

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Автономные источники энергии обеспечения энергонезависимости дорожно-транспортной инфраструктуры

Обучающийся

Ш.Р. Гумяров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

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

Тольятти 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Преимущества и недостатки использования альтернативных источников электроэнергии. Требования к их размещению и использованию.....	8
1.1 Солнечная энергия.....	9
1.2 Использование и преобразование энергии ветра.....	15
1.3 Требования к размещению, выбору участков и типов обеспечения энергоустановок автономных источников энергии для обеспечения автономности дорожно-транспортной инфраструктуры.....	28
1.4 Технические требования к устройству и схемам работы автономных и сетевых систем ВИЭ.....	31
1.5 Методика оценки обоснования эффективности обеспечения возобновляемых источников энергии.....	37
2 Использование энергии, создаваемой потоком автомобилей в гибридной системе электроснабжения.....	41
2.1 Анализ аэродинамической мощности, создаваемой от лобового сопротивления транспортного средства.....	44
2.2 Транспортная нагрузка на трассе М5 «Урал».....	50
2.3 Расчет параметров автономного энергопотребления гибридной энергетической установки.....	52
2.4 Расчет себестоимости и рыночной цены энергетической установки.....	62
2.5 Расчет срока окупаемости ГЭУ.....	62
2.6 Расчет экономической эффективности.....	64
2.7 Технико-экономический расчет для прокладки линий ЛЭП от подстанции и установки КТП с трансформатором.....	65

2.8 Результаты расчета гибридной энергоустановки.....	66
3 Сравнительный анализ эффективности применения генераторов для зарядки аккумуляторных батарей.....	73
3.1 метрологическое обеспечение.....	73
3.2 Результаты испытаний.....	74
3.3 Описание схемы подключения модулей к общей сети.....	80
Заключение.....	86
Список используемых источников.....	87

## Введение

В современном мире трудно представить жизнь человека без дорожно-транспортной инфраструктуры. С каждым годом все больше и больше устанавливаются и модернизируются системы освещения, предупреждения и мониторинга нарушений для комфортного и безопасного перемещения по дорогам общего пользования. Для всего этого оборудования, обеспечивающего бесперебойное функционирование данных систем требуется немалая выработка энергии.

Безусловно, традиционная выработка энергии негативно действует на природу, окружающую человека. Так же при использовании традиционных методов для выработки электрической и тепловой энергии требуются полезные ископаемые (уголь, нефть, газ), которые в свою очередь являются исчерпаемыми ресурсами. Иначе говоря, при использовании традиционных методов выработки энергии, в скором времени люди столкнутся с проблемой нехватки полезных ископаемых, а в следствии энергетическим кризисом. Так же немало важным аспектом для поиска новых альтернативных источников является парниковый эффект, в связи с проблемой глобального потепления. Исходя из этого, возникает потребность для решения ряда вопросов и задач, основным из которых, является разработка абсолютно новых источников альтернативной энергии, для обеспечения автономности дорожно-транспортной инфраструктуры.

Разработка новых альтернативных источников энергии является наиболее весомым при решении вопросов загрязнением окружающей среды, в следствии выработки электрической и тепловой энергии.

Альтернативные источники электрической энергии используют природные возобновляемые источники энергии, такие как: солнце, ветер, геотермальная энергия (тепло из недр земли), энергия приливов и отливов.

Главными факторами, раскрывающие глобальность проблемы традиционной энергетики и показывающий важность скорейшей разработке и использованию альтернативных источников электрической энергии являются:

- глобально-экологическая: на данный момент, ни для кого не является секретом, что традиционная энергетика пагубно влияет на окружающую человека среду, это неизбежно приведет к экологической катастрофе.
- социальная: с увеличением плотности и численности населения, появляются вопросы с безопасным и экономически выгодным выбором местоположения для строительства энергокомплексов таких как ГРЭС, АЭС.

Важным моментом для применения альтернативных источников электрической энергии является невозможность или высокая затрудненность прокладки линий электрической передачи из-за большой удаленности или различных природных факторов.

В последнее время все больше и больше альтернативные источники энергии находят свое применение в дорожной инфраструктуре, для питания электроприемников малой мощности. Это обусловлено тем, что порой установка ветрогенератора или солнечной панели обходится дешевле, нежели прокладка линий электропередач, а также из-за высокой экологичности.

**Актуальность** исследования заключается рассмотрении и расширение спектра использования альтернативных источников электроэнергии в дорожной инфраструктуре.

**Объект исследования:** автономные источники энергии для обеспечения энергонезависимости дорожной инфраструктуры.

**Предмет исследования:** эффективность применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для обеспечения автономности дорожно-транспортной инфраструктуры.

**Цель исследования:** определение эффективности применения ВИЭ, в том числе создаваемого потоком транспортных средств (т/с), для обеспечения энергонезависимости дорожно-транспортной инфраструктуры.

**Задачи исследования:**

- провести анализ технических решений при разработке автономного источника энергии;
- выбрать оборудование реализующие принципы автономности питания электроприемников;
- предложить конструкцию автономного источника энергии;
- провести экспериментальную работу и их анализ;
- выполнить анализ экономической эффективности выбранного оборудования;

**Методы исследования, применяемые в данной работе:**

- аналитический,
- экспериментальный.

**Научная новизна:** Предложен оригинальный способ обеспечения энергонезависимости дорожно-транспортной инфраструктуры, основанный на преобразование энергии проезжающих мимо т/с.

**Практическая значимость:** результаты работы могут быть применены на аварийно-опасных участках трасс, автомагистралей, для выработки электроэнергии для систем освещения.

**Апробация работы:**

- основные результаты работы заслушаны на научно-техническом семинаре кафедры «Энергетические комплексы и системы управления»;
- доклад на тему «Использование инновационных альтернативных источников энергии для обеспечения автономности дорожно-транспортной инфраструктуры» опубликован в сборнике работ Межвузовского международного конгресса «Высшая школа: научные исследования».

**Структура магистерской диссертации:** Данная диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 28 рисунков, 23 таблицы, списка использованных источников (33 источника). Основной текст изложен на 90 страницах.

## Перечень сокращений и обозначений

- АКБ – аккумуляторная батарея
- ВЭУ – ветряная энергетическая установка
- СЭУ- солнечная энергетическая установка
- ГЭУ – гибридная энергетическая установка
- ЭП – электроприемники
- КПД – коэффициент полезного действия
- ИТС – интеллектуальная транспортная система
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии
- ГИС – геоинформационные системы
- ЭК – энергетический комплекс
- ИСУ - интеллектуальная система управления
- СФЭС - солнечная фотоэлектрическая станция
- МГЭС - малая гидроэлектростанция
- АИЭ - автономные источники электроэнергии
- ДЭС – дизельная электростанция
- ГПЭ газопоршневая электростанция
- СБЭ – система бесперебойного электроснабжения
- И - инвертор
- НПЧ - непосредственный преобразователь частоты
- В – выпрямитель
- ЛЭП линии электропередач
- КИЭВ - коэффициент использования энергии ветра
- ГИБДД - Государственная инспекция безопасности дорожного движения
- КТП – комплектно трансформаторная подстанция
- ВЭС – ветряная электростанция
- АВР – автоматический ввод резерва

## **1 Преимущества и недостатки использования альтернативных источников электроэнергии. Требование к их размещению и использованию.**

На сегодняшний день производятся крупные работы, которые помогают обеспечить безопасность дорожного движения на автомобильных трассах. Важной составляющей безопасности дорожного движения, особенно на аварийно-опасных участках является освещенность дорожного полотна и прилегающую к ней обочину. Передача электрической энергии на аварийно-опасные участки находящиеся на большом удалении от энергетической системы является большой проблемой с экономической точки зрения. Данная проблема зачастую решается установкой источников энергии, использующих возобновляемые ресурсы энергии.

Солнечная и ветряная энергетика является наиболее востребованной и часто применяемой среди других видов альтернативной энергии. У данных источников, есть свои положительные и отрицательные качества. Энергоэффективность использования данных видов зависит природных факторов, климата, временных поясов и другие. В России по всей ее территории данные показатели значительно отличаются друг от друга.

Плюсы и минусы каждого альтернативного источника электрической энергии индивидуальны, но существуют несколько общих положительных и отрицательных свойств.

Преимуществом применения возобновляемых источников энергии являются: экологичность, неисчерпаемость ресурсов, доступность, широкий спектр распространения, высокие перспективы развития в будущем.

Недостатками применения возобновляемых источников энергии являются: отсутствие стабильности, зависимость от климатических и природных условий и времени суток, низкий КПД (за исключением использования энергии воды), высокая стоимость, малая мощность одной установки.



## 1.1 Солнечная энергия

Использование солнечной электрической энергии является полной альтернативой энергии, использующей от исчерпаемых видов топлива, которая в свою очередь будет экологична, безопасна для использования вблизи с проживанием людей. Энергия солнца всего лишь 18 солнечных дней на всей поверхности Земли сравнима со всеми исчерпаемыми запасами нефти, газа и угля. За пределами атмосферного слоя нашей планеты, энергия солнца содержит порядка  $1,3 \text{ кВт/м}^2$ . Треть энергии солнца отражается слоя атмосферы обратно в космос, в отличие от остальной части света, которая движется на поверхность Земли.

Среднее значение энергии относительно всей поверхности нашей планеты является  $4200 \text{ Вт}\cdot\text{ч/м}^2$  за световой день, это эквивалентно в усредненном значении 1 баррелю нефти за год. Наиболее энергетически выгодная местность для установки солнечных источников энергии является пустыня, у которой энергия за один световой день на квадратном метре приблизительно равна  $6000 \text{ Вт}\cdot\text{ч/м}^2$ .

Функционирование солнечных панелей можно разбить на несколько этапов:

- «поглощение кремниевой поверхностью батареи фотонов солнечного света;
- взаимодействие фотонов с атомами кремния. При этом происходит отрыв электронов поверхности, что приводит к появлению напряжения. Свободные электроны под действием разницы потенциалов начинают двигаться, в итоге образуется электрический ток. Солнечная панель является полупроводником, поэтому она упорядочивает ток в одном направлении;
- преобразование полученного электрического тока в постоянный. На этом этапе энергия аккумулируется в батарее и направляется к потребителю» [16].

При производстве солнечных батарей применяют кварцевый песок, который содержит в своем составе двуокись кремния в необходимом количестве. При высоких температурах кварцевый песок плавится, при этом в него добавляются другие химические элементы. Данным способом происходит очистка кремния до 99%, которая требуется для функционирования солнечной батареи. Изготовление панелей, содержащих в своем составе кремний требует достаточно больших вложений, в связи с этим разрабатываются фотоэлементы, функционирующие на полимерных материалах. Коэффициент полезного действия прототипов, работающих на полимерных материалах, приблизительно равен 30%.

Виды солнечных панелей имеют ряд важных отличий по свойствам гибкости и жесткости. Эти параметры зависят от состава рабочего материала и особенностей конструкции панелей. На данный момент все большее применения набирают гибкие солнечные панели, которые наиболее просты в установке. Это свойство позволяет добавлять архитектуре не только красоту, но и практичность, данного изделия.

«По составу фотоэлектрического слоя различают:

- полимерные панели (КПД 7%);
- теллурий-кадмиевые панели на основе галлия, меди, селена и индия (КПД до 15%);
- кремниевые панели (КПД 7% в аморфной, КПД 15% в монокристаллической, КПД 13% в поликристаллической модификациях);
- панели с использованием арсенида галлия;
- органические панели;
- комбинированные панели» [10].

Чаще всего применяются солнечные батареи, имеющие низкую себестоимость – кристаллические. Данный вид имеет наименьшую стоимость, но небольшой КПД.

На сегодняшний день наиболее используемыми батареями являются поли- и монокристаллические, тонкопленочные. Данные изделия имеют отличия по КПД, технологией изготовления и внешним видом.

В таблице 1 представлены преимущества и недостатки видов солнечных батарей.

Таблица 1 – преимущества и недостатки видов солнечных батарей

Вид солнечных батарей	Преимущества	Недостатки
Монокристаллические	Высокий КПД, Привлекательный внешний вид	Дороговизна
Поликристаллические	Дешевизна	Относительно низкий КПД
Тонкопленочные	Компактность и гибкость, Небольшой вес, Привлекательный внешний вид	Относительно низкий КПД

Ниже подробно рассмотрена энергоэффективность каждого вида солнечных батарей и их особенности в применении.

Каждый фотоэлемент изготавливается на основе одного из полупроводников, ответственного за трансформацию энергии солнца в электрическую. На практике часто используют кремний. Характерным отличием каждого типа панели является ее цвет, а именно:

- черные ячейки - монокристаллическая панель;
- синие ячейки – поликристаллическая панель;
- тонкопленочные панели существуют различных цветов, их характерным признаком является гибкость.

По конструкции поли- и монокристаллические солнечные панели одинаковы. Из кремниевых фотоэлементов создаются ряды, а те в свою очередь формируют панели в виде прямоугольников. Солнечные батареи имеют стеклянную защиту, а их рамка является герметичной (рисунок 1).



Рисунок 1 – Вид моно- и поликристаллических солнечных батарей

В обоих случаях используется кремний, но его качество и формы отличаются. Для монокристаллических панелей применяют цельный кремниевый кристалл. Поликристаллические же элементы собираются из небольших фрагментов кремния, переплавленных и спрессованных между собой.

В данных случаях применяется кремний, но его форма и качество отличны друг от друга. При изготовлении монокристаллических солнечных панелей используют цельный кремневый кристалл, в отличие от поликристаллических, где применяют спрессованные и переплавленные между собой воедино мелкие частички кремния.

В производстве же тонкопленочных солнечных панелей применяется иная технология. Здесь кремний находится в некристаллической, аморфной форме. Далее гибкая основа покрывается кремнием в данной форме, и формируется готовая солнечная панель. Так же для изготовления тонкопленочных солнечных панелей довольно редко используются индий, медь, галлий. На рисунке 2 изображена тонкопленочная солнечная панель.

На сегодняшний день изготавливаются обновленные модели тонкопленочных солнечных батарей, сырьем для производства которого является теллурид кадмия, который значительно энергоэффективнее некристаллического (аморфного) кремния.



Рисунок 2 – Тонкопленочные солнечные панели

Существуют модели солнечных батарей с высоким КПД, но их стоимость намного дороже, из-за применения при их изготовлении редких дорогих металлов. Но несмотря на высокую стоимость, данные изделия присутствуют на рынке с высокими характеристиками в своем ценовом сегменте.

Но не каждая солнечная панель, изготовленная из дорогих и редких металлов способна выдавать высокий КПД в сравнении с кремниевыми солнечными панелями. Зато эти панели способны работать в суровых

климатических условиях. Именно из-за этого данное изделие способно конкурировать с другими в своем классе. Зачастую в таких технологиях применяют теллурид кадмия, селенид индиево-медного сплава и селенид сплава из индия, меди и галлия. Но стоит отметить, что кадмий очень токсичен, а галлий, теллур и индий редкие и достаточно дорогие. В связи с этим массовое изготовление данных изделий на базе этих дорогих металлов экономически невыгодно и невозможно. Но все же, данные материалы вырабатывают достаточно высокий КПД приблизительно 25-40%. Ранее данные технологии использовались для преобразования солнечной энергии в космосе.

Органические и полимерные фотоэлементы являются новым и достаточно молодым видом батарей, преобразующих энергию солнца (рисунок 3). Впервые изготовление данных фотоэлементов началось около 10 лет назад. Но неплохие результаты в изучении данной технологии ученые уже получили. Самым большим успехом в данной области является, установка энергоэффективных солнечных батарей на полимерной и органической основе на несколько высотных башен.



Рисунок 3 - Органическая и полимерная солнечная батарея

Пленочная рулонная солнечная панель, толщиной всего 1 миллиметр, изготавливается из фталоцианина меди, углеродных фуллеренов и некоторых других органических соединений. На данных солнечных панелях КПД составляет 14-15%, при этом стоимость данных технологий на порядок ниже нежели изготовление солнечных панелей, основанных на кристаллах.

У тонкопленочных рулонных солнечных панелей существует не решенная проблема с деградацией органических соединений. На данный момент нельзя утверждать о сохранении такого же высокого КПД после эксплуатации через несколько лет.

У органических солнечных панелей есть ряд преимуществ:

- экологичные материалы;
- легкость и безвредность утилизации;
- относительно дешевое изготовление;
- гибкость изделия.

Недостатком тонкопленочных органических солнечных панелей является относительно невысокий КПД и неоднозначный срок функционирования данного изделия.

## **1.2 Использование и преобразование энергии ветра**

Ветрогенераторы – это устройства использующее преобразование кинетической энергии ветрового потока в механическую, а в следствии и в электрическую, относится к альтернативным источникам энергии. Отличительным качеством ветряной электроэнергетики от традиционной является экологичность, то есть отсутствие загрязнений окружающей среды, неисчерпаемость ресурсов. Количество вырабатываемой энергии зависит от силы и постоянного направления ветра, площади лопастей пропеллеров. Более высокая энергоэффективность ветрогенераторов наблюдается в прибрежных районах наиболее крупных водоемов, таких как: озера, океаны, моря. В данной местности практически нет штиля.

К преимуществам применения турбин, использующих энергию ветра, относят возобновляемость, неисчерпаемость энергии ветра. Выработка электрической энергии путем использования воздушных масс является чистым и экологичным процессом, не приносящей вреда природе, окружающей человека. Монтаж оборудования ветряной электрической станции является достаточно быстрым, в связи с этим строительство и установка ветряных генераторов краткосрочно, а следовательно, требует меньших финансовых затрат на монтаж, по сравнению с традиционными объектами электрического снабжения. Существенным недостатком ветряной энергетической установки является ее зависимость от ее географического положения, климатических и погодных условий, времени суток. Данный недостаток позволяет применять энергию ветрового потока на определенных участках местности. Так же к недостаткам можно отнести: значительные капиталовложения на начальных этапах развития, опасность вблизи воздушного пространства ветрогенератора для птиц и других живых обитателей атмосферы. Но даже эти незначительные недостатки не могут превысить число его положительных факторов. Данная область альтернативных источников энергии способна развиваться в ближайшем будущем.

Ветрогенераторы делятся на два вида: с вертикальным и горизонтальным расположением ротора. Горизонтальное расположение ротора наиболее распространено к установке по всему миру. Данный вид имеет высокую энергоэффективность около 45-50%, но у него есть огромный недостаток, это высокий уровень вибрации и шума. Кроме этого, для его монтажа необходимо достаточно большое пространство (около 80-100 метров) и высокая мачта (порядка 6-8 метров).

Ветряные установки с горизонтально-осевым ротором вращения делятся на одно-двух-трех и многолопастные (рисунок 4). Преимуществом ветрогенераторов с горизонтальной осью является более высокая энергоэффективность по сравнению с ветрогенератором с вертикальной осью



вращения. Недостатком устройства является необходимость флюгера, для поворота установки по направлению ветра. Так же при развороте снижается его эффективность, в связи с снижением скорости ветра.



Рисунок 4 - Ветрогенераторы с горизонтальной осью

Главным преимуществом однолопастного ветрогенератора является высокие обороты вращения. У данных установок вместо второй лопасти закреплен противовес, который практически не имеет сопротивление движения воздушных масс, что в свою очередь позволяет применять их для ветрогенераторов с высокими оборотами вращения. Это дает возможность уменьшить габариты установки и ее общую массу. Двухлопастные ветроустановки имеют незначительные отличия по энергоэффективности и мощности в сравнении с предыдущим видом. Трехлопастные ВЭУ являются наиболее применяемыми по всему миру. Мощность данных ветроустановок достигает 7 МВт. Многолопастные горизонтально – осевые ветряки с числом лопастей, достигающим до 50, обладают большой инерцией, в связи с этим

свойством имеют большой крутящий момент при сравнительно небольших оборотах вращения. Данное преимущество позволяет применять устройства для функционирования водяных насосов, в котором они и находятся в лидерах.

Вертикально-осевая ветряная энергоустановка (рисунок 5) имеет меньшую эффективность нежели горизонтальная (КПД ниже в 3 раза). Их преимуществами являются: надежность конструкции и простота монтажа.

Пониженный уровень шума позволяет произвести монтаж вертикально-осевых ветрогенераторов на крышах домов и на поверхности земли, без значительного возвышения. Данному виду ветрогенератора не страшны ураганы и обледенения. Они способны функционировать от слабого ветра (1-2 м/с), в то время как горизонтально-осевой ветряной энергетической установке требуется ветер со средней скоростью 3,5 м/с и более. Форма ротора вертикальной ВЭУ достаточно разнообразны и описаны ниже.



Рисунок 5 - Ветрогенератор с вертикальной осью вращения

Далее рассматриваются роторы ветряков с вертикальной осью вращения. За счет того, что ротор данных ветроустановок может работать при низкой частоте вращения, около 250 оборотов в минуту, ресурс силовых механизмов данных установок гораздо выше, чем у горизонтально-осевых ветряных установок. При разработке ветряной установки, для начала нужно просчитать вариант для монтажа ветрогенераторов с вертикальной осью вращения, ведь главным ее превосходством является простота в установке и обслуживании.

Далее рассматривается ротор Савониуса в совместном исполнении в ветрогенераторе с вертикальной осью вращения. Наиболее простым ротором является ротор Савинуса. Сигурд Савониус впервые изготовил ветровую турбину наподобие поперечно роторной в 1925 году. Патент на поперечно роторную турбину принадлежал изобретателям Ворониным. Ротор ВС (Ворониных Савониуса) имеет в своей конструкции два полуцилиндра, вращающиеся в вертикальной плоскости (рисунок 6). Главным преимуществом данной установки по сравнению с горизонтально-осевой является отсутствие привязанности к направлению ветрового воздушного потока, ведь даже при резких порывистых изменениях направления ветра данный ветряк способен преобразовывать кинетическую энергию ветра в электрическую. Но у этой установки так же существуют и недостатки, а именно слабое применение энергии ветрового потока, из-за очень узкой рабочей области лопастей (четверть оборота), использующая лишь одну треть энергии воздушного потока.



Рисунок 6 - Ротор Савониуса

Ниже описывается ветроустановка с вертикальной осью вращения с ротором Дарье. Жорж Дарье известный конструктор из Франции, который в 1931 году выдвинул свое видение ротора для вращения в вертикальной плоскости, имевшего две или более лопасти (рисунок 7).

Ротор Дарье имеет два недостатка. Первый недостаток заключается во вращении вектора тяги лопасти, которая делает оборот относительно ее фокуса, совершая при этом не ровные движения, а движения рывками. Вторым недостатком является частый разрыв ленты, которая рвется из-за ее вибрации. А также слышен сильный визг и рев, который усиливается с увеличением лопастей.



Рисунок 7 – Ветроустановка с вертикальной осью вращения с ротором Дарье

У данного изделия есть два существенных недостатка. «Первый недостаток заключается во вращении вектора тяги лопасти, которая делает оборот относительно ее фокуса, совершая при этом не ровные движения, а движения рывками. Второй недостаток заключается в частом разрыве ленты, которая рвется из-за ее вибрации» [1]. Так же от установки слышен громкий вой, усиливающийся эквивалентно размерам лопостей.

Далее рассмотрен геликоидный ротор, для ветроустановок с вертикальной осью вращения (рисунок 8). Данная установка имеет равномерное и плавное вращение, благодаря конструкции скручивающихся лопастей. Преимуществом геликоидной ветроустановки является снижение

износа подшипника, и в следствии повышенный срок службы, но производство данной технологии, достаточно дорогой процесс.



Рисунок 8 - Вертикальная ветроустановка с геликоидным ротором

По условиям применения ветряные установки делятся на следующие подгруппы: коммерческие, промышленные и бытовые. Для питания электрической энергией крупной промышленности, государство или реже крупные энергокорпорации монтируют промышленные ветроустановки. Данные установки являются турбинами наибольшей мощностью и габаритами по сей день, для некоторых турбин мощность определяется в мегаваттах. Такие промышленные ветряки устанавливаются группой, создавая целый ветропарк, в местах наиболее благоприятных для стабильного достаточно сильного движения воздушных масс, для выработки электрической энергии. Обычно ветропарки базируются на холмах с открытой местностью или на побережьях. Электрическая энергия от ветроустановок поступает в

электросеть. Достаточную стабильность ветрогенераторов и скорость их вращения возможно осуществить за счет расположения лопастей под определенным углом, относительно нагнетающихся воздушных масс, путем вращения ветрового колеса. Ветрогенераторы, устанавливаемые для продажи электрической энергии или обеспечения электрического снабжения удаленных районов, с отсутствующей электросетью, из-за высокой сложности прокладки ЛЭП или ее невозможностью, называются коммерческими. Для таких электрических станций так же, как и для промышленных устанавливается группа ветроустановок. Электрическая энергия от данной системы ветроустановок есть возможность подключаться прямо в электросеть в том случае, если агрегаты способны обеспечить переменной однофазное или трехфазное напряжение 220/380В и более. Так же возможен вариант запасания энергии от ветрогенераторов в аккумуляторы, далее преобразование из постоянного напряжения в переменное и подключение в общую электрическую сеть. Ветряные установки небольшой мощности, для монтажа которых не требуется разрешений, если его вертикальные габариты не превышают 25 метров и не мешает перелетам воздушным судам называют бытовыми. В основном данные устройства вырабатывают низкое напряжение для питания аккумуляторных батарей (в основном 12/24/48 вольт). Далее напряжение трансформируется до параметров электрической сети и подается к потребителю. Такие ветрогенераторы чаще всего используют, для питания небольших частных объектов, удаленных объектов, на дачах и так далее.

В зависимости от способа управления, энергетической системы, планируемой к подключению ветроустановки, цели и условий функционирования ВЭУ делятся на три класса: А, В, С.

В класс А входят ветряные установки, предназначенные для автономной работы с одним генератором, которые функционируют отдельно от энергетической системы. Данные установки применяются для питания маяков, систем освещения и предупреждения, связи и т.д. Мощность таких установок обычно не превышает 5 кВт. В некоторых случаях, например, для систем

отопления, могут использоваться более мощные агрегаты порядка 20 кВт. Для функционирования таких систем и поддержания их автономной работы, используют различные типы ветрогенераторов, общая стоимость которых в большей мере зависит от управляющей системы ВЭУ. Качество вырабатываемой и подаваемой электрической энергии в таких системах обычно достигается путем применения инверторов, на тиристорной или транзисторной основе, питающихся от аккумуляторных батарей. Так же иногда поддержания качества электрической энергии может быть достигнута путем применяя электрическое или механическое управление лопастями ротора (ветроколеса) для стабилизации его скорости. Использование электрической стабилизации скорости более эффективна, потому что лопасти ротора функционируют в номинальном режиме, поддерживая его постоянную скорость за счет варьирования электрической нагрузки на стороне выхода генератора (с применение нагрузки в виде балласта), а с использованием инновационных органов управления данная технология позволяет обеспечить большую надежность и дешевизну, при сравнении с механическим видом управления.

Ветряные электрические установки класса В используют приблизительно одинаковую долю ВЭУ в отношении к дизельным генераторам. Данный класс чаще применяется для небольших энергетических систем в районах, где отсутствует центральная энергетическая система или прокладка линий электрической передачи затруднено или невозможно. Использование ВЭУ приводит к значительной экономии топлива, используемого для дизельных установок. Для достижения качества электрической энергии ВЭУ используют те же самые методы, что и в классе А, описанного выше, но также существуют иные средства, например, запасание электрической энергии путем АКБ, гидроаккумулирующих станций, водородных преобразователей и т.д.

Ветряные энергетические установки класса С подключены для параллельной работы с системой, мощность которой значительно превышает



вырабатываемую ВЭУ. Этот класс при развитии ветряной энергетики в будущем окажет значительное влияние на выработку электроэнергии и энергетический баланс России и стран зарубежья. В данном классе используют ВЭУ большой мощности (1-10 МВт), для создания ветряной электрической станции (ВЭС). Для ВЭУ класса С существует ряд проблем из-за больших габарит установок, влекущих за собой наибольшую нагрузку на оборудования и механизмы. Данный класс использует вырабатываемую ВЭУ энергию для подачи ее напрямую в энергосистему без накопления. В энергосистемах чаще используются ветряные установки класса С, их мощность составляет 94% от общей мощности вырабатываемыми ветрогенераторами всех классов. При параллельной работе ВЭУ с энергосистемой достигается увеличение дешевизны и поддержания качества электрической энергии, увеличение мощности ветроустановки.

Далее рассматривается устройство и конструкции ветряных генераторов.

Визуально ВЭУ имеет достаточно простую конструкцию. На верхней части ВЭУ закреплено перемещающееся в пространстве гондола. Внутри нее находится вал, который выходит наружу, на котором закреплено ветроколесо с лопастями. В пространстве гондолы установлена вся аппаратура и оборудование, обеспечивающее функционирование ветрогенератора.

При сравнении двух наиболее применяемых конструкций ветряных установок становится понятно, что установка с вертикальной осью вращения наиболее благоприятна, из-за ее более быстрого вращения ротора при одном и том же воздушном потоке, что дает ему большую производительность, при сравнительно малых размерах.

Ортогональные ветрогенераторы при определенных внешних параметрах способны конкурировать по производительности с установками с горизонтальной осью вращения. При одинаковом параметре воздушного потока равным 10 м/с, с одинаковым размахом лопастей, размерами одной равным двум метрам, КПД данных установок равно:

- у трехлопастных установок с горизонтальной осью вращения 40%;
- у установок с вертикальной осью вращения 10-25%, в зависимости от типа используемого ротора;
- у ортогональных установок до 40%.

Лопастей горизонтальных ВЭУ больших размеров способны вращаться на благоприятный для выработки электрической энергии угол относительно набегающего воздушного потока. Из-за такой возможности продолжительность несоответствующих для работы установки направлений ветра уменьшится. На местности с постоянным сильным воздушным потоком возможно применение присоединения вала ротора с лопастями к генератору с помощью прямой передачи. Но, к сожалению, на территории нашей страны таких условий нет, в связи с этим для передачи энергии от ветроколеса к генератору осуществляется с помощью редуктора.

Существует несколько методов регулирования оборотов генератора ВЭУ, которые так же могут применяться совместно:

- регулирование угла наклона лопастей ветроколеса в отношении воздушного потока;
- применение тормозной системы;
- применение тормозного момента направленной против электродвижущей силы в обмотках генератора, зависящего, в свою очередь, от тока, который протекает по обмоткам и соответственно нагрузке питающей электрической станцией.

Главная цель системы управления работой ветрогенератора, это поддерживать такую частоту вращения вала генератора, при которой он вырабатывает напряжение какого-то определенного уровня, но частотой 50 Гц.

В конструкции ВЭУ большой мощности гондола располагается на большой высоте в основном из-за того, что на этих высотах наиболее большая скорость набегающего потока ветра. На малой высоте ветер менее сильный и его стабильность оставляет желать лучшего, но этого достаточно для

использования ветрогенераторов малой мощности. Они намного дешевле, а следовательно, в них не выгодно использовать системы, регулирующие угол поворота и наклона ротора с лопастями, которые имеют большую стоимость. В системе маломощных ВЭУ применяются АКБ, для запасаания электрической энергии, ее преобразования и использования потребителями.

В типовую конфигурацию миниветроэлектростанции входят следующие компоненты:

В состав системы с ветроустановкой малой мощности входят:

- контроллер, обеспечивающий управление установкой, для грамотной и бесперебойной работы, а соответственно и повышения качество электроэнергии, питающих подключенных к ВЭУ потребителям (регулирует обороты установки, заряжает АКБ, и производит переключение между зарядкой аккумуляторов и прямой подачей энергии к потребителям);

- блок аккумуляторных батарей. Могут применяться литий-ионные батареи, металло-полимерные и другие современные химические источники тока;

- блок АКБ;

- преобразователь напряжения (12/24/48В), для заряда АКБ от ветрогенератора;

- инвертор, обеспечивающий трансформацию постоянного напряжения АКБ, в переменное напряжение сети с частотой 50 Гц.

Если подключаемые к системе потребители работают от 12/24/48В, то их подключают напрямую к АКБ, без дополнительного инвертора (в зависимости от номинального напряжения АКБ).

### **1.3 Требования к размещению, выбору участков и типов обеспечения энергоустановок автономных источников энергии для обеспечения автономности дорожно-транспортной инфраструктуры**

Правильный выбор оборудования энергоустановок, а также место его применения является важным аспектом для их применения на автомобильных дорогах и объектах дорожного сервиса. Далее описаны требования к размещению, выбору участков и типов обеспечения применяемые для возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

«Рекомендуемые сферы объектов применения энергоустановок (различных типов), использующих ВИЭ, для применения на автомобильных дорогах и объектах дорожного сервиса в зависимости от объема потребления:

- до 100 Вт – автономные системы освещения (пешеходные переходы, железнодорожные переезды, опасные участки и т.п.);
- до 100 кВт – автономное питание систем управления движением, систем связи, телематики и малых и средних инженерных сооружений, элементов ИТС и др. объектов (мосты, туннели, скотопрогоны, объекты дорожного и придорожного сервиса и т.п.);
- до 300 кВт – интеллектуальные системы электро- и тепло снабжения малых потребителей, ИТС (объекты дорожного и придорожного сервиса, рабочие поселки, временные производственные объекты при строительстве);
- до 1 МВт - интеллектуальные системы электро- и тепло снабжения крупных потребителей (объекты дорожного и придорожного сервиса, пункты управления ИТС, временные заводы, рабочие поселки с производственными объектами и т.п.).

Факторы, влияющие на эффективность мер по обеспечению автомобильных дорог ВИЭ:

- климатические условия (скорость ветра (м/с), инсоляция л кВт/м), наличие естественных и искусственных водотоков, наличие геотермальных источников и т.д.);
- технико-экономические (цена оборудования, стоимость транспортировки и монтажа оборудования, срок эксплуатации оборудования, плата за загрязнение окружающей среды, состояние энергогенерирующего оборудования, КПД, тарифы на электроэнергию по традиционным источникам энергии и т.д.);
- экологические (воздействие на животных и птиц от вращающихся лопастей ветроустановки, воздействие на морских животных от электромагнитных полей, размер вредных выбросов и парникового эффекта и т.д.);
- географические (удаленность от централизованной системы энергоснабжения, удаленность от поставщиков органического топлива, минимальное расстояние от установки до населенных пунктов и т.д.).

Выбор места установки каждой конкретной электроустановки, использующей энергию природных возобновляемых источников, должен производиться на основании проекта привязки к местности, который должен быть выполнен на основе анализа данных из ГИС ВИЭ или иных региональных ГИС по ВИЭ.

При обеспечении автомобильных дорог ВИЭ и повышения технико-экономических характеристик устройства, размещения и эксплуатации продуктов, использующих ВИЭ, рекомендуется руководствоваться следующими принципами:

- по ветровой энергии: предпочтительно располагать ветротурбины преимущественно в прибрежных и горных районах с адекватной скоростью, плотностью и постоянством ветра, интегрируя их в ветропарки при единичной мощности турбины не менее 2-5 кВт. В рамках проекта обеспечения необходимо обеспечить минимизацию шума от работы ветроэнергостанций. Следует отдавать предпочтение

ветроэнергоустановкам, способным эффективно работать при самом слабом ветре. Шаг лопасти винта таких установок должен автоматически регулироваться таким образом, чтобы постоянно обеспечивалось максимально возможное использование энергии ветра, а при слишком большой скорости ветра лопасть должна иметь возможность автоматически переводиться во флюгерное положение, для исключения аварий. В сложных климатических условиях, должна быть предусмотрена защита лопастей и оборудования от обледенения.

- по энергии солнца: применять оптимальные конструкций гелиоприемников, следующих за максимумом светового потока с совершенствованием их преобразующих покрытий, в т. ч. на базе нанотехнологий, интегрировать приемники в гелиопарки, наладить использование стандартных солнечных панелей, не располагать гелиоприемники башенного типа в сейсмоактивных районах;

- по мини-гидроэлектростанциям: применять варианты мини-гидроэлектростанциям бездамбового типа, в т. ч., в форме «гирляндных» или погруженных генераторов тока;

- по геотермальной энергии: для автомобильных дорог проходящих в районах раскаленных массивов предусмотреть использование глубинных, в том числе петротермальных источников и тепловых насосов для выработки электроэнергии;

- по энергии океана: наряду с приливными гидроэлектростанциями использовать волновые и погруженные гидротурбины и водные тепловые насосы для комплексного использования приливов, волн, течений и теплового градиента океана.

При полном (автономном) обеспечении ВИЭ энергобаланс децентрализованной системы электроснабжения определяется соотношением графика электрических нагрузок системы и изменением энергетического потенциала возобновляемого энергоресурса» [9].

«При согласовании энергоустановок возобновляемой энергетики с потребителем должны решаться следующие задачи:

- обеспечение максимально эффективного использования возобновляемого энергоресурса;
- согласование вырабатываемой и потребляемой электроэнергии, что, в большинстве случаев, требует включения в энергосистему накопителей энергии.
- управление режимами работы преобразователей энергии, регулирование параметров генерируемой электроэнергии» [5].

#### 1.4 Технические требования к устройству и схемам работы автономных и сетевых систем ВИЭ

«Методология оценки оптимальных параметров автономного энергетического комплекса (ЭК) на основе возобновляемых источников энергии для различных климатических условий представлена на рисунке 9» [6].



Рисунок 9 - Методология оценки оптимальных параметров автономного энергокомплекса на основе ВИЭ

«ЭК используемые при полном обеспечении ВИЭ должны оснащаться интеллектуальной системой управления (ИСУ), которая должна выполнять следующие задачи:

- ИСУ должна в реальном времени максимизировать выработку энергии ВИЭ и экономию топлива при использовании дизельных электростанций при покрытии требуемой нагрузки;
- аппаратно-программное обеспечение ИСУ должно обеспечивать дистанционный мониторинг параметров и режимов работы ЭК ВИЭ в том числе в случае аварийных ситуаций;
- ИСУ должна следить за состоянием оборудования, анализировать статистику режимов работы ЭК ВИЭ и обеспечивать прогнозирование ветрового, инсоляционного и/или гидрологического режима для планирования графика работы, технического обслуживания, оценки рисков и предупреждения аварийных ситуаций;
- ЭК ВИЭ, управляемая ИСУ, должна быть адаптируемая и поставлять энергию круглосуточно, в том числе при выходе из строя части генерирующего оборудования (например, при отказе дизельной электростанции).

Критериями оптимизации при создании автономного (при полном обеспечении ВИЭ) энергокомплекса на основе ВИЭ могут быть приняты: минимум удельной стоимости электроэнергии, минимум вредных выбросов в атмосферу в эквивалентном значении (при сопоставлении с обеспечением на базе дизельных электростанций), максимум времени автономности (время автономной работы без технического обслуживания), максимум полезной выработки возобновляемой энергии» [4].

«При автономном (полном) обеспечении ВИЭ для задач снабжения малых и крупных потребителей рекомендуется использование гибридных схем, сочетающих ветровую и солнечную, и/или геотермальную и/или гидроэнергию, а также для объектов снабжения в децентрализованных



регионах с дизельной электростанцией» [9]. Схемы гибридных ЭК с различным типом подключения показаны на рисунках 10-12.

«При частичном обеспечении ВИЭ (с потенциальным переходом на полное), для задач снабжения малых и крупных потребителей рекомендуется использование гибридной схемы показанной на рисунке 10. Схема включает несколько источников электроэнергии: внешнюю сеть, ВИЭ, (ветроэлектрические установки (ВЭУ) и/или солнечную фотоэлектрическую станцию (СФЭС) и/или малую гидроэлектростанцию (МГЭС)) и традиционные автономные источники электроэнергии (АИЭ), дизельную и газопоршневую электростанции (ДЭС, ГПЭ). Статические преобразователи, используемые в составе СБЭ, инвертор (И), непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) и выпрямители (В) выполняют функции не только согласования параметров источников электроэнергии с нагрузкой, но и функции стабилизаторов напряжения» [2].

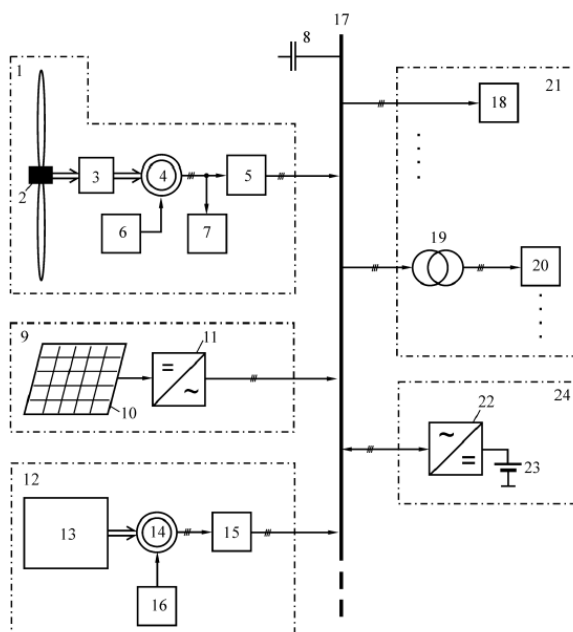


Рисунок 10 - Схема гибридной электростанции с непосредственным подключением генерирующих установок к распределительной сети объекта электроснабжения

«На рисунке 10 изображено: 1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3 – редуктор-мультипликатор; 4, 14 – синхронный электромашинный генератор; 5, 15 – устройство плавного пуска; 5, 15- регулятор тока возбуждения синхронного генератора; 7 – блок балластных нагрузок; 8 – компенсатор реактивной мощности; 9 – фотоэнергетическая установка; 10 – солнечная панель; 11 – импульсный преобразователь постоянного напряжения в переменное напряжение (инвертор); 12 – дизель-генератор; 13 – дизельный двигатель; 17 – шина переменного тока 220/380В 50 Гц; 18- потребители электроэнергии; 19 – силовой повышающий трансформатор; 20 - потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 21 – объект децентрализованного электроснабжения; 22 – двунаправленный преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение; 23 – блок аккумуляторных батарей; 24 – буферный накопитель электроэнергии» [9].

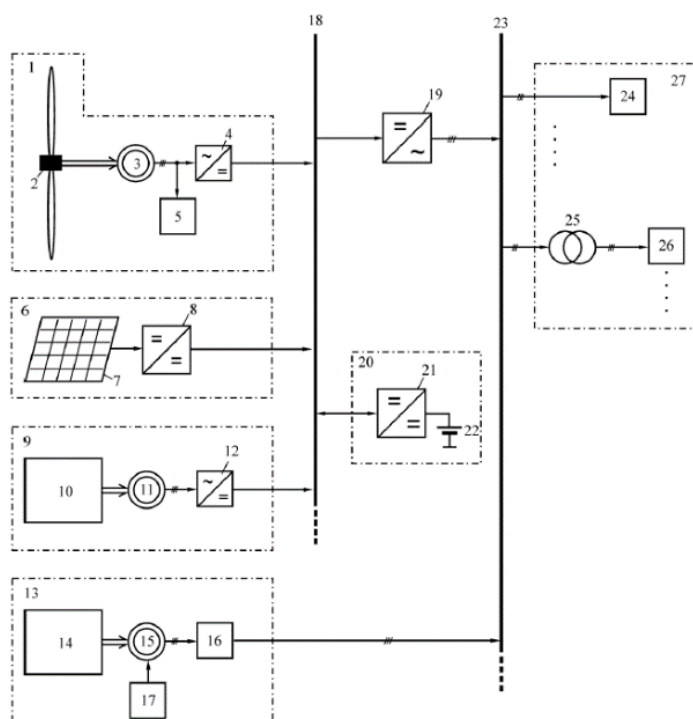


Рисунок 11 - Схема гибридной электростанции с подключением генерирующих установок к промежуточной шине постоянного тока (и при смешанном подключении)

«На рисунке 11 изображено: 1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3, 11, 15 – синхронный электромашинный генератор; 4, 12 – управляемый выпрямитель; 5 – блок балластных нагрузок; 6 – фотоэнергетическая установка; 7 – солнечная панель; 8 – конвертор напряжения; 9, 13 – дизель-генератор; 10, 14 – дизельный двигатель; 16 – устройство плавного пуска; 17 – регулятор тока возбуждения; 18- шина постоянного тока; 19 – инвертор напряжения; 20 – буферный накопитель электроэнергии; 21- двунаправленный импульсный преобразователь; 22 – блок аккумуляторных батарей; 23 - шина переменного тока 220/380В 50 Гц; 24 - потребители электроэнергии; 25 – силовой повышающий трансформатор; 26 - потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 27 – объект децентрализованного электроснабжения» [9].

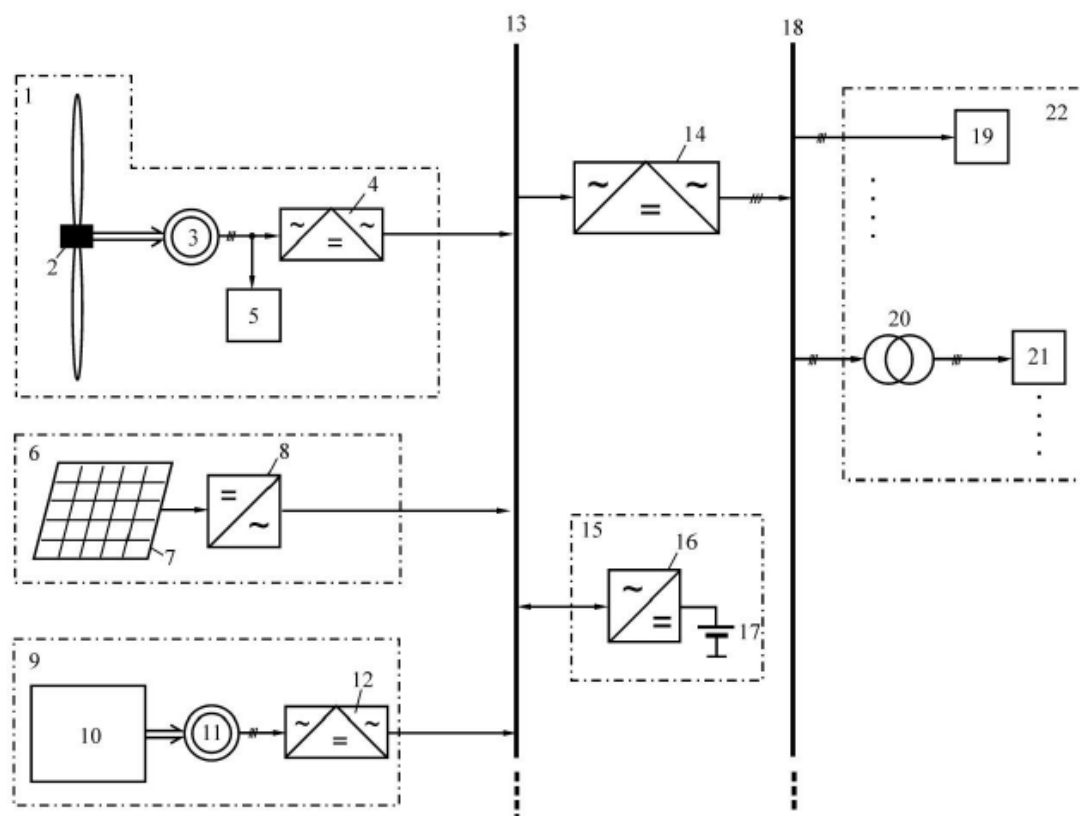


Рисунок 12 - Схема гибридной электростанции с подключением генерирующих установок через высокочастотную шину переменного тока

«На рисунке 12 изображено: 1 – ветроэнергетическая установка; 2 – ветротурбина; 3, 11 – синхронный электромашинный генератор; 4, 12, 14 – статические преобразователи частоты; 5 – блок балластных нагрузок; 6 – фотоэнергетическая установка; 7 – солнечная панель; 8 – инвертор напряжения; 9 – дизель-генератор; 10 – дизельный двигатель; 13 – шина переменного тока высокой частоты; 15 – буферный накопитель электроэнергии; 16 – двунаправленный импульсный преобразователь; 17 – блок аккумуляторных батарей; 18 – шина переменного тока 220/380 В 50 Гц; 19 – потребители электроэнергии; 20 – силовой повышающий трансформатор; 21 – потребители электроэнергии напряжением 6 или 10 кВ; 22 – объект децентрализованного электроснабжения» [9].

«На рисунке 13 показан ЭК ВИЭ, который должен обеспечивать работу в трёх режимах: Первый режим (основной) - источниками электроэнергии для потребителей переменного и постоянного тока являются ВИЭ: ВЭУ, СФЭС или МГЭС, во втором режиме источником электроэнергии для потребителей является внешняя сеть; в третьем режиме источниками электроэнергии для потребителей являются дизельная или газопоршневая электростанции» [13].

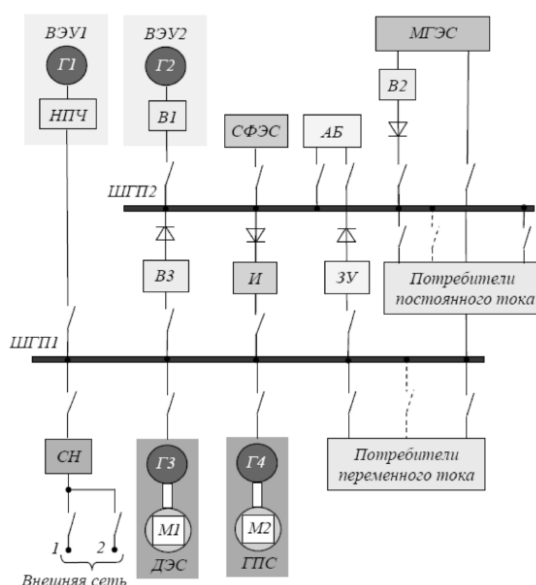


Рисунок 13 – Обобщенная структурная схема ЭК ВИЭ при частичном обеспечении

«На рисунке 13 показаны: *ВЭУ1* и *ВЭУ2* – ветроэнергетические установки; *СФЭС* – солнечная фотоэлектрическая станция; *МГЭС* – малая гидроэлектростанция; *АБ* – аккумуляторные батареи; *В1*, *В2* и *В3* – выпрямители; *И* – инвертор; *ЗУ* – зарядное устройство; *СН* – стабилизатор напряжения; *ДЭС* – дизель-электрическая станция; *ГПС* – газопоршневая станция; *Г1–Г4* – генераторы электроэнергии; *М1* и *М2* – тепловые приводные двигатели; *ШГП1* и *ШГП2* – шины гарантированного питания напряжения переменного тока и постоянного тока соответственно.

Во всех режимах функционирования, описанных выше аккумуляторные батареи должны находиться в режиме подзаряда. Аккумуляторные батареи используются только на время переключения питания потребителей от одного источника к другому» [9].

### **1.5 Методика оценки обоснования эффективности обеспечения возобновляемых источников энергии**

«Оценка эффективности применения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для электроснабжения, производится на основе сравнительного технико-экономического анализа всех возможных вариантов электрификации. При этом необходимо рассмотреть варианты электроснабжения не только от нетрадиционных источников энергии, но и вполне традиционных: централизованная энергосистема и жидко-топливные генераторы. Электроснабжение от энергосистемы предусматривает строительство линии электропередачи, а в качестве жидко-топливных генераторов наиболее распространены дизельные электростанции.

К возможным вариантам электроснабжения автономного объекта отнесены:

- централизованное электроснабжение (строительство линий электропередач (ЛЭП));

- дизельные электростанции;
- микрогидроэлектростанции;
- ветроэнергетические установки;
- солнечные электростанции.

В качестве критериев оценки, применяются 3 группы показателей:

- технические;
- экономические;
- социально-экологические» [11].

«В группу технических показателей входят сведения об основных технических характеристиках первичного источника энергии. При электроснабжении от централизованной энергосистемы определяются: требуемой установленной мощностью объекта электроснабжения  $P$  (кВт) и расстоянием до централизованной электрической сети  $L$  (км); для микрогидроэлектростанций определяется исходя из минимальной скорости течения водотока в месте установки станции  $V_{\min}$  (м/с) и минимальном расходе воды  $Q_{\min}$  (л/с); для ветроэнергетической установки является среднегодовая скорость ветра на уровне ступицы ветроколеса  $V_{\text{ср}}$  (м/с); для солнечных электростанций – среднемесячная дневная энергетическая освещенность  $E$  (кВт·ч/м<sup>2</sup>).

В качестве социально-экологических критериев эффективности применения различных вариантов электроснабжения принимают следующие:

- потенциальная угроза жизни людей;
- наличие топливной составляющей;
- отчуждение земли;
- влияние на птиц и животных;
- акустическое воздействие и вибрация;
- электромагнитное излучение.

Если количественная оценка социально-экологических критериев крайне затруднительна, то при анализе производится только их качественная оценка, которая может служить в качестве дополнительного критерия при

выборе наиболее рационального варианта электроснабжения автономного объекта.

Исходными данными для определения технических критериев являются кадастр нетрадиционных и возобновляемых источников рассматриваемого региона, технические и экономические показатели комплектующих и оборудования, выпускаемого ведущими российскими предприятиями, Государственные элементные сметные нормы (ГЭСН) на строительные и монтажные работы.

Экономическая эффективность того или иного инженерного решения определяется отношением затрат и результатов, связанных с его реализацией, и практически сводятся к оценке эффективности соответствующих капиталовложений. При оценке экономической эффективности должны также учитываться положения ОДМ «Руководство по оценке экономической эффективности использования в дорожном хозяйстве инноваций и достижений научно-технического прогресса».

Технико-экономическое обоснование делается путем сравнения трех альтернативных вариантов и имеет целью выбор оптимальных параметров, конструктивного исполнения энергообъекта и его отдельных элементов, установок, устройств. Этот выбор является результатом экономического сравнения вариантов. Критерием оптимальности энергообъекта является себестоимость 1 кВт·ч произведенной энергии.

Сравниваемые альтернативные варианты должны удовлетворять требованиям сопоставимости:

- обеспечения равенства энергетического эффекта, то есть необходимо соблюдать условия энергетической сопоставимости сравниваемых вариантов. Эти условия заключаются в одинаковых уровнях электропотребления, величины потребляемой мощности в системе, полезного отпуска электроэнергии;
- экономической сопоставимости, которые заключаются в учете всех затрат, относимых на энергетику, включая капитальные вложения в

основные фонды и нормируемые оборотные средства, а также ежегодных издержек производства. В соблюдении равной точности всех используемых в расчетах материалов (один и тот же уровень цен, одинаковые по степени точности удельные показатели стоимости и др.); в учете фактора времени при одновременности капитальных вложений.

- в учете ущерба в случае различной степени надежности вариантов;
- в учете комплексного характера затрат в обеспечении одинаковых условий труда и быта» [9].

«Во всех сравниваемых вариантах должно учитываться влияние выбираемых объектов на показатели работы остальных связанных с ними звеньев энергетического хозяйства и сопутствующих отраслей. Запрещается непосредственно сравнивать технико-экономические показатели на разных стадиях их проектирования.

Основным критерием выбора при сравнении вариантов должен являться минимум затрат» [12].

Выводы по первой главе: в данной главе рассмотрены альтернативные источники энергии их виды, требования к их установке, методы оценки эффективности и методы поиска места для установки для поддержания автономности в дорожно-транспортной инфраструктуре. Из вышеописанных данных для проектировки выбирается ветряная энергетическая установка с вертикальной осью вращения и солнечные панели монокристаллического типа.



## **2 Использование энергии, создаваемой потоком автомобилей в гибридной системе электроснабжения**

На данный момент поток энергии, выпускаемый от проезжающего транспортного средства, находит свое применение достаточно редко. При более детальном рассмотрении теории этого вопроса, становится понятно, что данная возможность действительно существует, потому что энергия затрачиваемая транспортным средством, преобразуется в иные формы энергии, которые в своем большинстве не используются.

Энергия ветра является одной из видов энергии, создающейся от проезжающего мимо транспортного средства, способной преобразоваться в иную форму энергии. Данный вид энергии способна использовать и преобразовывать в электрическую энергию независимо от направления воздушного потока вертикально-осевая ветряная энергоустановка, так как для ее работы не нужно устанавливать дополнительных устройств для ее пуска, спокойно может выдерживать сильные порывы воздушного ветряного потока, работает в достаточно широком спектре климатических и погодных условий. Но использование ветряной установки без дополнительного источника энергии является нецелесообразным, из-за дорожно-транспортной обстановки (дорожно-транспортные происшествия, заторы), которая в свою очередь влечет замедление потока транспортных средств, а в следствии затуханию энергии ветра, создаваемой от проезжающих автомобилей. Для достижения автономности системы электрического снабжения электроприемников следует использовать несколько источников питания, которые собираются в одну систему и называются гибридной энергетической установкой.

Для разработки гибридной системы электроснабжения требуется использовать несколько видов установок, работающих на разных источниках энергии или топлива, для обеспечения бесперебойной работы электроприемников, подключенных к системе. Для этого требуется проделать

ряд расчетов, в следствие которого производится выбор устройств и приборов для монтажа на энергетическую установку.

Гибридная энергоустановка включает в себя два или более альтернативных источников энергии, в связи с обеспечением бесперебойного электрического питания приемников, требующих использование достаточной энергии природных ресурсов. В гибридной системе электрического снабжения наиболее популярно использование солнечной и ветряной энергии. Применение лишь одного из источников природной энергии будет недостаточно, потому что при отсутствии ветра или солнца питание электроприемников и запас энергии в аккумуляторные батареи будет прекращен, что недопустимо.

Дизель-генераторы также применяются в качестве альтернативных источников энергии, обеспечивающих бесперебойность питания электроприемников при неблагоприятных погодных условиях.

Энергию воздушного потока впервые нашла применение в Турции. Для установки использовали ветрогенератор с вертикальной осью вращения ENLIL, изображенную на рисунке 14, которая функционирует от набегающего ветра, созданного от движения проезжающих мимо транспортных средств. Энергия ветра от больших грузовиков и автобусов создает еще большую силу ветрового потока, что позволяет вырабатывать еще больше энергии.

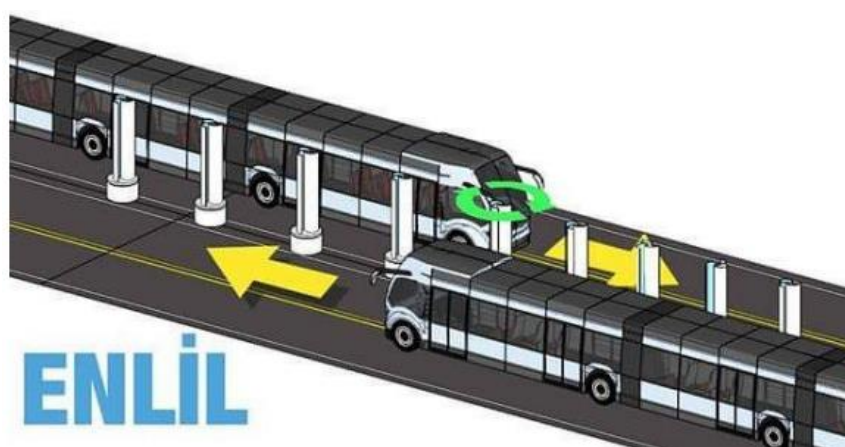


Рисунок 14 – Пример расположения вертикальных турбин Enlil

Ветрогенератор Enlil способен располагаться на небольшом участке земли из-за своей компактности, а из-за простоты конструкции легко в монтаже и дальнейшем функционировании. Сверху расположена солнечная панель, которая позволяет использовать экологичную энергию солнца для большей выработки энергии. Приблизительная мощность данных ветроустановок 1 кВт·ч. Изогнутая форма полуцилиндра лопастей ротора позволяет использовать поток воздуха небольшой мощности, раскручиваясь с нарастающей амплитудой, производя новые завихрения от раскручивания своих же лопастей.

Ветроколесо Enlil соединено с валом генератора, и выработанная электрическая энергия накапливается в аккумуляторных батареях или поступает непосредственно в сеть, для питания электроприемников. Данные установки применимы к монтажу на другой местности, не только вблизи автомагистралей и дорог общего пользования. Но разработчики рекомендуют данную установку располагать в непосредственной близости к дороге с наиболее оживленным трафиком, потому что плотный поток транспортных средств способен обеспечить бесперебойную выработку электрической энергии.

Так же разработки в области альтернативных источников электроэнергии производились в Пакистане Санвалом Муниром. Он так же разработал ветроустановку способную функционировать от набегающего потока от проезжающих мимо транспортных средств. Ветроустановка так же накапливала энергию в АКБ для дальнейшего использования потребителями.

Габаритные размеры высоты ветроустановки два с половиной метра. Ротор изготавливался из углеродного волокна, который перерабатывается, очень легкий. АКБ при полной зарядке способен накапливать около одного киловатта электрической энергии, этого хватает для функционирования двух ламп и вентилятора на протяжении 45 часов.

Применение одновременно нескольких источников альтернативной энергии, собранных в одну систему, очень выгодно с точки зрения

экономической эффективности. Данная система позволяет перейти к экологичным альтернативным видам энергии с полным отказом от центральной энергосистемы. Так же параллельная работа нескольких источников альтернативной энергии, интегрированных в одну, обеспечивает увеличенный срок службы каждого элемента системы. Бюджет на обслуживание и плановый ремонт значительно сокращается. При значительных затратах на постройку установки, она достаточно быстро окупается.

## **2.1 Анализ аэродинамической мощности, создаваемой от лобового сопротивления транспортного средства**

При передвижении транспортного средства происходит взаимодействие с воздухом, которое в свою очередь побуждает к возникновению моментов и сил, воздействующих на авто. При движении транспортного средства с одинаковой малой скоростью по горизонтальному дорожному полотну мощность для прохождения сквозь воздушный поток невелика. При возрастании скорости транспортного средства увеличиваются аэродинамические потери, затрачиваемые на преодоление воздушного потока. Для примера, среднестатистический легковой автомобиль на скорости движения равной 100 км/ч сила сопротивления воздуха равна приблизительно 75-80% от общего сопротивления. Из этого следует, что при увеличении скорости движения транспортного средства, возрастает его лобовое сопротивление, влекущее увеличения мощности и скорости воздушного потока, выпускаемого от автомобиля. Сила лобового сопротивления определяется по формуле (1):

$$F = 0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v_a^2, \quad (1)$$

где  $F$  – сила лобового сопротивления, Н;

$C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления

(обтекаемости), о.е.;

$S$  – площадь наибольшего сечения автомобиля (мидель),  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$v_a$  – скорость транспортного средства,  $\text{м}/\text{с}$ .

Мощность, затрачиваемая на преодоление лобового сопротивления определяется по формуле (2):

$$P_a = F \cdot v = 0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v_a^3, \quad (2)$$

где  $P_a$  – аэродинамическая мощность, Вт.

Диапазоны типичных значений коэффициентов сопротивления воздуха (коэффициентов обтекания)  $C_x$  для автомобилей различных типов представлены на рисунке 15.

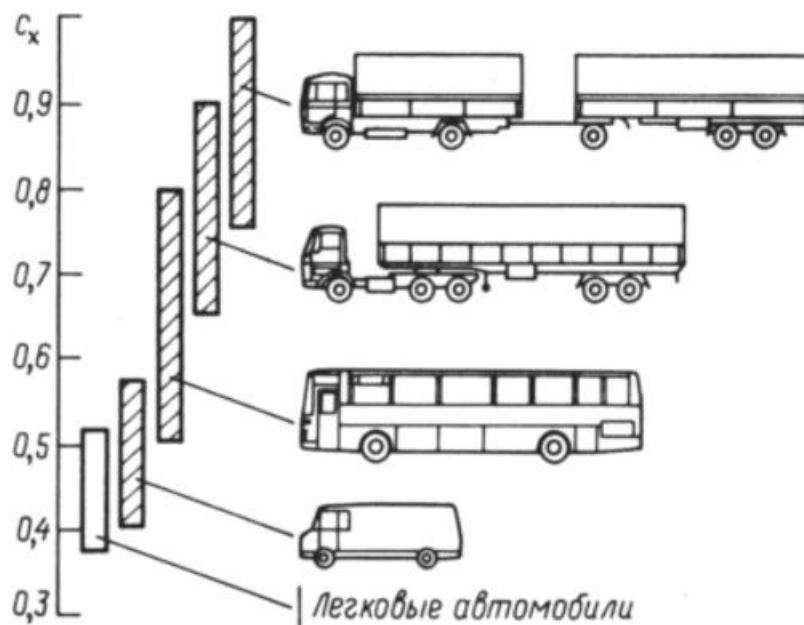


Рисунок 15 - Диапазоны типичных значений коэффициентов обтекания  $C_x$  для автомобилей различных типов

Из рисунка 15 для анализа аэродинамической мощности, создаваемой от лобового сопротивления транспортного средства, принимаются следующие коэффициенты обтекания: для автобусов  $C_x = 0,65$ ; легкового автомобиля  $C_x = 0,3$ ; грузовика  $C_x = 0,8$ . Площадь наибольшего сечения принимается: для автобусов  $S = 7,5 \text{ м}^2$ , легковых автомобилей  $S = 2,55 \text{ м}^2$ , грузовиков  $S = 10 \text{ м}^2$ .

Ниже приведена таблица 2 с результатами вычислений силы лобового сопротивления и аэродинамической мощности транспортных средств при различных скоростях.

Таблица 2 - Результаты вычислений силы лобового сопротивления и аэродинамической мощности транспортных средств при различных скоростях

Наименования транспортного средства	$V_{ТС}$ , км/ч	$V_{ТС}$ , м/с	F, Н	P, Вт
Автобус	20	5,56	90,73	504,47
	40	11,12	362,93	4035,73
	60	16,68	816,58	13620,57
	90	25,02	1837,31	45969,43
	110	30,58	2744,62	83930,46
Легковой автомобиль	20	5,56	14,24	79,16
	40	11,12	56,95	633,30
	60	16,68	128,14	2137,38
	90	25,02	288,32	7213,66
	110	30,58	430,69	13170,63
Грузовик	20	5,56	148,89	827,84
	40	11,12	595,57	6622,73
	60	16,68	1340,03	22351,71
	90	25,02	3015,07	75437,01
	110	30,58	4503,991	137732,04

На рисунке 16 представлен график функций изменения силы лобового сопротивления транспортных средств при различных скоростях.

На рисунке 17 представлен график функций изменения аэродинамической мощности, действующей на транспортные средства при различной скорости его движения.

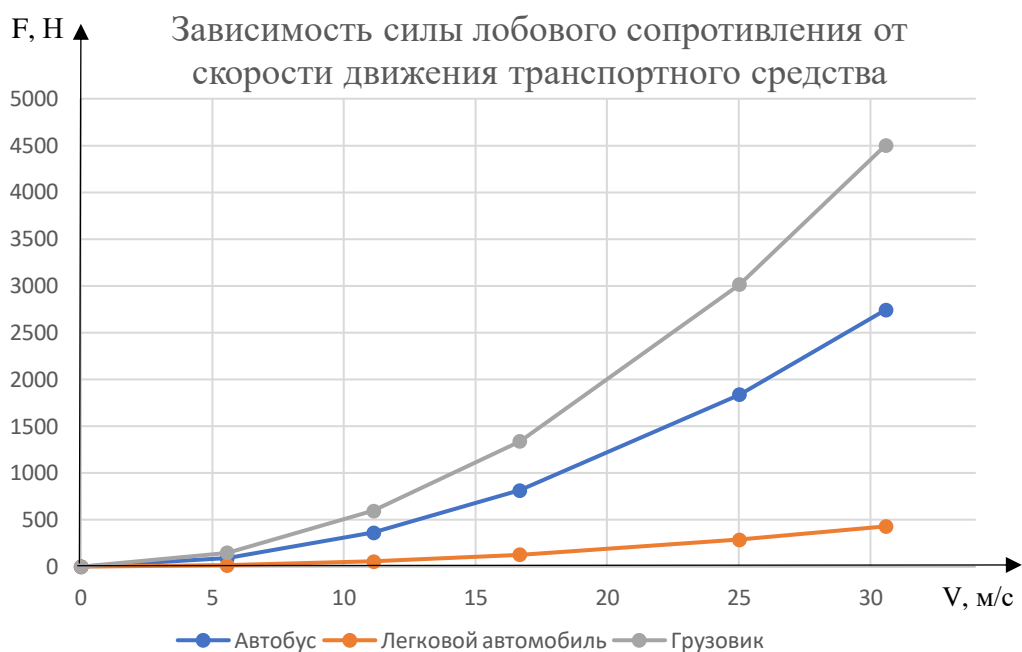


Рисунок 16 – График функций изменения силы лобового сопротивления транспортных средств при различных скоростях

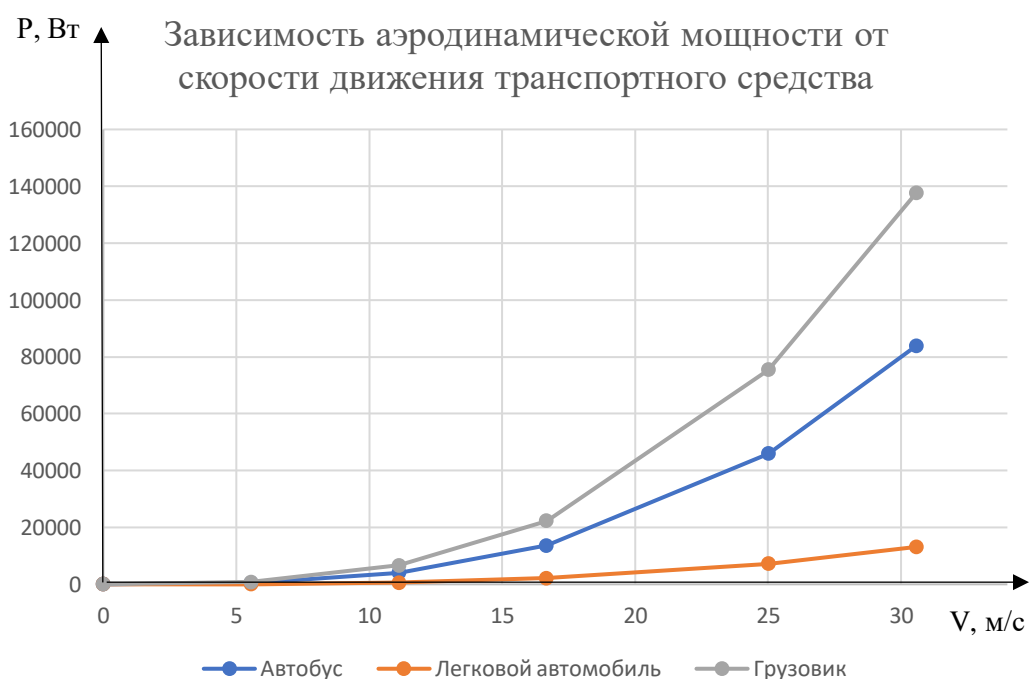


Рисунок 17 - График функций изменения аэродинамической мощности, действующей на транспортные средства при различной скорости его движения

При преодолении транспортным средством воздушного потока, как было уже сказано выше, создается сила лобового сопротивления, которая в свою очередь преобразуется в силу, создающую поток ветра. Данный поток ветра действует на окружающие транспортные средства тела и устройства. В таблице 3 представлены результаты расчетов скорости ветра, действующей на ветрогенератор, создаваемой от проезжающих мимо транспортных средств. Расчеты проделаны в программе KompasFlow для трех видов транспортных средств (грузовик, автобус, легковой автомобиль) при различных скоростях их движения (рисунки 18-20).

Таблица 3 - Результаты расчета скорости ветра, действующей на ветрогенератор, от проезжающих мимо грузовика, автобуса и легкового автомобиля

Транспортное средство	$V_{ТС}$ , км/ч	$V_{ТС}$ , м/с	$V$ , м/с
Автобус	20	5,56	2,19
	40	11,12	4,58
	60	16,68	7,02
	90	25,02	10,8
Грузовик	20	5,56	1,37
	40	11,12	3,72
	60	16,68	5,67
	90	25,02	8,66
Легковой автомобиль	20	5,56	0,64
	40	11,12	1,08
	60	16,68	1,72
	90	25,02	2,1
	110	30,58	4,5



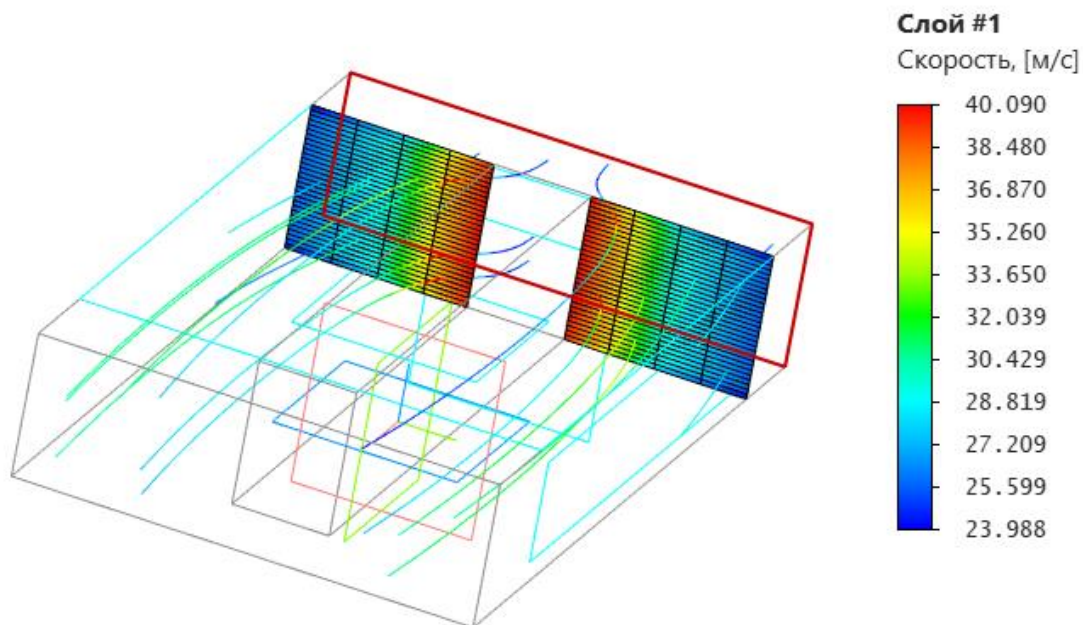


Рисунок 18 - Расчеты скорости в программе KompasFlow для грузовика (скорость грузовика 90 км/ч = 25,02 м/с)

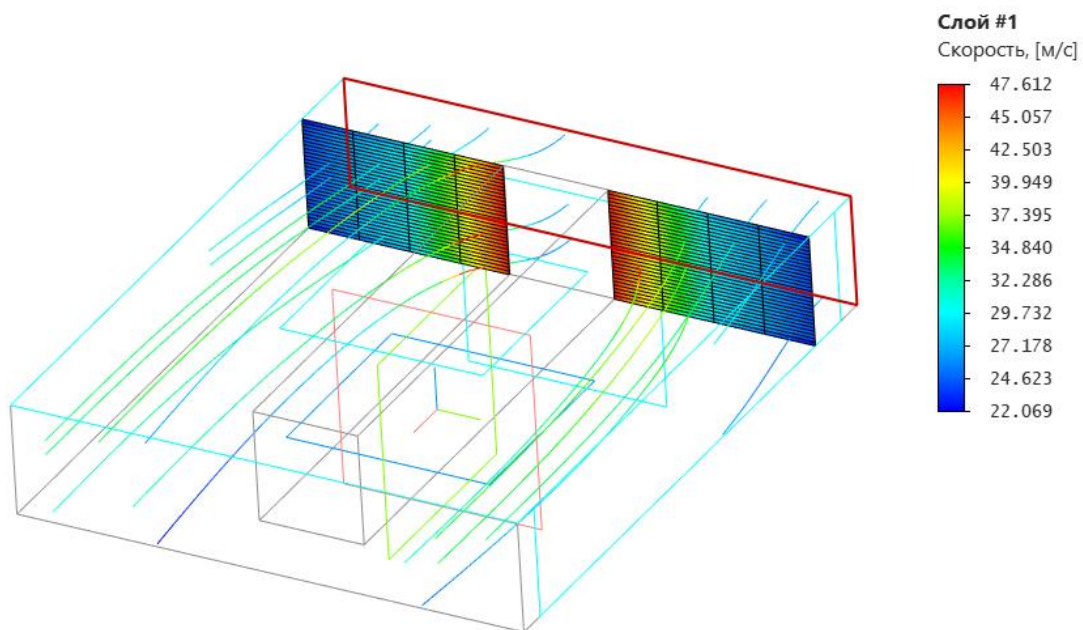


Рисунок 19 - Расчеты скорости в программе KompasFlow для автобуса (скорость автобуса 90 км/ч = 25,02 м/с)

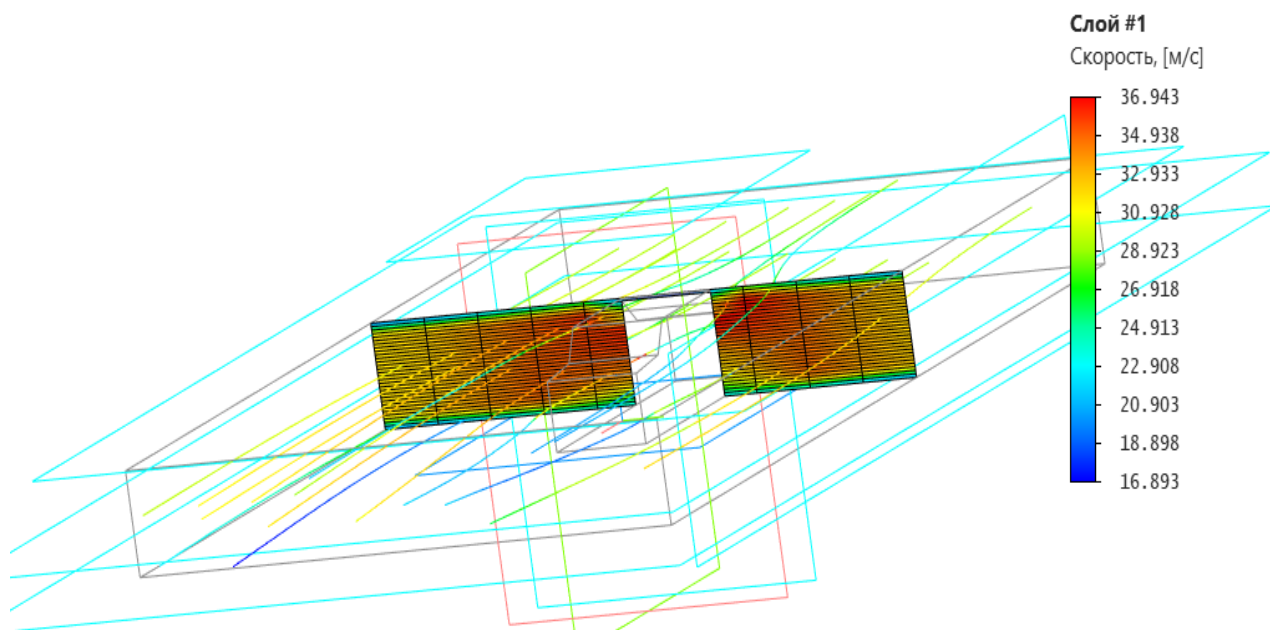


Рисунок 20 - Расчеты скорости в программе KompasFlow для легкового автомобиля (скорость автомобиля 110 км/ч = 30,58 м/с)

Из результатов расчетов из таблицы 2 видно, что скорость ветра, создаваемая от автобуса и грузовика значительно больше из-за их площади лобового сопротивления. Поэтому монтаж проектируемой ГЭУ планируется на обочине вблизи правой полосы.

## 2.2 Транспортная нагрузка на трассе М5 «Урал»

Расчет нагрузки транспортных средств на участке дорожного полотна непростая задача, но необходимая. Для учета и ведения подобной статистики применяются несколько методов, таких как подсчет вручную, по камерам дорожного наблюдения и мониторинга, инновационные автоматизированные системы.

С разработкой сложных инновационных систем существенно увеличилась точность подсчета, с минимальной погрешностью практически равной нулю. Стоит отметить, что данные системы позволяют определить

плотность потока транспортных средств даже на затрудненных участках дороги, где отсутствует возможность для монтажа стационарных постов для наблюдения.

Благодаря сбору данных плотности потока и данных непосредственно водителей транспортных средств, в России определили самые загруженные автомагистрали страны. Одна из таких трасс является М-5 «Урал».

Трасса М-5, так же называемая «Урал», проложена от Челябинска до Москвы. Данная трасса, основанная в 1960 году к началу 2000 приходила в негодность практически на всей протяженности. Это создавало достаточно большие проблемы для безопасности движения транспортным средствам, двигающимся по трассе плотным потоком. Летом плотность потока транспортных средств превысила отметку 3 автомобиля в минуту.

Становилось понятно, что плотность потока транспортных средств превышает запланированную на данной трассе. На расширение и реконструкцию трассы по государственным программам, рассчитанным до 2015 года, было потрачено немало сил, средств и времени. Для обеспечения безопасности дорожного движения производились работы по уплотнению и выравниванию грунта, добавлению барьеров (отбойников) и расширение автомагистрали.

До 2024 года планируется комплексно модернизировать дорожно-транспортную инфраструктуру, путем усовершенствования и перестроек. На данный момент разрабатывается проект стоимостью приблизительно три миллиарда рублей, по обустройству уральского участка дорожного полотна трассы. Данный участок один из самых аварийно-опасных участков трассы, из-за резких изменений климатических и погодных условий в течении дня и ночи.

На трассе М5 плотность потока зависит не только от погодных условий, но и от увеличения транспортных средств, в том числе большегрузов (порядка 7% от общего количества). Но все же большую часть составляет легковые транспортные средства - 67%, следующим по статистике является средний и

легкий грузовой транспорт – 15 и 4% соответственно, далее автобусы – приблизительно 4%.

Плотность потока транспортных средств на протяжении всей автомагистрали различный, на участках с наибольшим скоплением автомобилей их количество превышает в 3,5 раза расчетную нагрузку и приблизительно равно 25 тысячам автомобилей в сутки.

Достаточно существенная доля транспортных средств приходится на грузовики (средние, легкие, тяжелые), потому что в непосредственной близости от трассы на всей ее протяженности расположено большое количество складов. Дорожно-транспортные происшествия происходят достаточно часто, что затрудняет движение и создает дополнительные пробки.

### **2.3 Расчет параметров автономного энергопотребления гибридной энергетической установки**

«Определить пик промышленного потребителя энергии не представляет сложности, т.к. изначально известны мощность и график работы каждой единицы оборудования. Вычисление графика потребления и пика мощности частного потребителя энергии может быть проведено с той или иной вероятностью или прогнозированием в связи с непредсказуемостью графика энергозатрат. В связи с этим задача решается всегда индивидуально с соответствующими допущениями и приближениями» [8].

«Для расчета пиковой мощности требуется определить в соответствии с руководством по эксплуатации мощность каждого прибора или электроприемника  $P_i$  (Вт), который может быть использован на исследуемом объекте и занести в таблицу. Определить с соответствующими допущениями простую вероятность включения прибора в различное время суток и отметить это в таблице, проставляя мгновенную потребляемую мощность утром, днем, вечером и ночью. Сложить данные столбцов мгновенной мощности  $P_i$  и получить пиковую мощность энергопотребления РП в конкретное время суток

– утром, днем, вечером, ночью ( $P_y, P_d, P_v, P_n$ ). Эти данные используются впоследствии для расчета номинальной мощности инвертора  $P_{И}$ » [20], формула (3).

$$P_{И} > MAX(P_y, P_d, P_v, P_n). \quad (3)$$

«Из практики известно, что реальная пиковая мощность подавляющего большинства объектов в конкретное время суток меньше суммы всех мощностей находящихся на объекте приборов, поскольку все электроприборы, как правило, не включаются одновременно. Тем не менее, могут быть исключения, которые должны приниматься во внимание разработчиком» [8].

«При проведении расчетов допускается формальное увеличение пиковой мощности в конкретное время суток с целью создания запаса по мощности и прогнозирования увеличения энергопотребления в будущем» [8].

«Для расчета потребляемой энергии требуется определить с соответствующими допущениями время работы каждого прибора в конкретное время суток и занести данные в таблицу. Сложить данные столбцов «утро-день-вечер-ночь» для каждого электроприбора и умножить полученное значение на мощность прибора, получив энергопотребление каждого прибора за сутки. Сумма энергопотребления всех приборов  $E_{сут}$  будет являться количеством энергии, потребляемой объектом в сутки» [19], формула (4):

$$E_{сут} = P_i \sum T_i. \quad (4)$$

«Эти данные используются впоследствии для расчета номинальной мощности ветроэнергетической установки и аккумуляторных батарей» [22].

По формуле (5) вычисляется аэродинамическая мощность:

$$P_A = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot V \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot v \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot H \cdot D \cdot v^3}{2}, \quad (5)$$

где « $P_A$  – аэродинамическая мощность, Вт;

$m$  – масса воздуха, проходящего через ротор за 1 секунду, кг;

$v$  – скорость ветрового потока до встречи с ротором, м/с;

$\rho$  – плотность воздуха, проходящего через ротор (принимается 1,2041 кг/м<sup>3</sup> в сухом воздухе при температуре 20 °С и давлении 101,325 КПа), кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем воздуха, проходящий через ротор за 1 секунду, м<sup>3</sup>;

$H$  – высота ротора, м;

$D$  – диаметр ротора, м» [7].

По формуле (6) вычисляется электрическая мощность ветрогенератора:

$$P_{\text{э}} = \xi \cdot P_A. \quad (6)$$

где – « $P_{\text{э}}$  - электрическая мощность ветрогенератора, Вт;

$\xi$  - коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ),

(на практике равен значению из диапазона 0,09...0,48)» [8].

По формуле (7) определяется мгновенная мощность для ветроустановки с вертикальной осью вращения:

$$P_{\text{мгн.вэу}} = \frac{v^3}{2 \cdot h^{3 \cdot k_{\text{шерх}}}} \cdot \rho \cdot \xi \cdot k_{\text{устр}} \cdot N_{\text{вэу}} \cdot \left( D \cdot H \cdot \left( h + \frac{H}{2} \right) \right)^{3 \cdot k_{\text{шерх}}}, \quad (7)$$

где « $P_{\text{мгн.вэу}}$  – мгновенная мощность ВЭУ, Вт;

$v$  - скорость ветрового потока, м/с;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$k_{\text{устр}}$  - КПД сопутствующих устройств, %;

$N_{\text{вэу}}$  – количество ветроустановок, шт;

$D$  – диаметр ротора, м;

$H$  – высота ротора, м;

$h$  – высота ротора, м;

$k_{\text{шерх}}$  - коэффициент шероховатости поверхности, м» [21].

По формуле (8) производится расчет мощности ВЭУ за сутки:

$$P_{\text{ВЭУ.сут}} = P_{\text{МГН.ВЭУ}} \cdot 24, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ВЭУ.сут}}$  - мощность ВЭУ за сутки, Вт/сутки.

По формуле (9) определяется количество лопастей ветроколеса:

$$n \approx \frac{4\pi}{Z}, \quad (9)$$

где « $n$  – число лопастей, шт.;

$Z$  – быстроходность, модули» [24].

Число лопастей округляется до ближайшего.

«Далее вычисляется частота вращения ротора, которая выражается в об/мин или Гц» [27], формула (10):

$$\omega_{RPM} = \frac{60 \cdot Z \cdot v}{\pi \cdot D}, \quad (10)$$

где « $\omega_{RPM}$  – частота вращения ротора в об/мин;

$D$  – диаметр ротора» [23].

Частота вращения в Гц будет выражена, формула (11):

$$\omega_{Гц} = \frac{\omega_{RPM}}{60}, \quad (11)$$

где  $\omega_{Гц}$  – частота вращения ротора в Гц.

«Электроэнергия, будучи произведенной, должна быть немедленно потреблена. Т.е. если ВЭУ вырабатывает энергию, а потребления нет, ее необходимо запасать. Кроме этого, для покрытия кратковременных пиков энергопотребления необходим накопитель энергии, который запасает излишки энергии во время минимального потребления и отдает запасенную энергию во время максимального потребления в короткий промежуток времени» [25].

«Накопители энергии представляют собой широкое разнообразие. Накапливать энергию можно в механических устройствах (раскручивание маховика, подъем тяжелых плит), гидравлических системах (закачка воды с последующим спуском через гидротурбину), водородных накопителях (выработка водорода электролизером, запасание и дальнейшее окисление в топливных элементах), химическое аккумулирование (кислотные, щелочные, никель-кадмиевые, литий-ионные и другие аккумуляторы) и т.д. Примером простейшего аккумулирования электроэнергии может служить обычная автомобильная аккумуляторная батарея, которая и рассматривается в данной задаче» [31].

«Для определения потребляемой мощности объекта в периоды максимального энергопотребления с помощью нахождения наибольшего энергопотребления объекта и продолжительности потребления» [26], используется формула (12).

$$P_T = \frac{E_T}{T}, \quad (12)$$

где  $E_T$  – энергопотребление в часы максимальной энергозагрузки,

Вт·ч;

$P_T$  – мощность потребления, Вт;

$T$  – время потребления, ч.



«Учитывая напряжение постоянного тока регулятора  $U_{\text{рег}}$  и потребляемую мощность  $P_T$ , определяется ток потребления  $I_{\text{пот}}$ » [28] из формулы (13):

$$I_{\text{пот}} = \frac{P_T}{U_{\text{рег}}}, \quad (13)$$

где « $U_{\text{рег}}$  - напряжение постоянного тока регулятора, В;

$I_{\text{пот}}$  – ток потребления, А» [28].

По формуле (14) находится емкость АКБ с учетом потерь:

$$C_{\text{АКБ}_p} = \frac{I_{\text{пот}} \cdot T}{C_p}, \quad (14)$$

где « $C_{\text{АКБ}_p}$  - реальная емкость аккумуляторов, А·ч;

$C_p$  – глубина разряда АКБ, %» [32].

Количество аккумуляторов определяется по формуле (15):

$$m = \frac{C_{\text{АКБ}_p}}{C_{\text{АКБ}_н}}, \quad (15)$$

где  $m$  – количество АКБ, шт;

$C_{\text{АКБ}_н}$  – номинальная емкость АКБ, А·ч.

Далее рассматривается расчет солнечных панелей.

«Солнечные панели являются первоисточником электроэнергии для гибридной электростанции. Количество и мощность солнечных панелей следует выбирать, учитывая долю солнечной радиации на площадь с учетом самого темного месяца года» [3].

Среднемесячное количество пиковых солнце-часов, рассчитывается по формуле (16):

$$R_{\text{час}} = \frac{R_{\text{сум}}}{31}, \quad (16)$$

где « $R_{\text{сум}}$  — месячная суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м<sup>2</sup>;

$R_{\text{час}}$  — среднемесячное количество пиковых солнце-часов, кВт·ч/м<sup>2</sup>» [17].

Требуемая мощность солнечной батареи определяется по формуле (17):

$$P_{\text{сб}} = \frac{1,1 \cdot R_{\text{час}} \cdot (E_T - E_{\text{вэу.день}})}{U_{\text{рег}}^2 \cdot k_{\text{акб пот}}}, \quad (17)$$

где « $P_{\text{сб}}$  - требуемая мощность солнечной батареи, кВт;

$E_{\text{вэу.день}}$  – Энергия выработанная ВЭУ за день, Вт·ч;

$k_{\text{акб пот}}$  – коэффициент потерь аккумуляторной батареи» [15].

Далее определяется количество модулей солнечных батарей по формуле (18) (Обычно данное значение округляется в большую сторону).

$$N_{\text{сб}} = \frac{P_{\text{сб}}}{P_{\text{сб.н}}}, \quad (18)$$

где  $N_{\text{сб}}$  - количество модулей солнечных батарей, шт;

$P_{\text{сб.н}}$  - номинальная мощность солнечной батареи, Вт.

Число модулей, соединенных последовательно, для обеспечения требуемого выходного напряжения постоянного тока находится по формуле (19).

$$S_{\text{сб посл}} = \frac{U_{\text{рег}}}{U_{\text{сб}}}, \quad (19)$$

где  $U_{\text{сб}}$  - номинальное напряжение фотоэлектрического модуля, В;

$S_{сб посл}$  – число модулей, соединенных последовательно, для обеспечения требуемого выходного напряжения постоянного тока, шт.

По формуле (20) определяется общее количество модулей солнечных батарей:

$$N_{сб.общ} = N_{сб} \cdot S_{сб посл}, \quad (20)$$

где  $N_{сб.общ}$  - общее количество модулей солнечных батарей.

«После проведения расчета необходимо сделать проверку на предмет того, сможет ли ветроэнергетическая и солнечная установки за предыдущий период зарядить эти аккумуляторы до требуемого уровня» [8].

«С этой целью необходимо определить, какое количество энергии должно поступить от установки за период времени  $T_{i-1}$ , предшествующий исследуемому периоду  $T_i$ » [8].

«Энергия  $E_{ВЭУ-Т}$ , поступившая от ВЭУ за период  $T_{i-1}$ » [8], формула (21):

$$E_{ВЭУ-Т} = P_{мгнВЭУ} \cdot T_{i-1}, \quad (21)$$

где  $T_{i-1}$  – период времени, предшествующий исследуемому, ч.

«Энергия  $E_{СЭУ-Т}$ , поступившая от ВЭУ за период  $T_{i-1}$ » [8], формула (22):

$$E_{СЭУ-Т} = P_{сб} \cdot T_{i-1}, \quad (22)$$

где « $T_{i-1}$  – период времени, предшествующий исследуемому, ч» [8].

Общая энергия  $E_{общ}$ , поступившая от установки за период  $T_{i-1}$ , формула (23):

$$E_{общ} = E_{ВЭУ-Т} + E_{СЭУ-Т}. \quad (23)$$

«Полученная величина подлежит сравнению с потребляемой энергией и должна превышать ее» [8], формула (24):

$$E_{\text{общ}} \geq E_{\text{веч}}. \quad (24)$$

«Далее делается вывод о применимости аккумуляторных батарей для исследуемого объекта. При получении неудовлетворительного результата необходимо произвести соответствующие пересчеты. Например, увеличить мощность и/или количество ВЭУ или СЭУ, снизить энергопотребление и т.д.» [29].

Далее показана методика расчета ионистора (суперконденсатора) для автономной работы потребителей. По формуле (25) определяется энергия потребления за время работы освещения:

$$E_{\text{пот.}t} = P_{\text{н}} \cdot t, \quad (25)$$

где  $E_{\text{пот.}t}$  - энергия потребления за время работы освещения, Дж;

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность освещения, Вт;

$t$  – время работы освещения для одного транспортного средства, с.

По формуле (26) рассчитывается емкость блока суперконденсаторов.

$$C = \frac{2 \cdot E_{\text{пот.}t}}{U^2}, \quad (26)$$

где  $C$  - емкость блока суперконденсаторов, Ф;

$U$  – номинальное напряжение, В.

Далее исходя из нужного напряжения рассчитывают количество ионисторов по формуле (27):

$$n = \frac{U}{U_{и}}, \quad (27)$$

где  $n$  – количество ионисторов, шт;

$U_{и}$  – номинальное напряжение ионистора, В.

«После всех проделанных расчетов требуется произвести проверку энергетического баланса. Энергетический баланс позволяет увидеть разность между количествами подведенной и полезно-использованной энергии» [33].

Выработка ВЭУ в сутки с потерей в 20% определяется по формуле (28):

$$P_{вэуреал} = \frac{P_{вэусут}}{1,2}, \quad (28)$$

где « $P_{вэуреал}$  - выработка ВЭУ в сутки с потерей 20 %, Вт/сут» [8].

Потребление в сутки с запасом 20 % рассчитывается по формуле (29):

$$P_{потрреал} = E_{сумсут} \cdot 1,2, \quad (29)$$

где « $P_{потрреал}$  - потребление в сутки с запасом 20 %, Вт/сут» [8].

Выработка СЭУ в сутки, с потерей 20 % рассчитывается по формуле (30):

$$P_{сэуреал} = \frac{P_{сбвсех}}{1,2}, \quad (30)$$

где « $P_{сэуреал}$  - выработка СЭУ в сутки, с потерей 20 %, Вт/сут» [8].

По формуле (31) определяется баланс мощности:

$$S_{итого} = (P_{вэуреал} + P_{сэуреал}) - P_{потрреал}, \quad (31)$$

где « $S_{итого}$  - баланс мощности, Вт/сут» [8].

Если баланс мощности получается отрицательным, то снижаем энергопотребление или увеличиваем генерацию.

#### **2.4 Расчет себестоимости и рыночной цены энергетической установки**

«Расчет себестоимости энергетической установки делается на основе цен на комплектующие без учета доставки и монтажа» [30].

Сумма требуемая для реализации ГЭУ  $C_{ГЭУ-N}$ , рассчитывается по формуле (32), при этом добавив к себестоимости торговая надбавку в размере 50% от полученного значения.

$$C_{ГЭУ} = 1,5 \cdot C_{ГЭУ}, \quad (32)$$

где  $C_{ГЭУ}$  - сумма требуемая для реализации ГЭУ, руб.

$C_{ГЭУ}$  – себестоимость энергоустановки

«Реализация ГЭУ обычно производится через дилера, который занимается доставкой, монтажом и последующим обслуживанием и ремонтом ГЭУ. Дилерское вознаграждение  $D$  (т.е. скидка с цены реализации  $C_{ГЭУ-N}$ ) составляет до 10%» [8] и рассчитывается по формуле (33).

$$D = 0,1 \cdot C_{ГЭУ}, \quad (33)$$

где « $D$  - дилерское вознаграждение, руб» [8].

В данном пункте рассмотрена методика для дальнейших расчетов, представленных ниже.

## 2.5 Расчет срока окупаемости ГЭУ

«Окупаемость энергетической установки рассчитать чрезвычайно сложно, т.к. эта величина зависит от многих обстоятельств – начальной цены (т.е. цены энергоустановки с учетом доставки и монтажа), реальной скорости ветра, стоимости киловатт-часа, периодичности обслуживания, необходимости ремонта и т.д. Кроме этого, необходимо понимать, что при отсутствии энергоснабжения на объекте, находящемся на большом удалении от линий электропередач (ЛЭП), внедрение ГЭУ описывается скорее социальными улучшениями, нежели чем экономическими формулами, поскольку стоимость монтажа ЛЭП неизмеримо больше размещения энергоустановки для малого потребителя. Однако при наличии ЛЭП расчеты должны производиться с той или иной степенью погрешности и допущениями» [8].

«Среднегодовую выработку энергии  $E_{\text{годВЭУ-N}}$  определяется исходя из средней скорости ветра  $v_{\text{ср}}$  используемой энергоустановкой за год. Поскольку достаточно трудно спрогнозировать среднегодовую скорость ветра, которая будет создаваться от потока автомобилей. Поэтому  $v_{\text{ср}}$  принимает значение так же, как и для расчетов» [8], формула (5). Тогда  $E_{\text{годВЭУ-N}}$  равно формула (34):

$$E_{\text{годВЭУ}} = P_{\text{вэуреал}} \cdot T, \quad (34)$$

где « $T$  – количество часов в году, ч» [8].

Среднегодовую выработку энергии  $E_{\text{годСЭУ-N}}$  определяется по формуле (35):

$$E_{\text{годСЭУ}} = P_{\text{сэуреал}} \cdot T. \quad (35)$$

Срок окупаемости ГЭУ  $T_{\text{ВЭУ-N}}$  вычисляется по формуле (36):

$$T_{\text{ГЭУ}} = \frac{Ц_{\text{ГЭУ}} + И_0 + И_p}{(E_{\text{годВЭУ}} + E_{\text{годСЭУ}}) \cdot C_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}}, \quad (36)$$

где « $I_0$  – издержки на обслуживание ГЭУ (как правило составляют 20% от  $Ц_{\text{ГЭУ-N}}$ ), руб;

$I_p$  – издержки на ремонт ГЭУ, на практике практически равны нулю, руб;

$C_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$  – стоимость кВт·часа, руб» [8].

В данном пункте рассмотрена методика расчета окупаемости установки.

## 2.6 Расчет экономической эффективности

«Основным критерием экономической эффективности являются приведенные годовые затраты на 1 кВт установленной мощности системы электроснабжения» [8], которые определяются из выражения формула (37):

$$z = \frac{p_n K + C}{P}, \quad (37)$$

где « $P$  – установленная мощность объекта электроснабжения, кВт;

$p_n = 1 / T$  – нормативный коэффициент рентабельности, где  $T$  – экономический срок службы оборудования, лет;

$K$  – общие капиталовложения формула (38), руб;

$C$  – общие годовые эксплуатационные расходы формула (39), руб» [8].

$$K = K_{\text{уст}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{стр}}, \quad (38)$$

где « $K_{\text{уст}}$  – стоимость комплектного оборудования, руб;

$K_{\text{пр}}$  – стоимость проектных работ по определению места установки на местности, руб;



$K_{\text{стр}}$  – стоимость строительных и монтажных работ по установке электростанции (подстанции), руб» [8].

$$C = C_{\text{экс}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{топ}} + C_{\text{д.топ}}, \quad (39)$$

где  $C_{\text{экс}}$  – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения, руб;

$C_{\text{рем}}$  – годовые расходы на плановый ремонт, руб;

$C_{\text{топ}}$  – годовые расходы на топливо, руб;

$C_{\text{д.топ}}$  – годовые расходы на доставку топлива, руб.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии определяется по формуле (40):

$$C_{\text{эл}} = \frac{p_H K + C}{W}, \quad (40)$$

где « $C_{\text{эл}}$  – себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/кВт·ч;

$W$  – общее количество электрической энергии, вырабатываемое электростанцией в течение года, кВт·ч» [8].

В данном пункте рассмотрена методика расчета экономической эффективности разрабатываемой установки.

## **2.7 Технико-экономический расчет для прокладки линий ЛЭП от подстанции и установки КТП с трансформатором**

«Экономическим критерием, определяющим самый выгодный вариант, является минимум приведенных затрат» [8], который определяется по формуле (41):

$$Z = P_H \cdot K_{\Sigma} + I_{\Sigma}, \quad (41)$$

где « $Z$  – минимум приведенных затрат, руб;

$K_{\Sigma}$  – суммарные единовременные капиталовложения, руб;

$P_H$  - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  
 $I_{\Sigma}$  – суммарные расходы на эксплуатацию в год, руб» [8].

Суммарные единовременные капиталовложения рассчитываются по формуле (42):

$$K_{\Sigma} = K_{Л} + K_{П}, \quad (42)$$

где  $K_{Л}$  - единовременные капиталовложения в сооружаемые линии, руб;

$K_{П}$  - единовременные капиталовложения в сооружаемые подстанции, руб.

В данном пункте представлена методика экономического расчета для прокладки линий электропередач и установки КТП.

## **2.8 Результаты расчета гибридной энергоустановки**

Для расчета и проектирования разработана установка, которая предполагается к монтажу для питания освещения и камер ГИБДД аварийно-опасного участка трассы М5 Урал. От потока воздуха, создаваемом от транспортного средства при проезде мимо электроустановки, приводятся в ветрогенераторы, которые передают электроэнергию на питание систем освещения. ГЭУ установлена заблаговременно от опасного участка дороги, что позволяет заменить аккумуляторные батареи на ионисторы (суперконденсаторы), которые в свою очередь удешевляют установку. Освещение загорается поочередно, расчетное время горения одной лампы 6 секунд на одно транспортное средство. В дневное время суток, ветроустановки заряжают АКБ, установленные для питания камер ГИБДД.

В таблице 4 представлены данные расчета нагрузки электроприемников, требуемые питания от разрабатываемой энергоустановки. Для расчета времени работы освещения принято во внимание ночная загрузка трассы М5

Урал 480 автомобилей в час и время горения освещения 6 секунд на одну машину.

Таблица 4 - Данные расчета нагрузки электроприемников

ЭП	P <sub>i</sub> , Вт	T <sub>i</sub> , ч		E, Вт·ч
		День, 12 ч	Ночь, 12 ч	
Камеры ГИБДД	100	12	12	2400
Освещение	400	0	9,6	3840
Итого за сутки:	500	1200	5040	6240

В таблице 5 отражены результаты расчета аэродинамической и электрической мощности, частоты вращения ветрогенераторов при различной скорости трех видов транспортных средств, и при расчетной скорости.

Таблица 5 - Результаты расчета аэродинамической и электрической мощности, частоты вращения ветрогенераторов при различной скорости трех видов транспортных средств, и при расчетной скорости

Транспортное средство	v м/с	P <sub>A</sub> , Вт	P <sub>Э</sub> , Вт	ω <sub>РPM</sub> , об/мин	ω <sub>Гц</sub> , Гц
Автобус	2,19	5,634334	1,408584	126,8095	2,113492
	4,58	51,53552	12,88388	265,19977	4,419996
	7,02	185,5759	46,39398	406,48523	6,774754
	10,8	675,743	168,9357	625,3619	10,4227
Грузовик	1,37	1,379342	0,344836	79,328315	1,322139
	3,72	27,61462	6,903655	215,40243	3,590041
	5,67	97,78212	24,44553	328,315	5,471917
	8,66	348,3886	87,09715	501,4476	8,35746
Легковой авто	0,64	0,140621	0,035155	37,058483	0,617641
	1,08	0,675743	0,168936	62,53619	1,04227
	1,72	2,729579	0,682395	99,594673	1,659911
	2,1	4,967846	1,241962	121,59815	2,026636
	4,5	48,88187	12,22047	260,56746	4,342791
Средняя расчетная скорость	7,99	273,6217415	131,3384359	462,6519977	7,710866628

Поскольку данная установка предусматривается для монтажа на трассе (автомагистрали), для расчетной скорости приняты значения скорости,

создаваемые от грузовика и автобуса двигающихся со скоростью 90 км/ч и легкового автомобиля двигающийся со скоростью 110 км/ч.

В таблице 6 представлены результаты расчета мгновенной мощности ветряной электрической установки, выработка энергии за сутки и за день при различных скоростях ветра. Для расчета вырабатываемой дневной и суточной мощности ветроустановки приняты во внимание дневная и ночная загрузка трассы М5 Урал 600 и 480 автомобилей в час соответственно.

Таблица 6 - Результаты расчета мгновенной мощности ветряной электрической установки, выработка энергии за сутки и за день при различных скоростях ветра

Транспортное средство	$v$ м/с	$P_{\text{мгн.вэу}}$ , Вт	$P_{\text{вэу.сут}}$ , Вт·сут	$P_{\text{вэу.день}}$ , Вт·день
Автобус	2,19	9,106022	196,6901	109,27227
	4,58	83,28999	1799,064	999,47986
	7,02	299,9216	6478,306	3599,0588
	10,8	1092,113	23589,64	13105,358
Грузовик	1,37	2,229246	48,15172	26,750956
	3,72	44,62983	964,0042	535,5579
	5,67	158,0322	3413,495	1896,3862
	8,66	563,054	12161,97	6756,6479
Легковое авто	0,64	0,227266952	4,908966163	2,727203424
	1,08	1,092113139	23,5896438	13,10535766
	1,72	4,411453504	95,28739569	52,93744205
	2,1	8,028866739	173,4235216	96,34640087
	4,5	79,00123978	1706,426779	948,0148774
Средняя расчетная скорость	7,99	410,2183	9551,915	5306,6195

В таблице 7 представлены результаты расчета аккумуляторных батарей.

Таблица 7 - Результаты расчета аккумуляторных батарей

$P_{\text{ночь}}$ , Вт	$I_{\text{пот}}$ , А	$C_{\text{акб.р}}$ , А·ч	$m$ , шт	$S_{\text{акб.посл}}$ , шт	$m_{\text{всего}}$ , шт	$C_{\text{акб.ном}}$ , А·ч	$U_{\text{акб.ном}}$ , В	$K_{\text{акб.пот}}$
66,23	2,76	110,38	0,74≈1	2	2	150	12	1,2

По результатам расчета в таблице 7 для установки выбраны 2 АКБ 150 А·ч каждая [1].

В таблице 8 представлены результаты расчета солнечных батарей.

Таблица 8 - Результаты расчета солнечных батарей

$R_{\text{час}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	$P_{\text{сб}}, \text{кВт}$	$N_{\text{сб.мод}}, \text{шт}$	$U_{\text{сб}}, \text{В}$	$P_{\text{сб.н}}, \text{Вт}$	$R_{\text{сум}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$
0,092	0,117	1,167 $\approx$ 2	24	100	2,86

По результатам расчета в таблице 8 для установки выбраны 2 солнечные панели 100 Вт каждая [14].

В таблице 9 показаны результаты проверки АКБ, где  $E_{\text{ВЭУ.д}}$  – дневная выработка ВЭУ,  $E_{\text{СЭУ.д}}$  – дневная выработка СЭУ,  $E_{\text{д}}$  - общая выработка энергии за день,  $E_{\text{д.снагр}}$  - общая выработка энергии за день с учетом нагрузки,  $E_{\text{н}}$  – общая выработка энергии за ночь,  $E_{\text{пот.ночь}}$  – общее потребление энергии за ночь.

Таблица 9 - Результаты проверки АКБ

$E_{\text{ВЭУ.д}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{СЭУ.д}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{д}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{д.снагр}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{н}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{пот.ночь}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{д.снагр}} > E_{\text{пот.ночь}} - E_{\text{н}}$
5306,62	1800	7106,62	5906,62	4245,3	5040	5906,62 > 794,7

В таблице 10 отражены результаты расчета ионистора.

Таблица 10 - Результаты расчета ионистора

$E_{\text{пот}}, \text{Вт}\cdot\text{с}$	$C, \text{Ф}$	$n, \text{шт}$	$C_1, \text{Ф}$
3000	41,67	4,44 $\approx$ 5	208,3333

По результатам расчета в таблице 2.9 для установки выбраны 5 ионисторов 2,8В, 320 Ф каждый соединенных параллельно [18].

В таблице 11 показаны результаты расчета энергобаланса, где  $E_{ВЭУ}$  - выработка электроэнергии от ВЭУ за сутки,  $E_{СЭУ}$  - выработка электроэнергии от СЭУ за сутки,  $E_{ВЭУ.Р}$  - выработка электроэнергии от ВЭУ за сутки с учетом потерь 20%,  $E_{СЭУ.Р}$  - выработка электроэнергии от СЭУ за сутки с учетом потерь 20%,  $E_{ПОТ}$  – потребление электроэнергии за сутки с запасом в 20%,  $S_{ИТОГО.СУТ}$  – переменная для обозначения энергобаланса.

Таблица 11 Результаты проверки энергобаланса

$E_{ВЭУ},$ Вт·ч	$E_{СЭУ},$ Вт·ч	$E_{ВЭУ.Р},$ Вт·ч	$E_{СЭУ.Р},$ Вт·ч	$E_{ОБЩ.Р},$ Вт·ч	$E_{ПОТ,СУТ.Р},$ Вт·ч	$S_{ИТОГО.СУТ},$ Вт·ч	$S > 0$
9551,92	1800	7959,93	1500	9459,93	7488	1971,93	1971,93 > 0

В таблице 12 представлены расчет себестоимости оборудования энергоустановки.

Таблица 12 - Расчет по себестоимости оборудования энергоустановки

Наименование	Цена за шт, руб	Количество, шт	Стоимость, руб
<b>Покупные изделия</b>			
Генератор аксиальный 12 В 600 Вт	41160	3	123480
Пластиковый дорожный барьер 2,0 м Длина – 2000 мм, Ширина - 500мм, Высота – 750 мм Условный объем – 0,6 м <sup>3</sup>	5600	4	22400
Лопасты труба 200 (160)x2000	2000	9	18000
Контроллер	1500	3	4500
АКБ	30500	2	61000
Ионисторы 320 Ф; 2,7В	1173	6	7038
Солнечная панель 100 Вт	7500	2	15000
<b>Материалы</b>			
Труба профильная 60x60x2	1800	2	3600
Труба 60x30x2	1400	3	4200
Уголок 40x40x4	1500	1	1500
Забор «Зд» 1500 мм	1000	8	8000
Фланец 120 т5	500	3	1500
Метизы	-	-	13510,9

Продолжение таблицы 12

Наименование	Цена за шт, руб	Количество, шт	Стоимость, руб
<b>Шкаф управления</b>			
Корпус металлический ЩМП-2-0У2 IP54	6000	1	6000
Контроллер Matrix 22-33-70-0	34000	1	34000
Контроллер Matrix 10-20-90-0	27900	1	27900
Модуль NA-018	6000	1	6000
Блок питания 24В DR-60W-24 PROxima	2700	1	2700
Пластина концевая (клемма 2.5-10 мм.кв.) серая	45	2	90
Упор торцевой ВТ/3	75	10	750
Датчик тока ZMCT103C	600	3	1800
Датчик напряжения DC 0-25В	400	1	400
Датчик напряжения ZMPN101В	400	3	1200
Повышающий DC-DC преобразователь XL6019	500	1	500
Понижающий DC-DC преобразователь LM2596HVS	500	1	500
PS2 бесконтактные индуктивные датчики	1000	3	3000
Датчик скорости ветра АСЦ-3	10000	3	30000
Контроллер заряда солнечной батареи 30А	9000	1	9000
Диодный мост 3-фазный DB25-06	1000	3	3000
Диод силовой VS-40HF160 1.6кВ 40А	2000	4	8000
<b>ИТОГО:</b>	-	-	<b>421748,9</b>

В таблице 13 отражены результаты расчета рыночной цены и срока окупаемости установки.

Таблица 13 - Результаты расчета рыночной цены и срока окупаемости установки

Куст, руб	Цгэу, руб	Д, руб	Егод.вэу, кВт·ч	Егод.сэу, кВт·ч	Тгэу, лет
421748,9	632623,35	63262,335	3486,45	1314	5,1

В таблице 14 представлены результаты расчета энергетической эффективности энергоустановки.

Таблица 14 - Результаты расчета экономической эффективности ГЭУ

К, руб	С, руб	Сэл, руб/кВт*ч	З, руб/кВт
521748,9	136524,67	37,5	70784,01

В таблице 15 представлены результаты технико-экономического расчета альтернативного варианта с прокладкой линий ЛЭП от подстанции и установки КТП с трансформатором. Для расчета стоимость прокладки кабеля 10 кВ вместе с материалом 400 тыс. руб/км, стоимость КТП 300 тыс. руб., длина линии 10 кВ 2 километра.

Таблица 15 - Результаты технико-экономического расчета альтернативного варианта с прокладкой ЛЭП от подстанции и установки КТП с трансформатором

Ил, руб	Ип, руб	Кп, руб	Кл, руб	Рн	Ис, руб	Кс, руб	З, руб
25600	27900	300000	800000	0,2	53500	1100000	273500

Выводы к разделу: в данном разделе рассмотрено использование энергии, создаваемой потоком автомобилей в гибридной системе электроснабжения, методика расчета ветряной энергетической установки, солнечной энергетической установки и методика их совместного расчета, произведен анализ аэродинамической мощности, создаваемой от лобового сопротивления транспортного средства. Проведен расчет по результатам которого, можно сделать вывод, что рассматриваемая энергоустановка рентабельна для монтажа, так как баланс мощностей  $S > 0$ , а годовые затраты на 1 кВт энергии у проектируемой ГЭУ практически в 4 раза больше, чем у 2 варианта с прокладкой ЛЭП и установкой КТП.



### 3 Сравнительный анализ эффективности применения генераторов для зарядки аккумуляторных батарей

Объектом исследования являются ветрогенераторы производства КНР, краткие технические характеристики представлены в таблице 16.

Целью работы является сравнительный анализ эффективности применения указанных в таблице 16 генераторов для зарядки аккумуляторных батарей.

Таблица 16 - Краткая техническая характеристика генераторов

№	Наименование	Заявленная мощность, Вт	Номинальное напряжение, В
1	RC-600XV	600	24
2	RC-500Y	500	12
3	S-300	300	12/24

#### 3.1 метрологическое обеспечение

Метрологическое оборудование представлено в таблице 17.

Таблица 17 – Измерительное и преобразующее оборудование

№	Наименование средств измерений	Тип, фирма	Диапазон измерения	Погрешность измерений
1	Частота вращения (бесконтактный измеритель частоты вращения)	DT2234B	0-10000 мин <sup>-1</sup>	± 5 мин <sup>-1</sup>
2	Сопротивление обмотки генератора (межфазное)	ROBITON DMM-800	200 Ом	± 1 Ом
3	Напряжение постоянного тока	ROBITON DMM-800	0-200В	± 0,5 В
		ROBITON DMM-200	0-200 В	± 0,5 В
4	Шунт	160 ШИМ-60	0-160 μВ	0,5
5	Контроллер	FW 12/24		
6	Трехфазный мостовой выпрямитель	VD – 600 (6 шт)		

Схема подключения генератора представлена на рисунке 21 и 22.

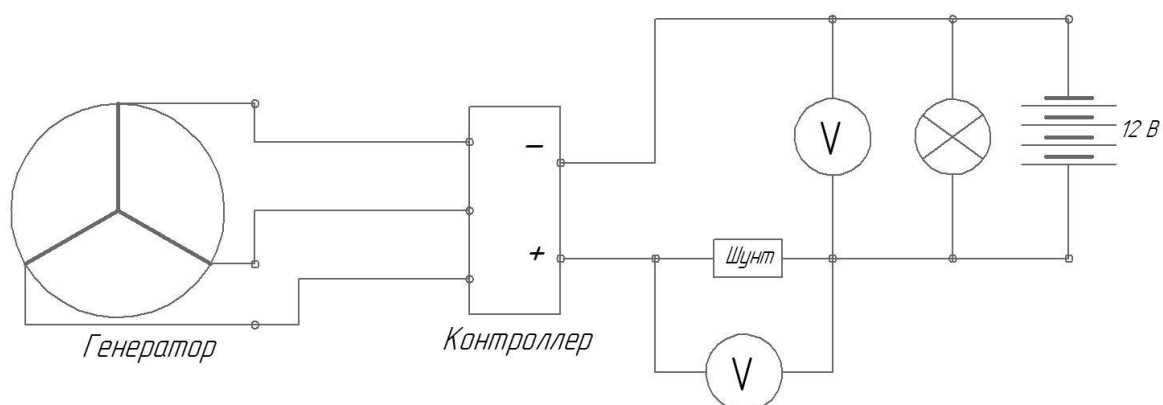


Рисунок 21 - Схема подключения генератора с использованием контроллера FW 12/24

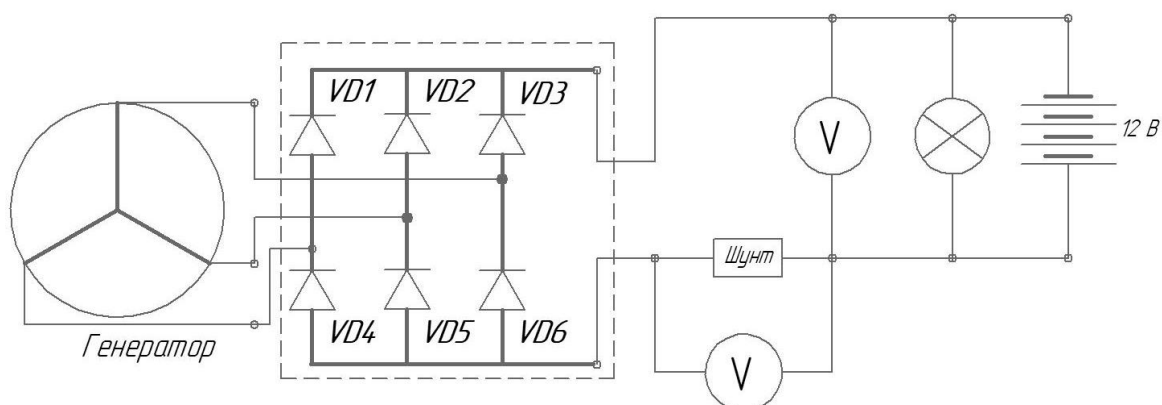


Рисунок 22 - Схема подключения генератора с использованием трехфазного мостового выпрямителя

### 3.2 Результаты испытаний

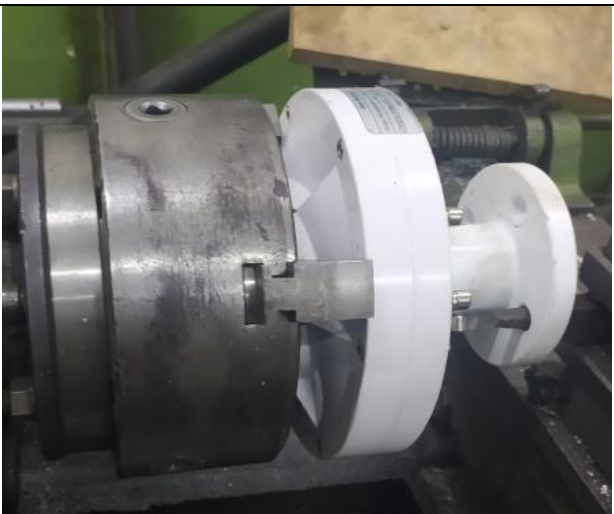
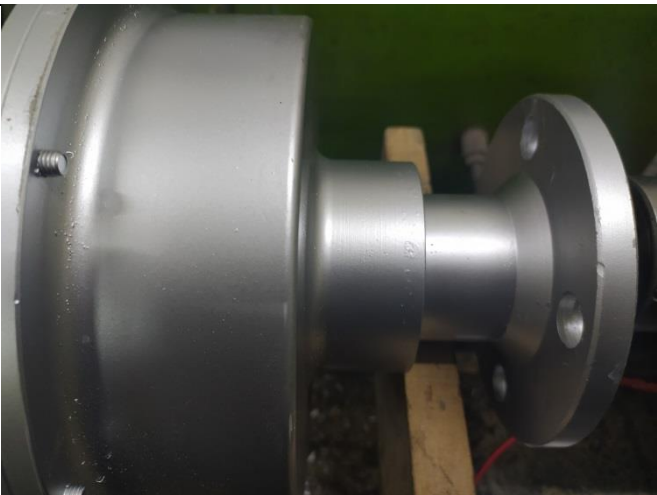
Сопротивление обмоток статора генератора представлено в таблице 18. При определении принималось соединение обмоток статора по схеме «звезда».

Таблица 18 - Сопротивление обмоток статора генератора

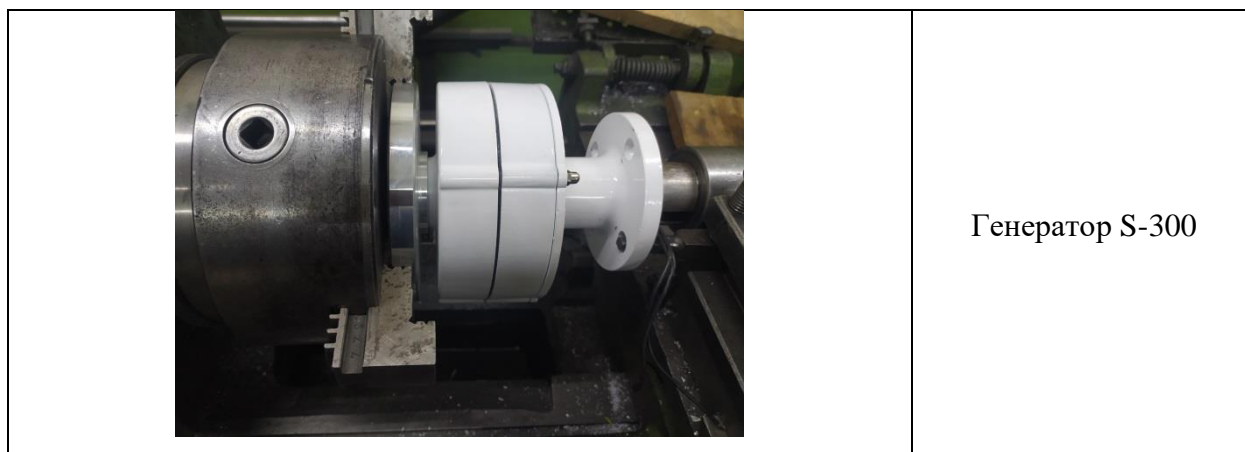
№	Наименование	Фаза	Межфазное сопротивление, Ом	Среднее фазное сопротивление, Ом
1	RC-600XV	AB	10,0	5
		BC	10,0	
		CD	10,0	
2	RC-500Y	AB	19,0	10
		BC	19,0	
		CD	20,0	
3	S-300	AB	66,0	33
		BC	66,1	
		CD	66,4	

В таблице 19 показаны генераторы, испытываемые на стенде.

Таблица 19 – Генераторы установленные на стенд

	<p>Генератор RC-600XV</p>
	<p>Генератор RC-500Y</p>

Продолжение таблицы 19



В таблице 20-22 зафиксированы результаты определения мощности исследуемых генераторов.

Таблица 20 – Результаты определения мощности генератора генератор RC-600XV (схема включения 1)

№	$n, \text{мин}^{-1}$	$I_a, \text{A}$	$V_H, \text{B}$	$P(\text{BA})$
1	12,5	0	12,08	0
2	16	0	12,08	0
3	20	0	12,08	0
4	25	0	12,08	0
5	28	0	12,08	0
6	35,5	0	12,08	0
7	45	0	12,08	0
8	56	0,12	12,10	1,45
9	65	0,36	12,01	4,32
10	81,5	0,8	12,07	9,66
11	100	1,36	12,10	16,45
12	127	2,16	12,15	26,25
13	170	3,36	12,22	41,08
14	212	4,44	12,29	54,60
15	261	5,64	11,99	67,65
16	377	8,52	12,13	103,41
17	430	10,16	12,20	124,049
18	560	11,04	12,72	140,49

Таблица 21 – Результаты определения мощности генератора генератор RC-500Y (схема включения 1)

№	n, мин <sup>-1</sup>	Ia, А	Vн, В	P(ВА)
1	12,5	0,00	12,10	0,00
2	20	0,00	12,10	0,00
3	26	0,00	12,10	0,00
4	28	0,00	12,10	0,00
5	33,5	0,00	12,10	0,00
6	45	0,00	12,10	0,00
7	59	0,00	12,10	0,00
8	63	0,00	12,10	0,00
9	82	0,16	12,10	1,94
10	100	0,36	12,10	4,36
11	127	0,68	12,10	8,23
12	170	1,16	12,10	14,04
13	212	1,68	12,10	20,33
14	262	2,20	12,10	26,63
15	334	2,88	12,10	34,86
16	379	3,24	12,10	39,21
17	475	4,00	12,10	48,41
18	583	4,56	12,10	55,19

Таблица 22 – Результаты определения мощности генератора генератор S-300 (схема включения 1)

№	n, мин <sup>-1</sup>	Ia, А	Vн, В	P(ВА)
1	18	0,00	12,01	0,00
2	20	0,00	12,01	0,00
3	28	0,00	12,01	0,00
4	35	0,00	12,01	0,00
5	45	0,00	12,01	0,00
6	59	0,00	12,01	0,00
7	63	0,00	12,01	0,00
8	80	0,00	12,01	0,00
9	128	0,04	12,01	0,48
10	170	0,12	12,01	1,44
11	213	0,24	12,01	2,88
12	262	0,36	12,01	4,32
13	334	0,52	12,01	6,25
14	380	0,60	12,01	7,21
15	475	0,80	12,01	9,61
16	585	1,00	12,01	12,01

На рисунок 23 показано сравнение вырабатываемой мощности генераторами (схема включения 1).

В таблице 23 отражены показания холостого хода генераторов. На рисунке 24 изображена зависимость напряжение холостого хода исследуемых генераторов.

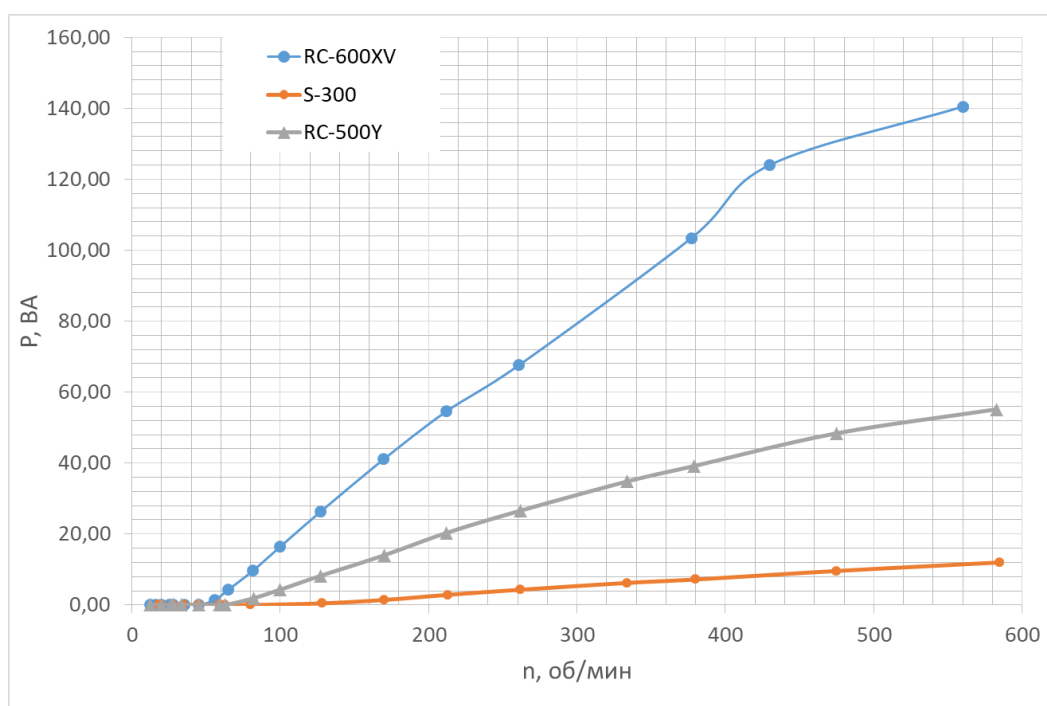


Рисунок 23 – Сравнение вырабатываемой мощности генераторами (схема включения 1)

Таблица 23 - Определение напряжения холостого хода

№	RC-600XV		S-300		RC-500Y	
	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В
1	16	4,06	16	2,04	16	3,1
2	20	5,05	20	2,6	20	3,8
3	25	6,58	25	3,38	25	4,9
4	28	7,55	28	3,86	28	5,6
5	35,5	9,5	35,5	4,94	35,5	7,1
6	45	11,8	45	6,15	45	8,9
7	56	15,2	56	7,95	56	11,4
8	63	16,9	63	8,95	63	12,8
9	80	21,2	80	11,32	80	16,2

Продолжение таблицы 23

№	RC-600XV		S-300		RC-500Y	
	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В	n, мин <sup>-1</sup>	U <sub>хх</sub> , В
10	100	26,3	100	13,97	100	20
11	125	33,6	125	-	125	25,7
12	160	44,9	160	23,8	160	34,2
13	200	56,6	200	30	200	43
14	250	69,6	250	37,1	250	53,2
15	315	88,9	315	47,5	315	68
16	355	101,1	355	54	355	-
17	450	126,8	450	67,8	450	97,1
18	560	156,1	560	83,6	560	-

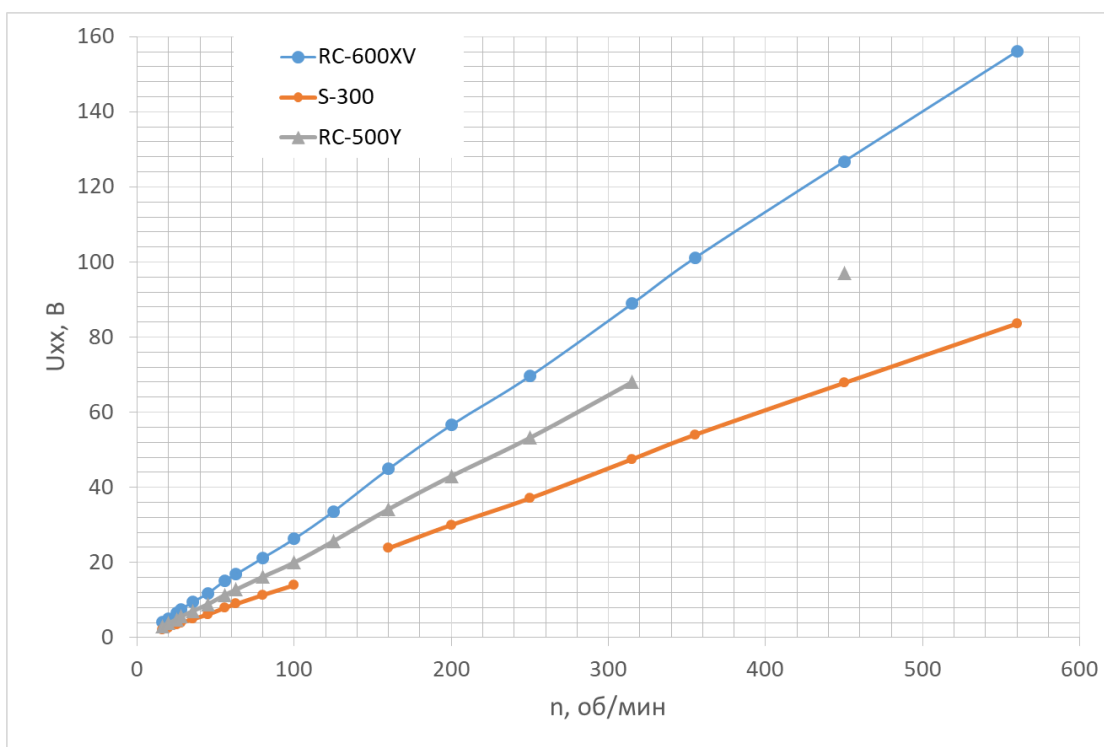


Рисунок 24 – Напряжения холостого хода (схема включения 2)

### 3.3 Описание схемы подключения модулей к общей сети

На рисунке 25 представлена схема подключения потребителей модуля ветрогенератора.

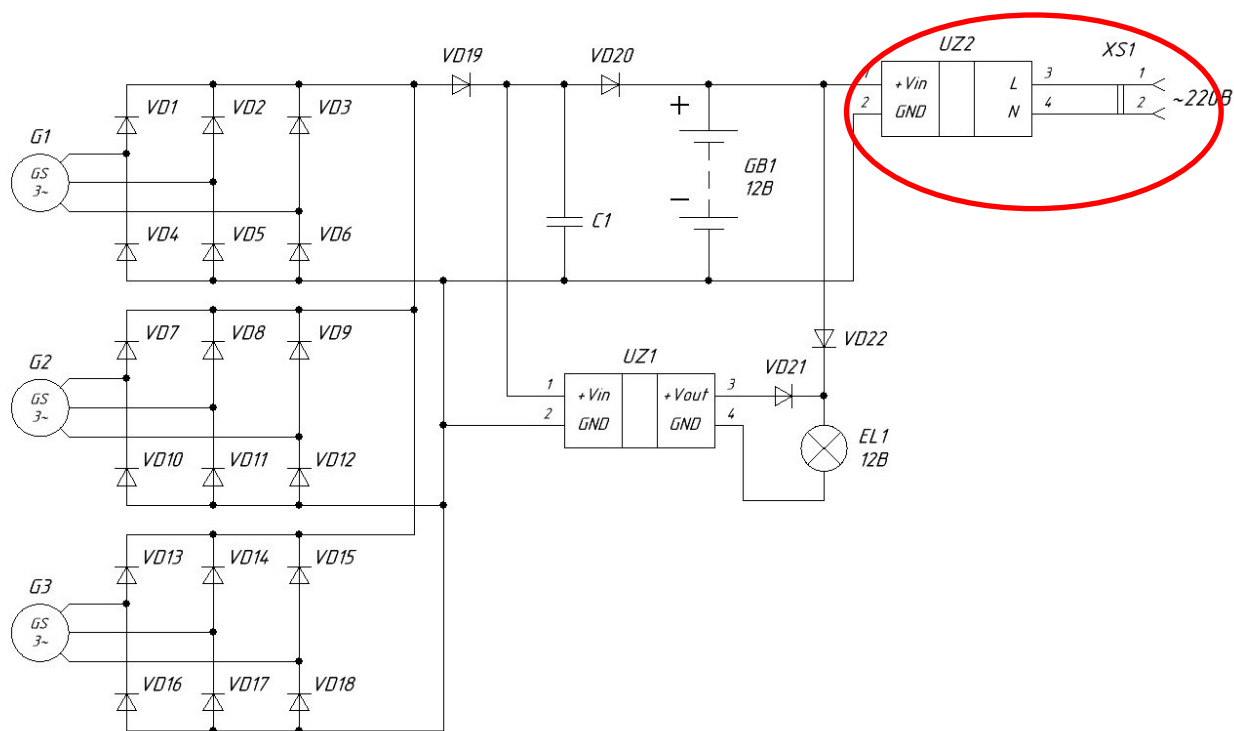


Рисунок 25 - Схема подключения потребителей модуля ветрогенератора

Схема на рисунке 25 работает следующим образом: диоды VD 1-6, VD 7-12, VD 13-18 – формируют мост, в котором выпрямляется переменный 3-х фазный ток, получаемый от генератора (G1, G2, G3). Допускается применять готовые выпрямители аналогичной мощности. Выпрямленный ток через диод VD 19 заряжает конденсатор (ионистр) C1. В качестве ионистра предлагается использовать ионистр емкостью  $C = 100 \text{ Ф}$  или аналог. На рисунке 26 представлена сборка такого ионистра с балансировочной платой. В случае если выпрямленное напряжение, вырабатываемое генераторами G1-3 меньше напряжения АКБ (GB1), то питание потребителя EL1 осуществляется от преобразователя UZ1 (стабилизатор напряжения, например, LM2596 или аналог). В случае если выпрямленное напряжение с генераторов G1-3 достигает значения напряжения АКБ, АКБ начинает заряжаться. При этом питание потребителя EL1 осуществляется от АКБ (GB1). Преобразователь (сетевой преобразователь) UZ2 работает в диапазоне напряжения от 10 до 15 В (данные значения регулируются в зависимости от типа батареи). В случае



уменьшения напряжения на АКБ менее 10 В преобразователь отключается, при этом батарея начинает заряжаться. Особенностью предложенной схемы является возможность работы потребителя EL1 в широком диапазоне напряжений от 3 до 15 В.

Торможение ветрогенератора в предложенной схеме осуществляется за счет возможности сброса нагрузки в общую (внешнюю) сеть.

Для подключения модулей ветрогенераторов между собой и синхронизацией с внешней сетью (с возможностью отдачи электрической энергии в общую сеть) предлагается использовать сетевой инвертер (выделен красным на рисунке 25)



Рисунок 26 - Сборка ионистра (суперконденсатора) с балансирующей платой

На рисунке 27 представлена принципиальная схема расключения модулей для однофазной сети. На рисунке UZ2 – UZ4 – сетевые инверторы.

Сетевыми инверторами являются устройства, преобразующими постоянное напряжение в переменное напряжение, и передающие его

напрямую в сеть 220В(380В), тем самым снижая потребление электроэнергии от энергосетей. Сетевые инверторы также называют синхронными преобразователями так как они обладают одной особенностью – наличием синхронизации напряжения и тока со стационарной сетью. Таким образом, сетевой инвертор осуществляет преобразование постоянного тока возобновляемых источников энергии в переменный (с надлежащими значениями частоты и фазы для сопряжения со стационарной сетью).

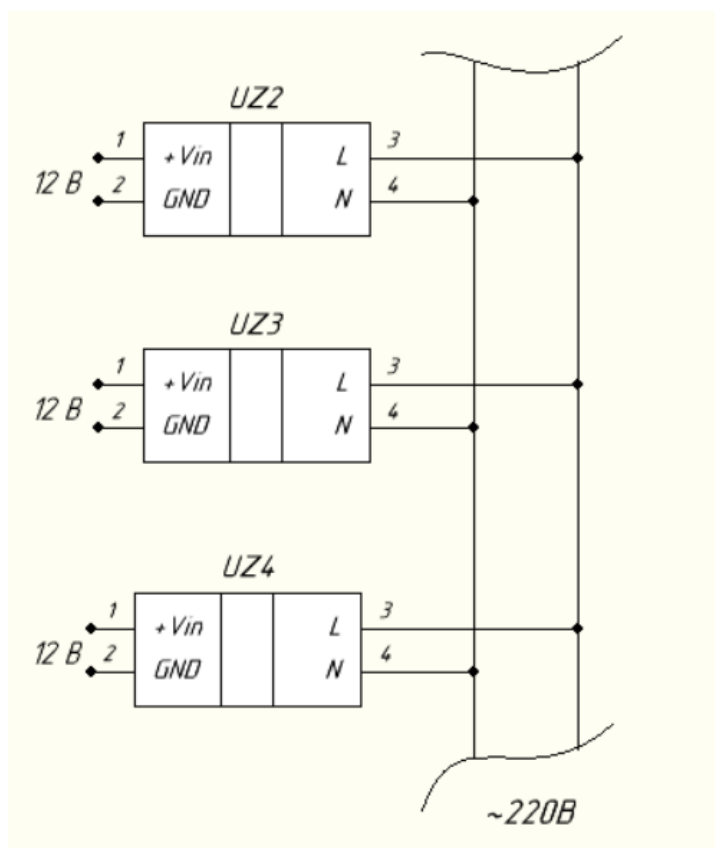


Рисунок 27 - Принципиальная схема подключения для однофазной сети

Особенностью инвертора сетевого типа является невозможность его работы при отсутствии питания внешней сети. Т.е. при отключении внешней сети инвертер выключается, и передача энергии во внешнюю сеть исключается. В этом случае модуль ветрогенератора будет работать как автономный источник, обеспечивая питание местного потребителя (лампочки, светодиоды и т.д.) или заряжать АКБ.

## Основные характеристики сетевых инверторов:

- номинальная выходная мощность – мощность, получаемая от данного инвертора;
- выходное напряжение – показатель, определяющий к какой сети по напряжению может быть подключен инвертор. Для небольших инверторов (бытового назначения) выходное напряжение обычно равно 240В. Инверторы для промышленного назначения рассчитаны на 208, 240, 277, 400 или 480В, кроме того, их можно подключать к 3-х фазной сети;
- максимальная эффективность - наивысшая эффективность преобразования энергии, которую может обеспечить инвертор. Максимальный КПД большинства сетевых инверторов составляет более 94%, у некоторых - до 97%;
- взвешенная эффективность - средняя эффективность инвертора, этот показатель лучше характеризует эффективность работы инвертора. Этот показатель важен, так как инверторы, способные преобразовывать энергию при различных выходных напряжениях переменного тока, имеют разную эффективность при каждом значении напряжения;
- максимальный входной ток - максимальное количество постоянного тока, которое может преобразовывать инвертор. В случае если какой-либо возобновляемый источник (например, солнечная панель) будет производить ток, превышающий это значение, сетевой инвертор его не использует;
- максимальный выходной ток - максимальный непрерывный переменный ток, производимый инвертором. Этот показатель используют для определения минимального (номинального) значения перегрузки по току устройств защиты (к примеру, выключателей или предохранителей);

- диапазон отслеживания напряжения максимальной мощности - диапазон напряжения постоянного тока, в котором будет работать точка максимальной мощности сетевого инвертора;
- минимальное входное напряжение - минимальное напряжение, необходимое для включения инвертора и его работы;
- степень защиты IP (или код исполнения) – характеризует степень защиты корпуса от проникновения внешних твердых предметов (первая цифра), а также воды (вторая цифра).

Принципиальная схема инвертора представлена на рисунке 28.

Синусоидальное напряжение через резистор R3 поступает к узлу синхронизации, выполненному на сдвоенном оптроне U1.

При положительной полуволне ток протекает через светодиод оптрона U1.2 и транзистор этого оптрона открыт, поэтому на тактовом входе (выв.3) DD1.1 низкий уровень напряжения.

При отрицательной полуволне сетевого напряжения открыт транзистор оптрона U1.1 и тактовом входе DD1.1 также низкий уровень. Но в моменты, когда сетевое напряжение переходит через нуль, оба светодиода выключены, транзисторы оптронов закрыты, а тактовом входе DD1.1 на короткие отрезки времени появляются уровень 1. В результате этого уровень 1 появляется на тактовом входе DD1.1 только в момент перехода через нуль сетевого напряжения. Эти импульсы с частотой 100 Гц приходят на делитель на 2, выполненный на D-триггере DD1.1. а также на выв.2 DD3.1 и выв.13 DD3.2. От длительности импульса зависит величина зазора между включением силовых ключей. Это необходимо для того, чтобы силовые ключи не оказались одновременно открытыми, что опасно протеканием через них сквозных токов.

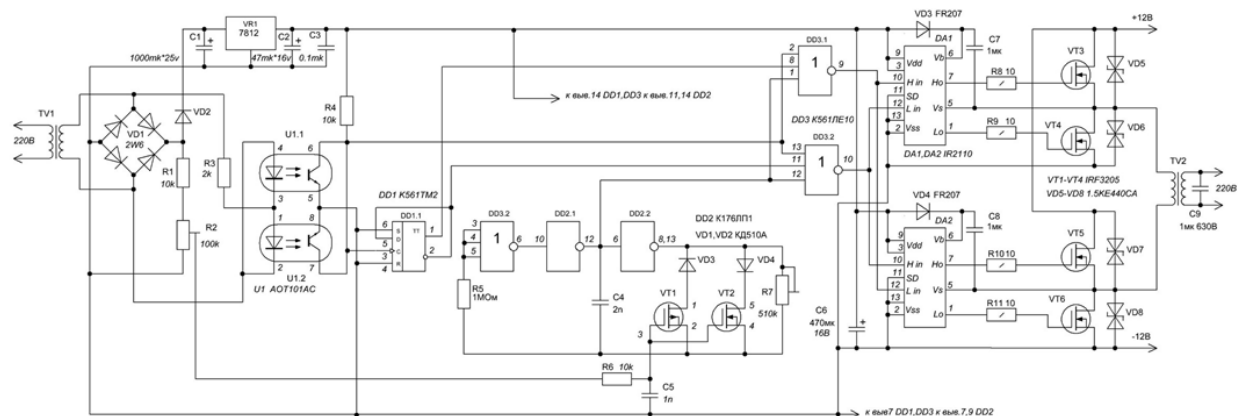


Рисунок 28 - Принципиальная схема инвертора

Выводы по разделу: определены фактические показатели генераторов различных производителей. В результате сравнения выбран генератор RC-600XV, из-за высоких мощностных показателей 140 Вт при частоте вращения  $560 \text{ мин}^{-1}$  и началом работы при сравнительно низкой частоте вращения  $56 \text{ мин}^{-1}$ .

## Заключение

Проведен анализ технических решений, в результате которого:

- выбрана ветроустановка с вертикальной осью, из-за пониженного уровня шума и способности работать при малом ветре;
- выбраны солнечные панели монокристаллического типа, данный вид имеет наименьшую стоимость и относительно высокий КПД.

Проведен выбор оборудования, для реализации автономного электроснабжения потребителей:

- определены мощностные показатели ветрогенераторов, которые должны превышать значение 410,3 Вт;
- определены, что мощностные показатели солнечных панелей, которые должны превышать 150 Вт.

Проведена экспериментальная работа:

- определены фактические показатели генераторов различных производителей;
- в результате сравнения выбран генератор RC-600XV, из-за высоких мощностных показателей 140 Вт при частоте вращения  $560 \text{ мин}^{-1}$  и началом работы при сравнительно низкой частоте вращения  $56 \text{ мин}^{-1}$ .

Выполнен расчет экономической эффективности предложенной энергоустановки и ее сравнение с классическим методом установки КТП и прокладкой ЛЭП. Расчеты показывают:

- суммарная стоимость оборудования разработанной установки ( $K_{\Sigma}$ ) в 2,6 раза меньше, чем у установки КТП и прокладкой ЛЭП;
- минимум приведенных затрат ( $Z$ ) разработанной установки в 4 раза меньше, чем установки КТП и прокладкой ЛЭП.

Таким образом, в работе показана эффективность применения предложенной установки ВИЭ для обеспечения автономности и энергонезависимости дорожно-транспортной инфраструктуры.

## Список используемых источников

1. Аккумулятор Vektor GPL 12-150 (12В 150Ач) [Электронный ресурс] URL: <https://realsolar.ru/akb/vektor-energy/gp/gp-12-150/> (дата обращения: 22.03.2023) – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: – ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с.
3. Виды солнечных панелей [Электронный ресурс] URL: <https://energo.house/sol/vidy-solnechnyh-batarej-rejting-po-kpd.html> (дата обращения: 25.12.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.
5. ГОСТ Р 51990--2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Классификация.
6. ГОСТ Р 51991-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.
7. Дайчман, Р. А. Расчет ветро-солнечной установки малой мощности / Р. А. Дайчман. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 10 (114). — С. 169-173. — [Электронный ресурс] URL: <https://moluch.ru/archive/114/29695> (дата обращения: 25.01.2023) – Режим доступа: для авториз. пользователей.
8. Кирпичникова И.М. Ветроэнергетические установки. Расчет параметров компонентов: учебное пособие / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 83 с.
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛА [Электронный ресурс] URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/odm-21811001->

[2021.pdf](#) (дата обращения: 25.02.2023) – Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Монокристаллические и поликристаллические солнечные батареи: преимущества и недостатки [Электронный ресурс] URL: <http://sunnik.com.ua/monokristallicheskie-i-polikristallicheskie-solnechnye-batareipreimushhestva-i-nedostatki/> (дата обращения: 10.01.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. Особенности производства ветрогенератора с вертикальной осью вращения [Электронный ресурс] URL: <https://220v.guru/vse-ob-elektroenergii/energiya-vetra/osobennosti-proizvodstva-ventrogeneratora-s-vertikalnoy-osyu-vrashcheniya.html> (дата обращения: 08.01.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Принцип работы ветрогенератор с вертикальной осью вращения [Электронный ресурс] URL: <https://genport.ru/article/princip-raboty-ventrogenerator-s-vertikalnoy-osyu-vrashcheniya> (дата обращения: 20.12.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких и др. СПб.: Наука, 2002.314 с.

14. Солнечная панель TopRay Solar 100Вт (12В) поликристалл [Электронный ресурс] URL: <https://reenergo.ru/shop/solnechnaya-panel-topray-solar-100w-12v-polikristall/> (дата обращения: 23.03.2023) – Режим доступа: для авториз. пользователей.

15. Солнечные батареи [Электронный ресурс] URL: <http://shop.solar-company.pro/catalog/36> (дата обращения: 15.01.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

16. Солнечные батареи: описание различных видов и материалов нового поколения [Электронный ресурс] URL: <http://teplo.guru/eko/solnechnyie-batarei-novogo-pokoleniya.html> (дата обращения: 11.01.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.



17. Солнечные панели [Электронный ресурс] URL: <https://oporasolar.ru/g8159851-solnechnye-paneli> (дата обращения: 15.01.2023).  
– Режим доступа: для авториз. пользователей.
18. Суперконденсатор СКФ-320Ф-2,8В [Электронный ресурс] URL: <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensatory-feniks/superkondensatory/superkondensator-skf-320-2v8/> (дата обращения: 28.03.2023) – Режим доступа: для авториз. пользователей.
19. A. Posa, Influence of Tip Speed Ratio on wake features of a Vertical Axis Wind Turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 197 (2020) 104076.
20. C. M. Parker, M. C. Leftwich, The effect of tip speed ratio on a vertical axis wind turbine at high Reynolds numbers, *Experiments in Fluids* 57 (2016) 74.
21. D. Araya, T. Colonius, J. O. Dabiri, Transition to bluff-body dynamics in the wake of vertical-axis wind turbines, *Journal of Fluid Mechanics* 813 (2017) 346-81.
22. G. Brochier, P. Fraunie, C. Beguier, I. Paraschivoiu, Water channel experiments of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades, *Journal of Propulsion* 2 (1986) 445-449.
23. G. Tescione, D. Ragni, C. He, C. J. Sim~ao Ferreira, G. van Bussel, Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry, *Renewable Energy* 70 (2014) 47-61.
24. H. Kadum, R. Bayo\_an Cal, M. Quigley, G. Cortina, M. Calaf, Compounded energy gains in collocated wind plants: Energy balance quantification and wake morphology description, *Renewable Energy* 150 (2020) 868-877.
25. J. Liu, H. Lin, J. Zhang, Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines, *Ocean Engineering* 182 (2019) 608-626.
26. M. Bastankhah, F. Port\_e-Agel, A new analytical model for wind-turbine wakes, *Renewable Energy* 70 (2014) 116-123.

27. P. Bachant, M. Wosnik, Effects of Reynolds Number on the Energy Conversion and Near-Wake Dynamics of a High Solidity Vertical-Axis Cross-Flow Turbine, *Energies* 9 (2016) 73.
28. P. Ouro, S. Runge, Q. Luo, T. Stoesser, Three-dimensionality of the wake recovery behind a vertical axis turbine, *Renewable Energy* 133 (2019) 1066-1077.
29. P. Ouro, T. Stoesser, An immersed boundary-based large-eddy simulation approach to predict the performance of vertical axis tidal turbines, *Computers & Fluids* 152 (2017) 74-87.
30. P. Ouro, T. Stoesser, L. Ramirez, Effect of Blade Cambering on Dynamic Stall in View of Designing Vertical Axis Turbines, *ASME Journal of Fluids Engineering* 140 (2018) 061104.
31. P. Veers, K. Dykes, E. Lantz, S. Barth, C. L. Bottasso, O. Carlson, A. Clifton, J. Green, P. Green, H. Holttinen, D. Laird, V. Lehtomki, J. K. Lundquist, J. Manwell, M. Marquis, C. Meneveau, P. Moriarty, X. Munduate, M. Muskulus, J. Naughton, L. Pao, J. Paquette, J. Peinke, A. Robertson, J. S. Rodrigo, A. M. Sempreviva, J. C. Smith, A. Tuohy, R. Wisser, Grand challenges in the science of wind energy, *Science* 366 (2019) 4443.
32. S. Shamsoddin, F. Porté-Agel, Effect of aspect ratio on vertical-axis wind turbine wakes, *Journal of Fluid Mechanics* 889 (2020) R1.
33. V. Rolin, F. Porté-Agel, Experimental investigation of vertical-axis wind-turbine wakes in boundary layer flow, *Renewable Energy* 118 (2018) 1-13.