце-часов:

$$I_{м.р.} = \frac{W_{Ач} \cdot K_{ак}}{t_{пик}} \quad (40)$$

$$I_{м.р.} = \frac{57 \cdot 1,2}{6} = 11,4 \text{ А}$$

где $K_{ак}$ - коэффициент, учитывающий потери на заряд-разряд аккумуляторной батареи.

Выбираем модуль ТСМ-220А с максимальным током $I_{м}=12,8$ А на напряжение 24 В.

Необходимое количество параллельно соединённых модулей определяется по формуле:

$$n = \frac{I_{м.р.}}{I_m} \quad (41)$$
$$n = \frac{11,4}{12,8} = 0,89 \approx 1$$

Номинальное напряжение постоянного тока системы и номинальное напряжение модуля совпадают, поэтому последовательно соединённых батарей не требуется.

2.6.2 Выбор ветрогенератора

Ветрогенератор должен обеспечить выработку 1,8 кВт·ч в сутки. Предположим, что ветер дует со скоростью 4,3 м/с 8 часов в сутки. Тогда пиковая мгновенная мощность, которую должен вырабатывать ветрогенератор равна:

$$P_{мгн} = \frac{W_{сут}}{t_{сут}} \quad (42)$$
$$P_{ном} = \frac{1,8}{8} = 0,225 \text{ кВт}$$

Определим требуемую номинальную мощность ветрогенератора, считая, что расчётная скорость равна 10 м/с, а мгновенная скорость ветра большую часть суток равна 4,3 м/с:

$$P_{ном} = \frac{P_{мгн} \cdot V_{расч}^3}{V_{мгн}^3} \quad (43)$$
$$P_{ном} = \frac{0,225 \cdot 10^3}{4,3^3} = 2,8 \text{ кВт}$$

Таким образом генератор мощностью 2,8 кВт выдаёт при скорости ветра 4,3 м/с мощность 0,225 кВт.

Примем к установке ветроэнергетическую электроустановку ВЭУ-3 с генератором номинальной мощностью 3 кВт производства ГРЦ Вертикаль (г. Миасс). В комплект помимо ветрогенератора входит также мачта, выпрямительно-зарядное устройство (контроллер), инвертор.

Характеристики ветроэнергетической электроустановки ВЭУ-3 представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Характеристики ВЭУ-3

Наименование параметра	Значение параметра
Количество лопастей, шт.	3
Материал лопастей	Усиленный стеклопластик
Номинальная мощность, Вт	3000
Расчетная скорость ветра, м/с	10
Скорость ветра стартовая, м/с	3,0
Шум в 50 м от ВЭУ на скорости ветра 8 м/с, дБ	45
Генератор	Синхронный с возбуждением от постоянных магнитов
Высота мачты, м	12

Зависимость вырабатываемой мощности ВЭУ-3 от скорости ветра представлена на рисунке 23.

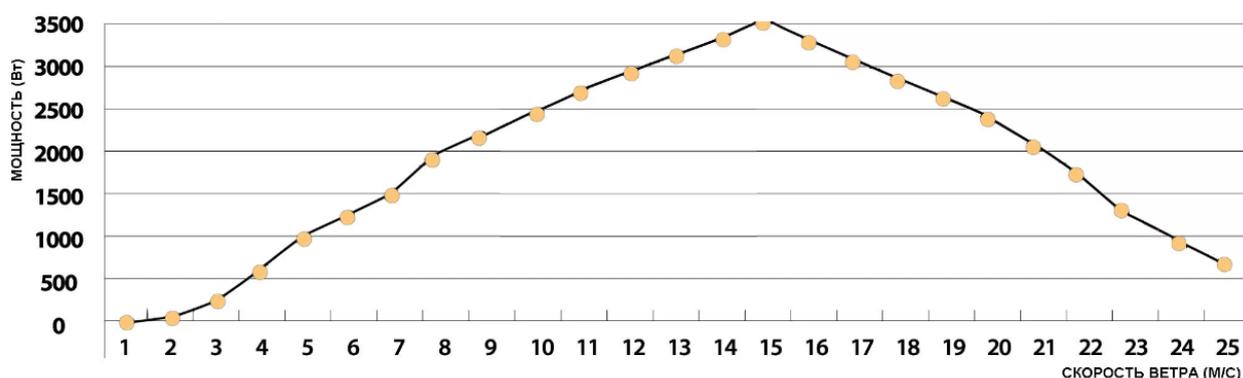


Рисунок 23 - Зависимость вырабатываемой ветрогенератором мощности от скорости ветра

2.6.3 Определение значений необходимой ёмкости аккумуляторных батарей и их количества

Число ампер-часов в сутки, необходимое для питания нагрузки, определяется так же, как и при расчёте ветроэнергетической электроустановки. Необходимо определить ёмкость аккумуляторной батареи с учётом количества дней, в течение которых она будет питать нагрузку самостоятельно - n (то есть n дней подряд погода будет безветренной и пасмурной). Предположим, что $n=2$. Тогда максимальное энергопотребление, которое должна удовлетворить батарея без подзаряда составит:

$$W_{\max} = W_{Ac} \cdot n \quad (44)$$

$$W_{\max} = 0,139 \cdot 2 = 0,278 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

Требуемая ёмкость с учётом глубины разряда батареи составит:

$$W_{\text{треб}} = \frac{W_{\max}}{K_{\text{разр}} / 100\%} \quad (45)$$

$$W_{\text{треб}} = \frac{0,278}{60 / 100} = 0,463 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

С учётом зависимости ёмкости батареи от температуры помещения, в котором она будет располагаться, требуемая ёмкость составит:

$$W_{AB} = W_{\text{треб}} \cdot K_{o.c.} \quad (46)$$

$$W_{AB} = 0,463 \cdot 1,04 = 0,482 \text{ кА} \cdot \text{ч}$$

где $K_{o.c.}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение ёмкости батареи при понижении температуры окружающей среды (взят для температуры 21°C).

Выбираем аккумуляторные батареи Prosolar R RA24-260DG ёмкостью $W_{\text{ном}}=0,260$ кА·ч на номинальное напряжение 24 В.

Количество параллельно соединённых аккумуляторных батарей определяется следующим образом:

$$n = \frac{W_{AB}}{W_{\text{ном}}} \quad (47)$$
$$n = \frac{0,482}{0,26} = 1,85 \approx 2$$

Кроме того, выбираем инвертор для солнечных батарей Simin SIM-1500M мощностью 1,5 кВт, с входным напряжением постоянного тока 24 В, входным напряжением 230 В, гармоническими искажениями менее 4%. В инвертор встроено зарядное устройство, присутствует функция контроля разряда аккумулятора.

Выводы по разделу 2. Произведен расчет нагрузок объекта электроснабжения. Рассмотрены различные системы питания для повышения надежности электроснабжения объекта. Выбраны наиболее приемлемые варианты.

3 Оценка полученных результатов

По итогам расчётов, выполненных в главе 2, делаем вывод, что питание полной нагрузки коттеджа от фотоэлектрической системы или от ветроэнергетической электроустановки не является рентабельным, так как срок службы данных электроустановок значительно меньше срока их окупаемости.

Питание части нагрузки от ветроэнергетической электроустановки также не является рентабельным по причине высоких сроков окупаемости.

Таким образом, наиболее жизнеспособными оказались варианты питания части нагрузки от фотоэлектрической системы и от гибридной ветросолнечной электроустановки. Рассчитаем сроки окупаемости этих электроустановок.

3.1 Электроснабжение коттеджа с использованием фотоэлектрической системы

Капитальные вложения включают расходы, связанные с приобретением и монтажом электрооборудования. Расчёт капиталовложений в систему электроснабжения коттеджа с переводом питания части нагрузки на фотоэлектрическую систему сведён в таблицу 11.

Таблица 11 - Капиталовложения в систему электроснабжения коттеджа с использованием фотоэлектрической системы

Наименование компонента системы	Количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
Аккумуляторная батарея ProsolarR RA24-260DG	6	15800	94800
Солнечный модуль TCM 220A	3	29000	87000
Инвертор Simin SIM-1000M	1	12000	12000
Итого			193800 руб.

Обслуживание системы заключается в основном в очищении поверхности солнечных батарей от загрязнений. Владелец может осуществить очистку самостоятельно, поэтому затраты на периодическое обслуживание не производятся.

Далее вычислим, какую сумму тратит владелец коттеджа на оплату $W_{сут}=3,039$ кВт·ч в сутки, за год, исходя из того, что тариф на оплату электроэнергии для физических лиц составляет $C_{ф}=3,53$ руб/кВт·ч. Тогда за год сумма, выплаченная потребителями за электроэнергию, составит:

$$Z_2 = W_{сут} \cdot C_{ф} \cdot 365 \quad (48)$$

$$Z_2 = 3,039 \cdot 3,53 \cdot 365 = 3915,6 \text{ руб}$$

Норма амортизации составляет 10% в год. Тогда норма амортизации в рублях составит:

$$H_{ам} = W_{сут} \cdot C_{ф} \cdot 365 \cdot 0,1 \quad (49)$$

$$H_{ам} = 3,039 \cdot 3,53 \cdot 365 \cdot 0,1 = 391,6 \text{ руб/год}$$

Тогда срок окупаемости вложений в оснащение коттеджа солнечными батареями составит 24 года. Убедимся в этом. Затраты на оплату электроэнергии за $T_{ок}=24$ года, начиная с 2023 года, составят:

$$Z_2' = Z_2 + (Z_2 + H_{ам}) + (Z_2 + 2 \cdot H_{ам}) + \dots + (Z_2 + 23 \cdot H_{ам}) \quad (50)$$

$$Z_2' = 3915,6 + (3915,6 + 391,6) + (3915,6 + 2 \cdot 391,6) + \dots + (3915,6 + 23 \cdot 391,6) = 202056 \text{ руб}$$

То есть за 24 года капитальные вложения в размере 193800 руб. окупятся полностью.

3.2 Электроснабжение коттеджа с использованием гибридной ветросолнечной электроустановки

Расчёт капиталовложений в систему электроснабжения коттеджа с переводом питания части нагрузки на гибридную ветросолнечную электроустановку сведён в таблицу 12.

Таблица 12 - Капиталовложения в систему электроснабжения коттеджа с использованием гибридной ветросолнечной электроустановки

Наименование компонента системы	Количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
Аккумуляторная батарея ProsolarR RA24-260DG	2	15800	31600
Солнечный модуль TCM 220A	1	29000	29000
Инвертор Simin SIM-1000M	1	9000	9000
ВЭУ-3	1	35000	35000
Итого	104600 руб.		

Сумма, выплаченная потребителем за потребление 3,039 кВт·ч в сутки в течение года, составит 3915,6 руб. Норма амортизации в год составит 391,6 руб/год.

Тогда срок окупаемости вложений в оснащение коттеджа ветроэнергетической электроустановкой составит 16 лет. Убедимся в этом. Затраты на оплату электроэнергии за $T_{ок} = 16$ лет, начиная с 2023 года, составят:

$$Z_2^* = Z_2 + (Z_2 + H_{ам}) + (Z_2 + 2 \cdot H_{ам}) + \dots + (Z_2 + 15 \cdot H_{ам}) \quad (51)$$

$$Z_2^* = 3915,6 + (3915,6 + 391,6) + (3915,6 + 2 \cdot 391,6) + \dots + (3915,6 + 15 \cdot 391,6) = 109641,6 \text{ руб}$$

То есть за 16 лет капитальные вложения в размере 104600 руб. окупятся полностью.

Выводы по разделу 3. Произведен расчет срока окупаемости фотоэлектрической системы и гибридной ветросолнечной системы. Оба

варианта являются высокозатратными. Сроки окупаемости у обоих рассмотренных вариантов достаточно высокие. Наиболее приемлемым с точки зрения сроков окупаемости и затрат является вариант питания части нагрузки от гибридной ветросолнечной электроустановки.

Заключение

В данной работе была разработана система электроснабжения индивидуального коттеджа, расположенного в коттеджном посёлке на территории Самарской области, основанная на использовании электроустановки, работающей на альтернативных источниках энергии в качестве основного источника питания для части нагрузки.

Питание части нагрузки, включающей в себя наиболее часто используемые электроприборы от электроустановки, работающей на альтернативных источниках энергии, позволяет понизить зависимость электроснабжения коттеджа от основной электрической сети, и как следствие повысить надёжность электроснабжения коттеджа. Электрическая сеть для данной части нагрузки рассматривается как резервный источник питания.

В ходе работы был произведён анализ источников альтернативной энергии в отношении пригодности их использования для электроснабжения потребителей на территории Самарской области. Рассматривались следующие источники: энергия ветра, геотермальная энергия, солнечная энергия, энергия биомассы. В итоге для дальнейшего рассмотрения были выбраны энергия ветра и солнечная энергия как наиболее перспективные для использования на территории Самарской области.

Далее был произведён расчёт параметров электроустановок, работающих на солнечной и ветровой энергии: фотоэлектрической системы, ветроэнергетической электроустановки и гибридной ветросолнечной электроустановки.

Вариант питания всей нагрузки коттеджа от фотоэлектрической системы оказался слишком затратным, как, впрочем, и вариант питания всей нагрузки от ветроэнергетической электроустановки

Далее был рассмотрен вариант питания части нагрузки коттеджа от электроустановок, работающих на альтернативных источниках энергии. В

итоге расчётов выяснилось, что вариант питания части нагрузки от ветроэнергетической электроустановки также оказался слишком затратным.

Таким образом, наиболее жизнеспособными оказались варианты питания части нагрузки коттеджа от фотоэлектрической системы и гибридной ветросолнечной электроустановки.

Следующим этапом работы является расчёт сроков окупаемости вышеназванных электроустановок и выбор наименее затратного варианта. В итоге срок окупаемости фотоэлектрической системы составил 24 года, гибридной ветросолнечной системы – 16 лет. Таким образом, наиболее приемлемым вариантом с точки зрения окупаемости является гибридная ветросолнечная электроустановка, хотя и для неё срок окупаемости достаточно высокий. Стоит принять во внимание, что срок службы солнечных батарей, как и ветрогенераторов составляет до 25 лет в зависимости от условий эксплуатации, но в то же время срок службы, например, аккумуляторных батарей составляет максимум 10 - 15 лет с постепенным ухудшением характеристик. Вопрос о рентабельности использования электроустановок, работающих на альтернативных источниках энергии для электроснабжения части нагрузок коттеджа, на настоящее время остаётся открытым. Решающее слово остаётся за потребителем.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Айвазов А. А., Будагян Б. Г., Вихров С. П., Попов А. И. Неупорядоченные полупроводники. М. : Высшая школа, 1995. 215 с.
2. Атласы ветрового и солнечного климатов России. СПб. : Издательство им. А.И. Воейкова, 1997. 173 с.
3. Барыбина Ю. Г. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования. М. : Энергоатомиздат, 1990. 456 с.
4. Безруких П. П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб. : Наука, 2004. 360 с.
5. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М. : Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2005. 263 с.
6. Виссарионова В. И. Расчет ресурсов ветровой энергетики. М. : Издательство МЭИ, 1997. 32 с.
7. Гибилиско С. Альтернативная энергетика без тайн. М. : Эксмо, 2010. 386 с.
8. ГОСТ 26881-86 Аккумуляторы свинцовые стационарные. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005745> (дата обращения: 01.01.2022).
9. Ергин Д. В поисках энергии: Ресурсные войны, новые технологии и будущее энергетики. М. : АЛЬПИНА ПАБЛИШЕР, 2016. 712 с.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М. : Мир, 1994. 298 с.
11. Кашкаров А. П. Аккумуляторы. М. : РадиоСофт, 2014. 187 с.
12. Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М. : ДМК-Пресс, 2010. 144 с.
13. Князев В. В. Основные направления повышения надежного электроснабжения потребителей в сельской местности // Электро. 2006. № 5. С. 10-15.
14. Коган Н. Возобновляемые источники энергии. Часть 2. Ветер. // Наука и техника. 2010. № 3. С. 18-24

15. Лукутин Б. В., Муравлев И. О., Плотников И. А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. 120 с.
16. Ляшков В. И., Кузьмин С. Н. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебное пособие. Тамбов : Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2009. 72 с.
17. Макаров Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 - 35 кВ и 110 - 1150 кВ. М. : Папирус Про, 2004. 688 с.
18. Мандия К. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности. М. : ОЭСР/МЭА, 2004. 120 с.
19. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. Пусть всегда будет Солнце // Электроника: наука, технология, бизнес. 2000. № 6. С. 26-31.
20. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. с изм. и доп. М.: КРОНУС, 2020. 464 с.
21. РД 34.20.185-94 Инструкция по проектированию городских электрических сетей [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004921> (дата обращения: 01.01.2022).
22. РД 52.04.275-89 Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036768> (дата обращения: 01.01.2022).
23. Савоськин Н. Е. Надёжность электрических систем: учебное пособие. Пенза : Издательство Пензенского государственного университета, 2004. 45 с.
24. Семёнов Б. Ю. Преобразовательная техника. Профессиональные решения. М. : Солон-Пресс, 2011. 280 с.
25. Стребков Д. С. Технологии крупномасштабной электроэнергетики // Электро. 2009. № 3. С. 12-15.

26. Ушаков В. Я. Современные проблемы электроэнергетики. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2014. 477 с.
27. Хрусталеv Д. А. Аккумуляторы. М. : Изумруд, 2003. 224 с.
28. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. М. : Энергоатомиздат, 1993. 309 с.
29. Шефтер Я. И., Рождественский И. В. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках. М. : Энергоатомиздат, 1987. 218 с.
30. Fantozzi F., Le Bail L., Leccese F., Rocca M., Salvadori G. General Lighting in Offices Building: Techno-Economic Considerations on the Fluorescent Tubes Replacement with LED Tubes. // International Journal of Engineering and Technology Innovation. 2017. № 3, pp. 143-156.
31. Karlen M., Spangler C., Benya J. R. Lighting Design Basics. Wiley, 2017. 272 p.
32. McGowan J. G., McGowan J. G., Manwell J. F., Rogers A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. West Sussex : John Wiley & Sons Inc., 2002. 539 p.
33. Munteanu I., Bratcu A. I., Cutululis N.-A., Ceanga E. Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach. Springer-Verlag, 2008. p. 283.
34. Siegfried H. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. Wiley, 2006. 446 p.