

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева
Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева

Кафедра Энергетика

Еркінов Ғани Еркінұлы

Разработка ВЭУ для энергообеспечения жилого дома

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 6М071800 – «Электроэнергетика»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева
Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева

УДК 631.311(574)

На правах рукописи

Еркінов Ғани Еркінұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации Разработка ВЭУ для энергообеспечения жилого
дома
Направление подготовки 6М071800 – Электроэнергетика

Научный руководитель
доктор техн. наук, профессор

 Бекбаев А.Б.

"10" августа 2020 г.

Рецензент
к.т.н, ассоц. профессор

 Иванов А.А.

"11" августа 2020 г.

Нормоконтроль

 Бердибеков А.О.

"7" августа 2020 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «Энергетика»,
PhD, ассистент- профессор

 Е.А. Сарсенбаев

"12" августа 2020 г.

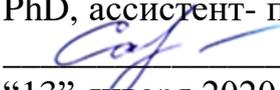
Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева
Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева
Кафедра Энергетики

6M071800 – Электроэнергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой Энергетика
PhD, ассистент- профессор


Е.А. Сарсенбаев
“13” января 2020 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Еркинов Фани Еркинулы

Тема: Разработка ВЭУ для энергообеспечения жилого дома

Утверждена приказом Ректора Университета №1208 - м от 30.10.2018 г.

Срок сдачи законченной диссертации “20” июня 2020 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Карта ветровых ресурсов страны предоставляемые исследовательской организацией Global Wind Atlas. Использование известного программного обеспечения Matlab для создания математической модели ветровой установки

Перечень подлежащих к разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) исследовать текущее состояние ветроэнергетики Казахстана
- б) провести анализ экономического потенциала ветра выбранной области, определить ее качественные показатели
- в) на основании полученных данных выбрать ветрогенератор для рассчитываемой производственной энергосистемы. Разработать модель ветроэлектростанции в графической программе Matlab с имитацией показания ветра

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рекомендуемая основная литература:

1. Стратегия «Казахстан-2050»: новый курс состоявшегося государства, Послание президента Р.К. – лидера нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана, г. Астана, 14.02.2012.
2. Сценарий развития направления «Безопасная, чистая и эффективная энергетика» в Казахстане до 2030 года. [http:// www.ncste.kz/sites/default/files/](http://www.ncste.kz/sites/default/files/).
3. Национальная Программа развития ветроэнергетики в Республике Казахстан до 2015г с перспективой до 2024г - Проект ПРООН «Казахстан-инициатива развития рынка-ветроэнергии», Алматы- Астана 2007г

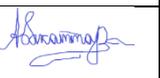
ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Исследовать текущее состояние ветроэнергетики Казахстана	23.10.2018 г. – 23.02.2019 г.	нет
Проведение анализа экономического потенциала ветра выбранной области, определить ее качественные показатели	26.02.2019 г. – 27.12.2019 г.	нет
На основании полученных данных рассчитать и выбрать ветроэлектроустановку и разработать математическую модель	14.01.2020 г. – 15.06.2020 г.	нет

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты	Дата подписания	Подпись
Исследовать текущее состояние ветроэнергетики Казахстана	д.т.н, профессор Бекбаев А.Б.	10.08.2020	
Проведение анализа экономического потенциала ветра выбранной области, определить ее качественные показатели	д.т.н, профессор Бекбаев А.Б.	10.08.2020	
На основании полученных данных рассчитать и выбрать ветроэлектроустановку и разработать математическую модель	д.т.н, профессор Бекбаев А.Б.	10.08.2020	
Нормоконтролер	Бердибеков А.О. лектор	7.08.2020	

Научный руководитель

 Бекбаев А.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся



Еркинов F.E.

Дата

"13"января 2020 г

АҢДАТПА

Бұл жұмыс жел электр қондырғыларын тұрғын үй ғимараттарында және электрмен жабдықтау жүйесінің энергетикалық тиімділігі үшін өнеркәсіптік масштабта сапалы және нақты көрсеткіштерді анықтауға және негізгі электрмен жабдықтау жүйесінен болатын қауіп-қатерлерді азайтуға бағытталған. Өз кезегінде шалғайдағы тұтынушыларды электрмен жабдықтау үшін жел электр қондырғыларын қолдануды қамтитын өңдеуші өнеркәсіптерде энергия ресурстарын тиімді пайдаланудың перспективалық шешімдерінің бірі талданады. Сондықтан, елдегі жел энергиясының әлеуеті бағаланды, қарастырылатын жеке өндіріс орынындағы қондырғылардың энергия қажеттіліктеріне талдау жасалды, жел электр қондырғысының техникалық параметрлері есептелді және осы мәліметтерге сәйкес белгілі бір модельді таңдау жүзеге асырылды.

Matlab графикалық бағдарламасында таңдалып алынған жел электр қондырғысының сипаттамасын қанағаттандыратындай шарттарды таңдап және желдің соғу ырғақтылығы қондырғыдағы механикалық бөліктерге тигізетін әсерін бағалай отырып математикалық моделі жасалынды.

АННОТАЦИЯ

Данная работа нацелена на выявление качественных и точных показателей от применения ветроэнергетических установок как в жилых домах, так и в производственном масштабе для энергоэффективности питающей системы и снижению риска потенциальных угроз от основной системы электропитания. Проанализирован один из перспективных решений по эффективному использованию энергоресурсов для производственной промышленности, которая в свою очередь включает в себя использование ветроэлектростанций для электроснабжения отдаленных потребителей. Следовательно, был оценен потенциал энергии ветра в стране, выполнен анализ энергетических потребностей отдельного производственного подразделения фабрики, были рассчитаны технические параметры ветровой установки и выбор сопутствующей этим данным конкретной модели.

Была разработана математическая модель ветроэнергетической установки в графической программе Matlab, учитывающая параметры выбранного типа ветрогенератора, а также движение механической части установки при имитации действия ветра.

ANNOTATION

This work is aimed at identifying quality and accurate indicators from the use of wind turbines both in residential buildings and on an industrial scale for the energy efficiency of the supply system and reducing the risk of potential threats from the main power supply system. One of the promising solutions for the efficient use of energy resources for the manufacturing industry, which in turn includes the use of wind turbines for power supply to remote consumers, is analyzed. Therefore, the potential of wind energy in the country was assessed, an analysis of the energy needs of a separate production unit of the factory was carried out, the technical parameters of the wind turbine were calculated and the choice of a specific model accompanying this data.

A mathematical model of the wind power plant was developed in the Matlab graphic program, taking into account the parameters of the selected type of wind generator, as well as the movement of the mechanical part of the installation when simulating the effect of wind.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Современное состояние ветроэнергетики в Казахстане и задачи исследования	11
1.1 Перспективы продвижения и развития ветроэнергетики в Республике Казахстан	11
2 Анализ конструкции ветрогенераторов	15
2.1 Конструктивные особенности ветрогенераторов и область применения	15
2.1.1 Общая информация	15
2.1.2 Ветрогенераторы с горизонтальным вращением оси	17
2.1.3 Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения	20
2.2 Выводы ко второму разделу	23
3 Альтернативный вариант электропитания	25
3.1 Выбор производственного объекта	25
3.2 Расчет энергопотребления выбранного объекта	25
3.3 Выводы к третьему разделу	27
4 Выбор и расчет параметров ветроэнергетической установки	28
4.1 Оценка ветроэнергетического потенциала	28
4.2 Выбор ветрового генератора	30
4.3 Вспомогательное оборудование ветроэнергетической установки	33
4.4 Установка и монтаж ветряных установок	34
4.5 Вычисление технических характеристик ветроэнергетического оборудования	36
4.5.1 Площадь для установки ветровой станции	36
4.6 Аэродинамические параметры ВЭУ	38
4.6.1 Аэродинамическая мощность	38
4.6.2 Методика расчета ветроколеса с горизонтальной осью вращения	40
4.7 Анализ результатов расчета характеристик ВЭУ	41
4.8 Выбор электрогенератора	42
4.8.1 Расчет синхронного генератора с постоянными магнитами	46
4.8.2 Расчет параметров ротора для синхронного генератора	48
4.9 Работа редукторов в ветроустановках	50
4.10 Заключение к четвертому разделу	51
5 Технико-экономическая оценка показателей ВЭУ	53
5.1 Математическое моделирование ветроэлектроустановки	53
Заключение	57
Перечень принятых сокращений, терминов	58
Список использованной литературы	59
Приложение	62

ВВЕДЕНИЕ

Проблема энергосбережения в данный момент стоит на первом месте во всем мире, так как индустрия и технологии постоянно в прогрессе, а это влечет к существенному росту расходов электроэнергии, росту затрат предприятия и увеличению стоимости продукции, изготавливаемой предприятием. В условиях увеличивающейся конкуренции предприятия обязаны искать пути снижения потребления электричеством и увеличивать энергоэффективность индивидуальных производств.

О важности вопросов сбережения энергии на государственном компетентности свидетельствует база законов. В стратегии продвижения «Казахстан-2050» нашей республики рассматривается необходимость движения к «зеленой экономике» и к новой индустриальной революции.

Новая индустриальная революция по значимости на третьем периоде по развитию - это стратегическое развитие общества, относящийся к повсеместным использованием возобновляемых и альтернативных источников энергии (ВИЭ). В условиях современной важности существует необходимость в разработке новых видов инженерных систем преобразования потока ветра и повышении рентабельности уже существующих структур [1].

Большинству индивидуальных потребителей энергии нужны мощности небольшого количества (от сотен ватт до десятков киловатт), притом для многих из них цена энергоустановки не является важным и главным фактором; наиболее важными принимаются во внимание показатели надежности, долгосрочности ресурса, низких текущих затрат на эксплуатацию. Данным требованиям отвечают автономные установки, которые работают с применением возобновляемых источников энергии, к примеру можно отнести ветроэнергетические установки.

Данная работа нацелена на выявление качественных и точных показателей от применения ветроэнергетических установок как в жилых домах, так и в производственном масштабе для энергоэффективности питающей системы и снижению риска потенциальных угроз от основной системы электропитания.

Таким образом, рассматривая данную тему про электроснабжения жилых домов с использование ветроэлектроустановки, можно сказать, что она теряет свою актуальность и смысл в изучении, но тем самым дает новую цель как применение и изучение данной темы в промышленности, а именно в рассмотрении данной технологии непосредственно в горной промышленности Республики Казахстан.

В данной диссертационной работе будет проанализировано эффективное использование энергетических ресурсов для горной промышленности АО "АрселорМиттал Темиртау" Республики Казахстан, как один из перспективных решений электроснабжения, которая в свою очередь будет

иметь в составе ветроэлектро установки для питания электричеством отдельных подразделений фабрики, цехов. [2, с.151].

Для выявления наилучшего состава ветроэнергетических установок требуется выполнение уточняющих расчетов [3, с.12]. В этой работе планируется:

- провести оценку энергетических нужд отдельного производственного подразделения фабрики;
- проанализировать экономический потенциал ветра на местности предприятия;
- выполнить выбор ветрогенератора соответствующего параметра.

Полагается, что при помощи внедрения ветроэлектро установки в данное промышленное производство энергопотребление идущие на потребность отдельных цехов из основной энергосистемы сократиться в разы. Это в целом даст нам оптимальную экономию средств на электроэнергию.

Выбирая параметры ветрогенератора надо учитывать общую электрическую нагрузку потребляемого цехом. Выходит, нужно будет определить, наиболее приемлемый цех, который можно снабжать электрической энергией выработанная ветроэлектростанцией. При выборе ветрогенератора с оптимальными параметрами, надо учитывать особенности технологического процесса.

Следовательно, задача исследования заключается в вычислении оптимальных технических параметров ветряной электростанции, предназначенной в роли альтернативного источника питания в одном из цехов обогатительной фабрики горной промышленности.

Целью исследования служит снижение потребления электроэнергии из основной энергетической системы одного из цехов АО "АрселорМиттал Темиртау" за счет ввода в эксплуатацию ветряной электростанции.

Предметом исследования является ветроэнергетическая установка применяемая в качестве альтернативного источника электроснабжения в одном из цехов дробления и обогащения руд горной промышленности.

Практическая значимость выполненной работы заключается в возможности применения разработанной модели ветроэнергетической установки как альтернативный источник снабжения электричеством.

Новизной работы является создание математического образа ветроэнерго установки содержащий в себе синхронный генератор виртуального типа в програмном приложении Matlab библиотеки SimPowerSystems, являющийся частью блоков Simulink, который будет учитывать характеристику выбранной ветровой установки Weswen7-5000W, а также имитировать процессы механической части ветрогенератора и движения потока ветра. Данную модель ветроэлектро установки можно использовать как автономный, аварийный и резервный источник питания для отдельных и отдаленных от энергосистем потребителей горной промышленности.

1 Современное состояние ветроэнергетики в Казахстане и задачи исследования

1.1 Перспективы продвижения и развития ветроэнергетики в Республике Казахстан

Перспективы применения ветроэнергетики определяются наличием надлежащих ветроэнергетических ресурсов. Казахстан имеет очень богатую область ветровых ресурсов. Свыше 50% территория страны имеет 4-5 м/с среднюю скорость ветра в год, а ряд областей имеет 6м/с поточности ветра и более, что предполагает очень хорошие перспективы для применения ветроэнергетики. Наша страна по оцениванию экспертов, является одним из наиболее подходящих по критериям для развития энергии получаемого от ветра среди многих других стран мира. В стране места с большей ветреностью расположены в центре и на юге, а также близ Каспийского моря, на севере, юго-востоке государства. Учитывая густоту мощности ветроэлектростанции на уровне 10 МВт на каждый квадратный километр и наличие больших свободных пространств допустимо предполагать возможность постройки ветроэлектростанции нескольких тысяч МВт мощности в Республике[2]. По теоретическим данным потенциал ветра в Казахстане за каждый год составляет 1820 млрд. кВт.ч. Для достоверной оценки перспективных областей потенциала потока ветра необходимы изученные метео данные минимум за один год с применением метеомачт высота которых составляет 30-80м. Полученные данные от метео станции применимы для годовых расчетов вырабатываемой ветроустановками энергии. Полученные результаты используются как подтверждение для подготовки к техническому и экономическому строительству ВЭС. Для районов в юго-восточной области страны - Джунгарские врата и Шелекский проход, детальные изучения метео данных ветра и соответствующая оценка резерва ветра были произведены с помощью стороны ПРООН в 1998-2000 годах. В конечном итоге проанализированные данные дали нам понять, что в Джунгарских воротах самый большой потенциал потока ветра. На данном участке, на высоте 50 метров средняя поточность ветра имеет 9,7 м/с в год, тем самым выдает плотность потока 1050 Вт на квадратный метр. Это дает достижимость вырабатывать около 4400 кВт.ч электрической энергии установленной мощности ветростанции, и делает данную область исключительным для всего развития ветроэнергетики в стране. Присутствие много свободных мест дает выполнимость постройки здесь несколько мощных ВЭС с выработкой около 1 млрд. кВт.ч. электрической энергии в год [4].

На данный момент в этом месте предусматривается ввести в эксплуатацию ветровую электростанцию мощностью 5 МВт. Если данная ВЭС выполнит свою цель и внесет по плану 18 млн. кВт.ч энергии от ветра в

год, то в этом случае данный опыт будет проведен успешно и мощность данной станции могут поднять до 50 Мвт [2].

По сравнению с Джунгарскими воротами Шелекский проход, который расположен между двух горных хребтов на такой же высоте выдает среднюю скорость ветра 7,8 м/с и около 510 Вт на квадратный метр плотности ветреного потока в год. Эти данные также можно отнести к хорошим показателям ветро ресурса, что даст нам вырабатывать 3200 кВт.ч электрической энергии на станции установленной мощности.

Наличие таких регионов в стране сравнимо ветровыми районами Европы. Как уже отмечалось, Джунгарские ворота с применением ВЭС имеют потенциал выработки электрической энергии около 1 млрд. кВт.ч в год. По данным специалистов Шелекский коридор также может вырабатывать энергию от ветра в равном количестве. Эти два района, по своему расположению находятся в местах где имеется большой дефицит электрической энергии, что дает значимую привлекательность на постройку ВЭС именно в данных регионах [3]. По данным полученным от Global wind atlas ветровой атлас Казахстана представлен на рисунке 1.

Международные немецкие специалисты совокупно с казахстанскими учеными изучая ветровую структуру страны и проанализировав метео данные дали определенные перспективные места для постройки ВЭС беря во внимание следующие факторы:

1. линии электропередачи и подстанции, необходимые для распределения электрической энергии, и их наличие;
2. Рельеф и высота над уровнем моря;
3. доступность транспортных коммуникаций;
4. доступность энергии потребителям;
5. возможность строительства ветряной электростанции;
6. наличие предварительных работ по строительству электрических станций.

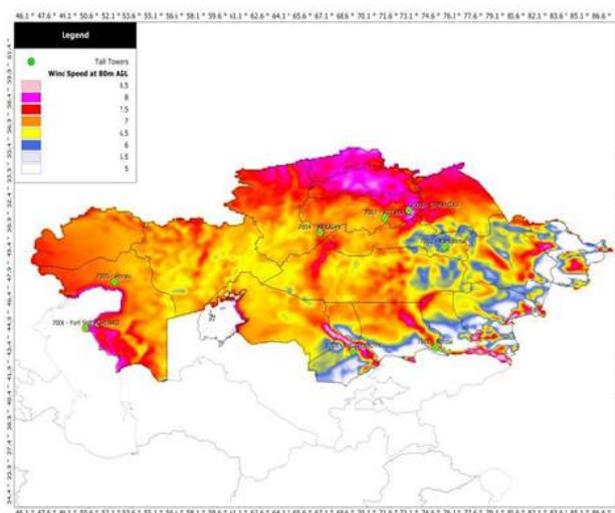


Рисунок 1- Атлас ветрового потенциала Казахстана

Для демонстрации строительства ветропарков были выбраны восемь локаций для изучения ветрового потенциала в различных регионах Казахстана. Ожидается, что такие исследования будут продолжаться и в будущем. По результатам этих исследований была разработана ветроэнергетическая карта Казахстана изображенная на рисунке 2, содержащая необходимую информацию для разработчиков ветроэнергетических проектов. Ветровой Атлас является самым важным инструментом и способствует развитию ветроэнергетики в Казахстане. Сегодня энергия ветра является одним из самых чистых и перспективных возобновляемых источников энергии. Она предоставляет привлекательные возможности для многих людей, включая инвесторов и предпринимателей. Основная цель ветроэнергетики - снизить потери электроэнергии для ветроэлектростанций и сделать их конкурентоспособными по сравнению с традиционными источниками энергии [5].

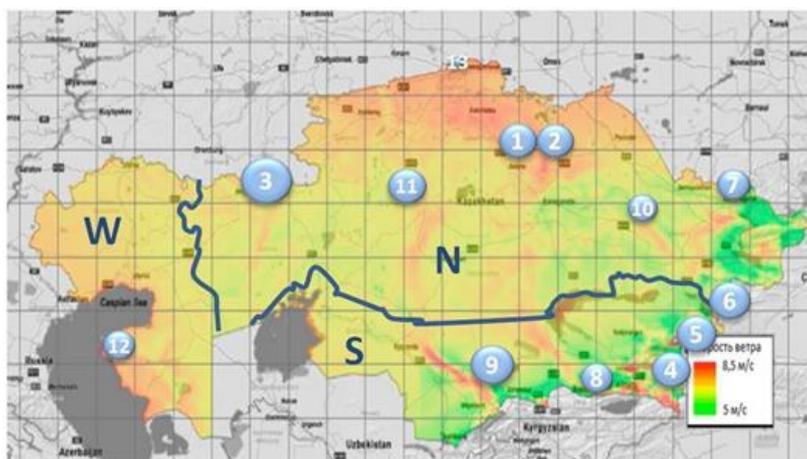


Рисунок 2 – Перспективные площадки строительства ВЭС

Территория Республики Казахстан характеризуется относительно богатым потенциалом ветроэнергетики. Он потребляет в сотни раз больше энергии, чем сейчас. По расчетам, энергия в 1м части воздушного потока на высоте 10 метров от Земли составляет 4000 кВт*ч/м, а самое главное - ветроэнергетические ресурсы Джунгарских ворот (17000 кВт*ч/м). Среди других перспективных направлений - Ерементау-3700квт/м² (Акмолинская область), Форт-Шевченко-4300 кВт/м² (Каспийская область) и Кордай - 4000 квт/м (Жамбылская область).

В настоящее время в качестве возможных ветроэлектростанций определены около 13 объектов указанные в таблице 1, некоторые из которых находятся на продвинутой стадии разработки. [3]. Продолжительность отдельного урагана составляет 60-110 часов, а в некоторых случаях и 270-320 часов, что часто встречается в холодное время года. На площадке могут разместиться ветрогенераторы мощностью около 11 000 ветротурбинных

колес диаметром 100-250 метров и мощностью 25 кВт. Мощность этого устройства составляет около 600 миллионов кВт*ч.

Анализ распределения энергии в течение года показывает, что в зимний период спрос на энергию в народном хозяйстве увеличивается, а значительная часть энергии потребляемой от сети будет снижаться [6].

Таблица 1 - Перспективные площадки строительства ВЭС

Наименование	Регион	Мощность, МВт	Год	Стоимость, млн. тенге
ВП близко от Ерейментау, Ерейментау	Акмола	45	2014	17 709
ВП близко от Ерейментау, Ерейментау	Акмола	30-50	2017	30 000
ВП в Бадамша, Каргалы	Актобе	300	2015-2020	82 320
ВП в коридоре Шелек	Алматы	51	2015	12 881
ВП в Шелек	Алматы	60	2017	27 000
ВП в Джунгарских воротах	Алматы	72	2018	15 000
ВП в горном проходе Улан	Восточный Казахстан	24	2014	8 084
ВП Кордай	Жамбыл	21	2016	5 451
ВП Жанатаской Сарысу	Жамбыл	100	2016	28 500
ВП в Караганде	Караганда	15	2016	10 000
ВП рядом с городом Аркалык	Костанай	48	2016	15 800
ВП в Форте Шевченко	Мангистау	19,5	2015	5 423
ВП Новоникольское Кызылжарский	Северный Казахстан	1,5	2013	185

2 Анализ конструкции ветрогенератора

2.1 Конструктивные особенности и применение ветрогенераторов

2.1.1 Общая информация

Ветрогенератор - это устройство, которое производит электрическую энергию от механического вращения лопастей ветроустановки под воздействием ветра, а затем распределяет на потребительское пользование. [1, с. 12]. На данный момент известны два основных типа ветрогенераторов, конструктивные отличия, которых состоят в расположения оси вращения элемента, улавливающего энергию ветра. Как показано на рисунке 3 ветряные генераторы бывают:

- вращение оси в горизонтальной плоскости;
- вращение оси в вертикальной плоскости.

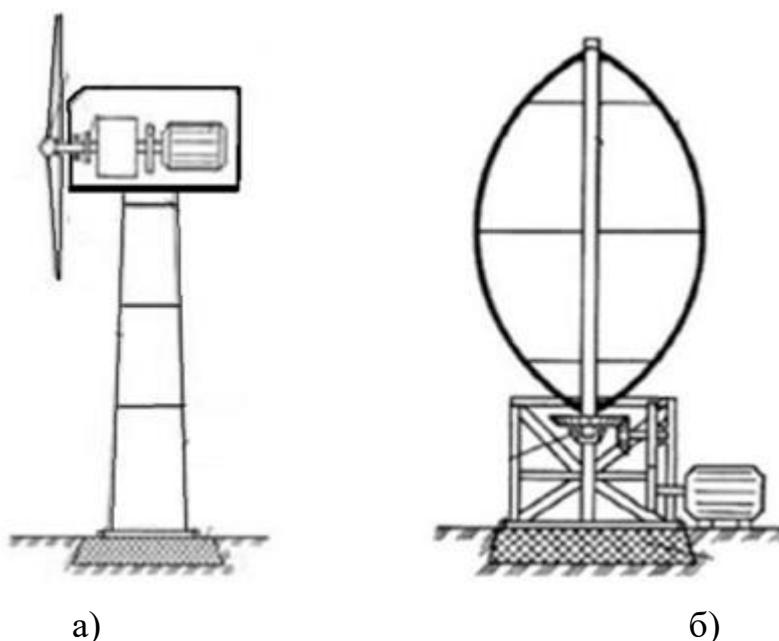


Рисунок 3 – Ветроустановка с горизонтальной (а) и с вертикальной осью (б) вращения

Принцип работы ветрогенератора – очень простой. Поток ветра оказывает давление на лопасти (позиция 12 на рис.4) ветрового колеса. Ротор (позиция 1 на рис.4) ветрового колеса закреплен на низкоскоростном валу (позиция 2 на рис.4). Под воздействием ветра ветряное колесо (ротор с лопастями и низкоскоростной вал) начинает вращаться, осуществляя преобразование ветряной энергии в механическую. От низкоскоростного вала через редуктор (позиция 3 на рис.4) механическое движение передается на вал (позиция 8 на рис.4) электрического генератора (позиция 4 на рис.4). При вращении ротора электрогенератора осуществляется преобразование

механической энергии в электрическую. На рисунке 4 показана конструктивная схема электроустановки, дающая полное представление об ее устройстве.

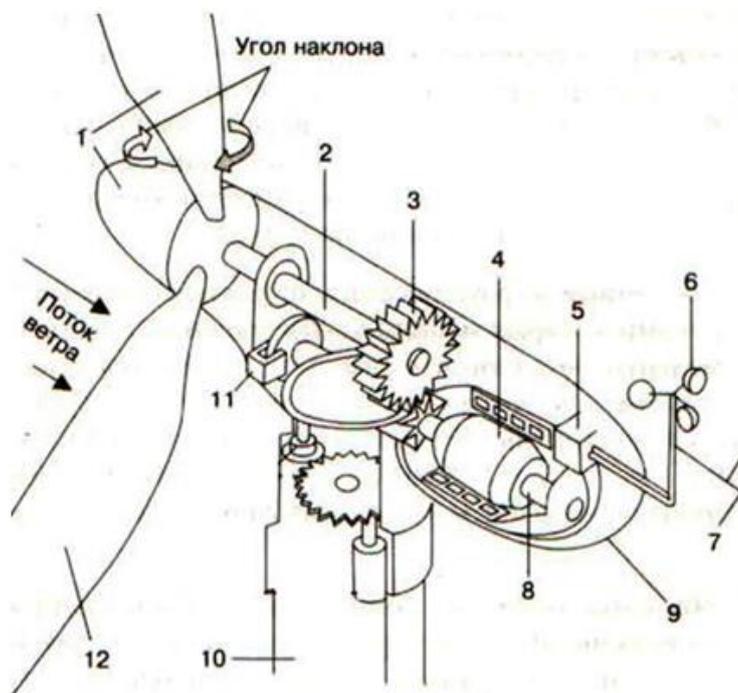


Рисунок 4 – Конструктивная схема ветроустановки

На схеме используются следующие позиционные обозначения:

1. Ротор ветроколеса, участвующий в процессе преобразования давления ветра в механическую энергию.
2. Низкоскоростной вал, приводимый в движение ротором ветроколеса и задействованный в передаче механической энергии.
3. Редуктор, повышающий частоту вращения ветроколеса (ротора).
4. Генератор, вырабатывающий электроэнергию и имеющий в своем составе высокоскоростной вал.
5. Контроллер, отвечающий за управление всей установкой. С его помощью в автоматическом режиме запускаются ветряные турбины или осуществляется их остановка.
6. Анемометр, предназначенный для определения скорости ветра с последующей передачей данных к контроллеру.
7. Флюгер, определяющий направления ветра и поворачивающий ветроколесо в нужном направлении.
8. Высокоскоростной вал, вращающий ротор электрогенератора.
9. Гондола, располагающаяся в верхней части ветряной турбины и являющаяся несущей частью конструкции. Внутри нее находятся валы, редуктор, генератор, контроллер и тормоз.
10. Мачта, представляющая собой полую конструкцию из металла или бетона, служащая для размещения всех основных элементов на высоте.

11. Тормоз, предотвращающий поломки установки и используемый для останова ротора в критических ситуациях (например, в ураган).

12. Лопасти, являющиеся ключевым элементом ветроустановки, предназначенным для улавливания энергии ветра. Посредством лопастей осуществляется функционирование данного устройства. Поток ветра, попадая на лопасти, приводит их в движение, и обеспечивает вращение ротора и в дальнейшем выработку энергии генератором.

Несмотря на имеющиеся сходство, имеются существенные различия в характеристиках ветрогенераторов с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Проанализируем технические возможности ветрогенераторов обоих конструктивных типов [8].

2.1.2 Ветрогенератор с горизонтальным вращающимся валом

Наиболее распространенными на данном этапе являются горизонтальные ветрогенераторы. Они имеют ось вращения колес ветряной мельницы, в которой лопасти вращаются относительно ветров, расположенных параллельно земле. Этот вариант называется "ветряная мельница". Горизонтальная ветротурбина предназначена для автоматического поворота передней части ветролифта при поиске ветра. Кроме того, он может изменить угол поворота, чтобы поглотить энергию даже от небольшого ветра. Этот тип ветрогенератора считается пригодным для производства больших объемов электроэнергии 6-8 кВт [9]. Установленный горизонтальный ветер характеризуется высокой эффективностью (40-50%). Этот метод часто используется на практике в ветроэнергетических системах.

В ветрогенераторе с поперечной осью вращения ветрогенератор может быть выполнен с различными лопастями. В соответствии с этим существуют одно-, двух-, трех- и многоступенчатые изменения лопастей установки.

Горизонтальная ось вращения двигателя обязательно включает в себя дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие ориентацию по ветру, что затрудняет конструкцию роторного колеса, делая его более надежным.

Преимуществом ветротурбины является горизонтальная ось вращения по сравнению с высокой эффективностью, при которой ось вращения является вертикальной. Это связано с малым углом атаки в рабочем режиме. Таким образом, индекс вращения горизонтальной оси ветрогенератора выше и позволяет выводить вертикальный ветрогенератор в зависимости от меньшего веса и объема [10].

Рассмотрим конструктивные исполнения горизонтальных ВЭУ:

а) Однолопастные ветрогенераторы

Главное достоинство однолопастных ветрогенераторов – высокие обороты вращения. У них вместо второй лопасти установлен противовес,

мало влияющий на сопротивляемость движению воздуха, что даёт возможность использовать их для генераторов с высокими оборотами вращения, в том числе асинхронными. Однолопастные ветрогенераторы могут работать при очень слабых ветрах.

Недостатки однолопастного ветряка:

- Из-за высокой скорости вращения велик гироскопический эффект, что замедляет поворот ротора при смене ветра и создает дополнительную нагрузку на лопасти, ступицу и узел поворота;

- Повышенная опасность при функционировании установки, объясняемая тем, что сила удара быстроходной лопастью выше, чем тихоходной.

- Необходимость точной балансировки лопасти.

б) Двухлопастные ветрогенераторы

Ветрогенераторы двухлопастного типа – по устройству схожи с однолопастными, только отличаются количеством лопастей. По сравнению с однолопастной конструкцией они имеют преимущество. Поскольку здесь количество лопастей – четное, то ротор ветроколеса остается уравновешенным при любом угловом положении его лопастей. Поэтому здесь нет дополнительных конструктивных элементов, обеспечивающих уравновешенность конструкции. Упрощение конструкции ведет к снижению стоимости данной модификации по сравнению с аналогичной моделью однолопастной ВЭУ.

Недостатком рассматриваемой конструкции является то, что она более шумная и подвержена вибрации [11,с.15].

Примером самоподъемной двухлопастной ветроустановки является Gev MP, номинальной мощностью 275 кВт, французской фирмы Vergnet S.A показанная на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид двухлопастного ветрогенератора

в) Трехлопастные ветрогенераторы

Это – самая распространенная модификация ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения вала ветроколеса.

Исследования, проведенные датскими учеными еще в 70-х годах прошлого века, показали, что оптимальное количество лопастей горизонтальных ветрогенераторов равно трем. Это заключение было хорошо усвоено крупными производителями ветрогенераторов [12]. Поэтому именно эти ветряки наиболее широко представлены на рынке. Ветрогенераторы с тремя лопастями выпускаются с мощностями от нескольких ватт до нескольких мегаватт [6]. В качестве примера на рисунке 6 представлена одна из самых мощных на сегодняшний день трехлопастных ветроэнергетических установок марки Enercon E-126 ($P=7$ мВт).



Рисунок 6 – Внешний вид трехлопастного ветрогенератора

г) Многолопастные ветрогенераторы

К многолопастным относятся горизонтальные ветрогенераторы с количеством лопастей, находящимся в интервале от 4 до 50. Роторы ветроколес с большим количеством лопастей способны развить значительный крутящий момент, что, несомненно, является их достоинством. Однако такие ветроколеса отличаются большим моментом инерции, поэтому они – тихоходные.

Отмеченные здесь конструктивные особенности и технические характеристики многолопастных ветрогенераторов соответствуют требованиям энергопитания водяных насосов. Поэтому их обычно применяют в качестве альтернативных источников электрической энергии в водонасосных системах [7]. Внешний вид многолопастного ВЭУ показано на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид многолопастной ВЭУ

2.1.3 Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения

Эффективность вертикальных ветрогенераторов ниже, чем у горизонтальных ветрогенераторов. Их КПД не меньше в 3-кратной величине по сравнению с горизонтальными [14, с.18]. Лопасти вертикальных ветрогенераторов вращаются перпендикулярно земной поверхности в любом направлении и силе ветра. Таким образом, из-за общего числа лопастей колеса ветряной мельницы всегда вращается меньше на половину от усилий относительно ветра. В связи с этим ветротурбина с вертикальным вращением ветротурбины не использует 1/2 от общей мощности, что значительно снижает энергоэффективность. Это и есть главный недостаток. Кроме того, существуют следующие виды недостатков:

- У ВЭУ нет возможности контролировать процесс преобразования;
- Большая нагрузка на конструктивные элементы;
- Лопасти должны быть одинаковыми и соответствовать выбранному профилю;
- Увеличенный уровень шума во время эксплуатации.

Однако ветротурбина имеет определенные преимущества при вертикальном вращении ветротурбины. Например, эти модели облегчают установку и использование. В конструкциях, которые имеют эти вертикальные ветряные мельницы, трансмиссии и генераторы расположены на земле. Преимущество конструкции - они не требуют ветрозащитных лопастей. Они характеризуются независимым направлением относительно воздушного потока.

В зависимости от различных модификаций ветрогенератора большое значение имеет конструкция вертикального ветрогенератора. Рассмотрим наиболее распространенные варианты.

а) Ротор Савониуса

Это конструкция, выполненная в виде цилиндрической поверхности лопастей ротора в виде рисунка 8 [17].

Преимущества данного ротора:

- Низкое значение ветра, которое может начать движение от значения 3 м/сек;

- Установление пальцевого индикатора с быстрым высоким крутящим моментом;

- Высокая надежность конструкции;

- Относительно низкие производственные затраты.

Ветряные мельницы с роторами "Savonius" имеют недостатки, как и все вертикальные ветряные турбины. Это не позволяет в полной мере использовать энергию ветра, что приводит к низкой эффективности преобразования воздушного потока. Таким образом, промышленное производство этих устройств составляет не более 4-6 кВт.

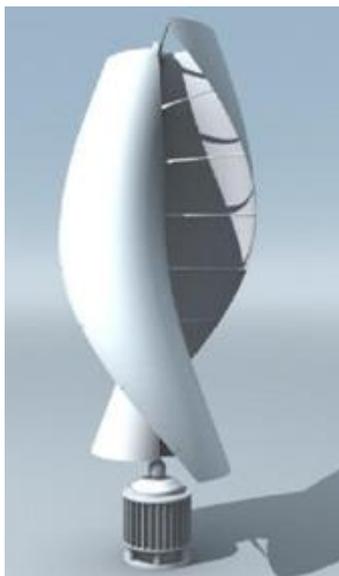


Рисунок 8 – Внешний вид ротора Савониуса

б) Ротор Дарье

Вертикальная ветряная мельница с Ротором Дарье была изобретена на несколько десятилетий раньше, чем обычные. Снаружи такой ветрогенератор выполнен из двух-трех изогнутых лопастей овального типа изображенного на рисунке 9.



Рисунок 9 – внешний вид ротора Дарье

Ветрогенераторы с ротором Дарье просты в исполнении и имеют малый вес, что удобно при монтаже. Ценность данного устройства заключается в особенности его изменчивости и чувствительности на ветер. Вал данного агрегата располагается на нижней стороне вблизи поверхности, что дает комфортность в обслуживании. Ротор Дарье имеет отличительную конструкцию по кинематической схеме.

Недостаток данной ветрогенераторной установки заключается в механическом запуске, то есть в ручном режиме. Также от воздействия излишних потоков воздуха создается высокая нагрузка на узлы элементов. Для нормированной работоспособности устройства необходимо строго контролировать профиль лопасти по всей ее протяженности. Еще одним недостатком данного ветряка является излишний шум при работе.

в) Геликоидный ротор.

Данный ротор является предшественником вертикально-осевых устройств. Лопасти данных агрегатов выполнены по типу геликоидной косой, что дает механизму более ровное вращение и уменьшает нагрузку на основную часть. Изгиб крыльев ротора по диагонали содействуют юркому росту скорости. Эффективность применения ветровой силы близка к водопрямым устройствам. Тем самым это вызывает увеличенный шум при работе и зондирует звуковые волны, расположенные в низких волновых частотах звукового диапазона. Из-за сложности конструкции крыльчаток, показанный на рисунке 10 данный ротор является дорогим и считается его недостатком.



Рисунок 10 – Внешний вид геликоидного ротора

г) Многолопастной ротор

Это модификация конструкции вертикальной оси ветродвигателя, которая включает в себя внешнюю сферу с неподвижными лопастями. Программа увеличивает сжатие и ускорение выходного потока воздуха полезной площади, повышая КПД всей ветротурбины. Кроме того, конструкция показанная на рисунке 11, чувствительна к воздействию слабых ветров. Многоступенчатый ротор характеризуется высокой материалоемкостью, что увеличивает общую стоимость ветрогенератора. В процессе эксплуатации конструкция ветрогенератора с многоступенчатым ротором предполагает увеличение зондирующего импульсного фона [19].



Рисунок 11 – Внешний вид многолопастного ротора

2.2 Выводы ко второму разделу

На основе изучения конструкционных и технологических особенностей промышленных ВЭУ можно сделать следующие выводы.

1) Вертикальный ветрогенератор имеет меньший момент трогания. Следовательно, он способен работать, начиная с минимальных скоростей ветра. Горизонтальный – более мощный, следовательно, он способен снабжать энергией электропримемники значительно большей мощности.

2) Вертикально-осевые ВЭУ устанавливаются на земле, тем самым облегчают доступ к генератору и их обслуживание.

3) Вертикальные ветрогенераторы не боятся разнонаправленного ветра или бури, так как у них минимальное сопротивление ветру. Все эти качества позволяют устанавливать эти ВЭУ близко к жилью и даже в городах.

4) В среднем большинство современных горизонтальных ветроэнергетических установок характеризуется коэффициентом использования ветра, равным 0,48. Из данных специальных исследований следует, что этот коэффициент можно увеличить. Например, у некоторых конструкций ВЭУ, отличающихся совершенными аэродинамическими характеристиками, коэффициент использования энергии ветра может достигать значения, равного 0,593 [15, с. 7].

5) Горизонтально-осевые ВЭУ имеют более высокий коэффициент полезного действия ($\eta=40-59\%$). Поэтому эти ветрогенераторы могут использоваться как для бытового применения, так и для промышленного производства электроэнергии. Ветрогенераторы промышленного назначения имеют достаточно большую мощность, которая к тому же может быть увеличена в сотни раз за счет установки в каждом ветропарке до нескольких сотен ветряков.

6) Определенным недостатком горизонтальных ветрогенераторов можно считать необходимость в постоянном поиске ветра при помощи флюгера, который является дополнительным устройством в составе ВЭУ, усложняющим конструкцию и повышающим ее стоимость.

С учетом отмеченных выше преимуществ ВЭУ горизонтально-осевого типа и их отлаженного промышленного производства делаем вывод о целесообразности установки в качестве альтернативного источника питания для одного из цехов промышленного предприятия ветрогенератора именно этой конструкции.

Для реализации данного решения и достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать объект для альтернативного электроснабжения.
2. Выбрать и рассчитать параметры ВЭУ.
3. Разработать модель ВЭУ с помощью графического программного обеспечения Matlab.

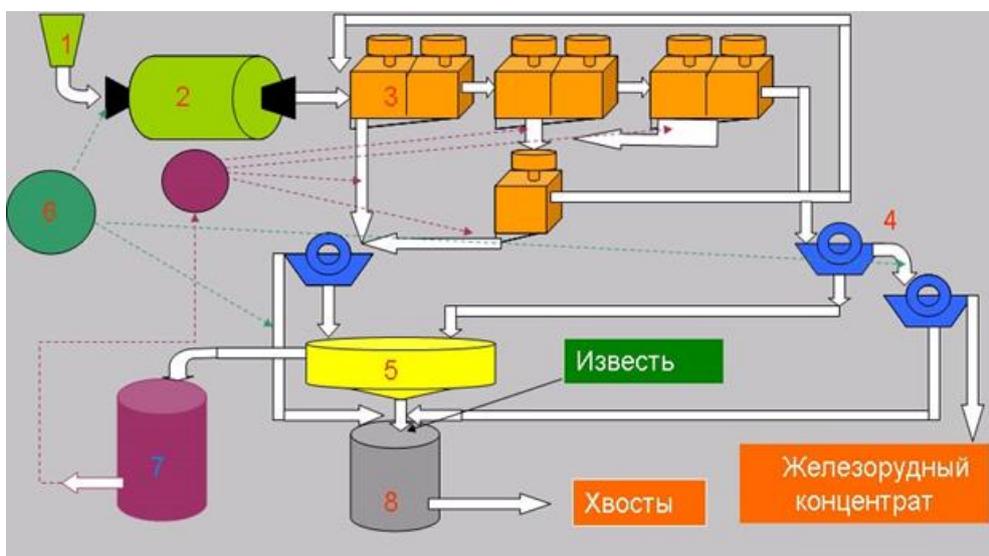
3 Альтернативный вариант электропитания

3.1 Выбор производственного объекта

В плане эксперимента выбор ветроустановки будем делать применительно к вспомогательному производству промышленного предприятия, тем самым минимизируя риски остановки массового производства.

В качестве альтернативного источника энергии используется цех дробильно-обогащительной фабрики АО "АрселорМиттал Темиртау".

План процесса технологии в одном из цехов дробильно-обогащительной фабрики показана на рисунке 12.



1 - Бункер исходной руды - 1 ед.; 2 - Дробилка КСД-2200А - 1ед.; ФлотомашинФПМ-63, Конвейер - 6, 7- Дробилка КСД-1750Т, 5- Мельница МШР 60 × 80, Грохот ГИТ-61А -4, Бункер дробленой руды, Сгуститель Ц-15

Рисунок 12 - План технологического процесса цеха

Из полученных документации от данного производства стало известно номинальная мощность и работа устройств приведенных в технологическом процессе. С помощью этих данных рассчитаем электропотребление одного цеха дробильно-обогащительной фабрики.

3.2 Расчет энергопотребления выбранного объекта

Для расчета максимальной мощности необходимо определить энергоемкие характеристики каждого электроприемника дробильно-

обогащительного цеха в определенное время дня. Это позволяет рассчитать максимальную потребляемую мощность.

Уровень энергопотребления рассчитывается в определенное время суток как сумма мощности всех электроприемников данной фабрики соответственно в часы с большей и меньшей работоспособностью.

Данные о работе электроприемников и потреблении энергии приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет пиковой мощности

Электроприбор	Установленная мощность, Вт	Мгновенная потребляемая мощность, Вт			
		Утро	День	Вечер	Ночь
Дробилка КСД-2200А	25000	25000	25000	0	0
Флотомашина ФПМ	7500	7500	7500	7500	7500
Ленточный конвейер типа ОЗСМ ТК-24А	4000	4000	4000	4000	0
Дробилка КСД-1750Т	75000	75000	75000	75000	0
Мельница МШР 60 × 80	20000	20000	20000	0	0
Грохот ГИТ-61А	18000	18000	18000	18000	0
Сгуститель Ц-15	5500	5500	0	5500	5500
ИТОГО в пике P_п:	155000	155000	149500	110000	13000

Проанализируем данные, приведенные в таблице 2.

Максимальная мощность, потребляемая электрооборудованием дробильно-обогащительных комбинатов в утренние часы:

$$P_{\text{пик}}=155000 \text{ Вт} \quad (3.1)$$

Мощность инвертора в составе ветровой установки, не должна иметь значение меньше чем $P_{\text{и}} > 155000$.

Приближенная мощность инвертора равна:

$$P_{и} = 160 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

С учетом времени работы каждого из электроприемников получим суточное электропотребление цеха.

Количество энергии, потребляемой дробильно-обогащительным цехом в сутки:

$$E_{сут} = 402880 \text{ Вт}\cdot\text{ч} \quad (3.3)$$

Количество энергии, потребляемой цехом в течение одного часа, составляет:

$$E_{час} = \frac{E_{сут}}{24} = \frac{402880}{24} = 16786 \text{ Вт}\cdot\text{час} \quad (3.4)$$

Определим номинальную мощность ветроэнергетической установки, которая может снабжать электроэнергией дробильно-обогащительный цех.

Мощность, которую должна развивать ветроэнергетическая установка, можно найти, разделив часовой объем электроэнергии на время потребления, равное одному часу [5]:

$$P_{спец} = \frac{E_{час}}{1} = \frac{16786}{1} = 16786 \text{ Вт}. \quad (3.5)$$

3.3 Выводы к третьему разделу

В результате проведенных расчетов определены следующие параметры объекта электроснабжения, по данным которых будет выбираться ветроэнергетическая установка:

- Пиковая мощность дробильно-обогащительного цеха;
- Количество энергии, потребляемой цехом в сутки;
- Номинальная мощность ветровой установки.

Величина пиковой суточной мощности цеха составляет $P_{в} = 155000 \text{ Вт}$.

Мощность инвертора должна быть не меньше $P_{и} = 160 \text{ кВт}$.

Количество энергии, потребляемой цехом в сутки находится на уровне $E_{сут} = 402880 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$. На это значение необходимо ориентироваться при выборе комплектующего оборудования ВЭУ и расчете емкости аккумуляторной батареи.

4 Выбор и расчет параметров ветроэнергетической установки

4.1 Оценка ветроэнергетического потенциала

Потенциал энергии потока ветра вычисляется на определенной заданной высоте от земли.

Энергия потока ветра описывается скоростью, которая представляет собой случайную величину пространства и времени. Энергетические характеристики ветроэнергетики характеризуются как случайное изменение ветроэнергетического потенциала процесса. Основной вероятностью данного метода является дискретизация времени, все параметры, определенные в промежутке дискретирования, можно считать независимыми константами, а временной интервал обычно используется как "час, день, месяц, год" [9-11].

Для выработки электроэнергии потенциал ветра в этой области является очень важным показателем. На основании данных метеорологических наблюдений, направления и интенсивности ветра подготовлен специальный справочник "кадастр ветрового потока в регионе" [42]. Основные показатели запасов ветроэнергетики:

- Средняя скорость ветра в год, скорость ветра в сутки и год;
- Не изменность скорости, тип функции передачи и параметры скорости ветра;
- Удельная поточность ветра и мощность;
- Региональные ветроэнергетические ресурсы.

"Для того, чтобы информация о средней скорости ветра в определенной местности была достоверной, необходимо систематически контролировать ее не временно, а в течение длительного времени. Рекомендуется вычисление данных в промежутке 10 лет" [14, 15].

Скорость ветра, используемая при расчете, принимается путем усреднения наблюдений, записанных с установленным интервалом: от 1 дня до 10 лет.

$$V_{CP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (4.1)$$

где V_i - скорость ветра в интервале измерения i ;
 n - количество интервалов измерений.

Результаты непрерывного контроля представлены в электронной базе данных космического агентства "Nasa"- погода на земле и солнечная энергия. Он несколько раз в день собирает ежедневное измерение от конкретных метеостанций.

Согласно данным, представленным электронной базой данных, среднегодовая скорость ветра в Карагандинской области составляет 6-7,5 м/с [15, 16].

"Для численной оценки разброса скоростей ветра от среднего значения используется коэффициент вариации средних скоростей, который определяется выражением:

$$C_V = \frac{S_V}{V_{CP}} \quad (4.2)$$

где S_V - среднеквадратичное отклонение текущей скорости ветра от среднего значения;

V_{CP} - средняя скорость ветра за исследуемый период времени [42, 43].

Скорость ветра как показатель возможности установки ветровой электростанции в конкретном районе. Стандартная минимальная скорость - это величина, при скорости ветра современные ветровые турбины начинают вращаться и создают свою номинальную мощность.

Для оценки направления прохождения ветра принимается ветреная диаграмма как на рисунке 13, длина ее излучения пропорционально частоте направления ветра в каждую сторону от центра диаграммы.

При строительстве ветроэлектростанции необходимо учитывать преобладающее направление ветра в выбранном месте [43].

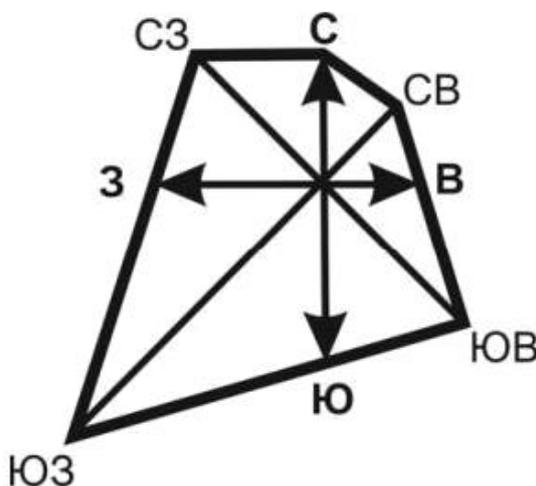


Рисунок 13 – Роза ветров

Таким образом, в предлагаемом месте установки ветроэлектростанции описываются результаты следующие исследования ветроэнергетического потенциала:

- Определение средней скорости ветра на основе 5-10 лет, среднесуточных, месячных и годовых метеорологических наблюдений.
- Средняя скорость ветра в месяц превращается в расчетную высоту башни ветровой турбины.

- Высота деления скорости ветра по оси ветрового двигателя по градиенту ежемесячно в год.

- В исследуемом районе конструирование диаграммы розы ветров.

По вычисленным данным ветровой характеристики можно оптимально выбрать ветроэлектро установку и подключить ее к системе питания выбранного производства [43,42].

4.2 Выбор ветрового генератора

В некоторых значениях ветрогенератор можно считать бытовым продуктом, так как он не требует разрешения на установку и запуск. Это считается важным преимуществом ветроэнергетики. Ветровые турбины могут устанавливаться без любых манипуляций, но со специальными административными разрешениями они могут обеспечивать полную выработку электричества в период его отсутствия из основной сети. Ветровые турбины не требуют топлива, не загрязняют атмосферу и природу, не вызывают чрезмерного шума.

Ветровые турбины могут быть использованы в момент отключения основного источника питания или выступать в роли резервного источника питания потребителям, а также в период повышения стоимости электроэнергии для экономии денежных средств.

На самом деле ветроэнергетическое оборудование - это не только устройство для производства и хранения электроэнергии, но и устройство, позволяющее получить напряжение с нормированными стандартами качества электрической энергии.

Например, в составе ВЭУ имеется аккумуляторная батарея (АКБ). Она заряжается на постоянном токе. Электрогенератор же, входящий в состав ВЭУ, вырабатывает энергию на переменном токе. Поэтому в составе ВЭУ имеется устройство, преобразующее систему напряжения переменного тока – в систему напряжения постоянного тока. Это – выпрямитель. Преобразование из постоянного тока в переменный (50 Гц, 220/380 В) осуществляется с помощью инвертора, который также является составной частью ВЭУ. Применение инверторов в составе ВЭУ обязательно, если электроприемники, получающие энергию от ветрогенератора, чувствительны к качеству питающего напряжения. Для питания крупных электропотребителей ВЭУ может использоваться в составе комплекса с дизельным или бензиновым генератором, солнечными батареями, а так же центральной сетью электроснабжения. Включаемый в систему дизельный или бензиновый генератор, солнечные батареи используются как резервные источники зарядки аккумуляторных батарей (далее АКБ) и для генерации необходимой электрической мощности, на случай длительного безветрия. Таким образом, создается надежная и экономичная система автономного гарантированного электроснабжения.

Характеристики ветроэнергетической установки связаны от массы вырабатываемой электроэнергии и предлагаемого места установки ветровой турбины. В выбранной зоне ветер характеризуется потенциалом среднегодовой скорости V_{CP} .

Количество энергии, которую может создать ветряная мельница, зависит от поверхности вращаемого колеса, обхватываемый ветром. Площадь вычисляется радиусом гребного винта (или диаметром) [3,с.15]. Соотношение скорости потока и мощности, выпускаемой ветровыми турбинами определяет следующее выражение:

$$P_{ЭЛ} = \xi 0,5\pi R^2 \rho V_{CP}^3 \eta, \quad (4.3)$$

- где ξ - коэффициент использования энергии ветра;
 R - радиус ветроколеса, м;
 ρ - плотность воздуха (при нормальных условиях $\rho = 1,2041$ кг/м³);
 V_{CP} - среднегодовая скорость ветра м/с;
 η - КПД электромеханического преобразователя ($\eta = 0,7 - 0,9$).

Определим критерии, в соответствии с которыми следует проводить выбор конкретной модели ветрогенератора.

- Первый критерий – это среднегодовая скорость ветра на установочной площадке.

- Второй критерий – величина, вырабатываемой электрической мощности.

- Третий – значение стартовой скорости ветра, варьирующейся для разных моделей в пределах от 2-х до 4-х м/с.

- Четвертый – номинальная скорость ветра, составляющая обычно 8– 15 м/с.

Среднюю годовую скорость ветра определяем с использованием шкалы Бофорта и данных, полученных путем наблюдения за видимым действием ветра в течение года на площадке, планируемой к установке ветрогенератора, которая показана на рисунке 14.

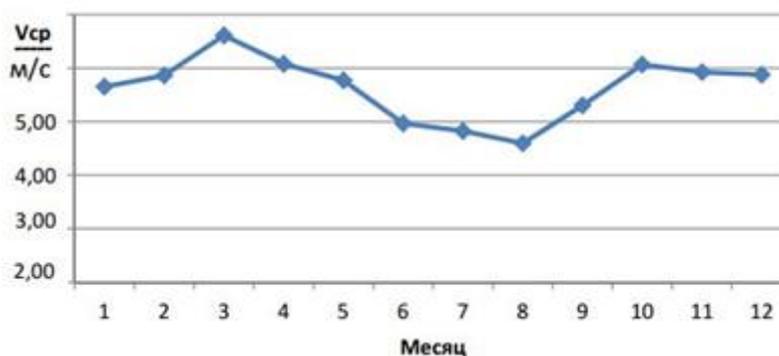


Рисунок 14 – Средняя скорость ветра по месяцам

Средняя годовая скорость ветра по шкале Бофорта и данным метеонаблюдений составляет $v_{cp} = 6$ м/с.

Для выбора ветрогенератора можно использовать мощностную характеристику, наглядно отражающую возможности ВЭУ и представляющую собой зависимость вырабатываемой электрической мощности от скорости ветра. Данная характеристика обычно снимается экспериментально и приводится в техническом описании ветрогенераторов.

На основе анализа данных, представленных на сайтах производителей, предварительно выбираем для альтернативного электроснабжения цеха ветровую установку типа Weswen7-5000. На рисунке 15 приведена мощностная характеристика данной ВЭУ.

Ветрогенератор WH7-5000 характеризуется номинальной мощностью 5 кВт. Функционирует при начальной скорости ветра в 2,5 м/с. На средней годовой скорости ветра в 6 м/с вырабатываемая мощность, равна примерно 10000 Вт. Для генерирования мощности в 16786 Вт необходимо не менее двух «ветряков»: $2 \cdot 10000 \geq 16786$ Вт.

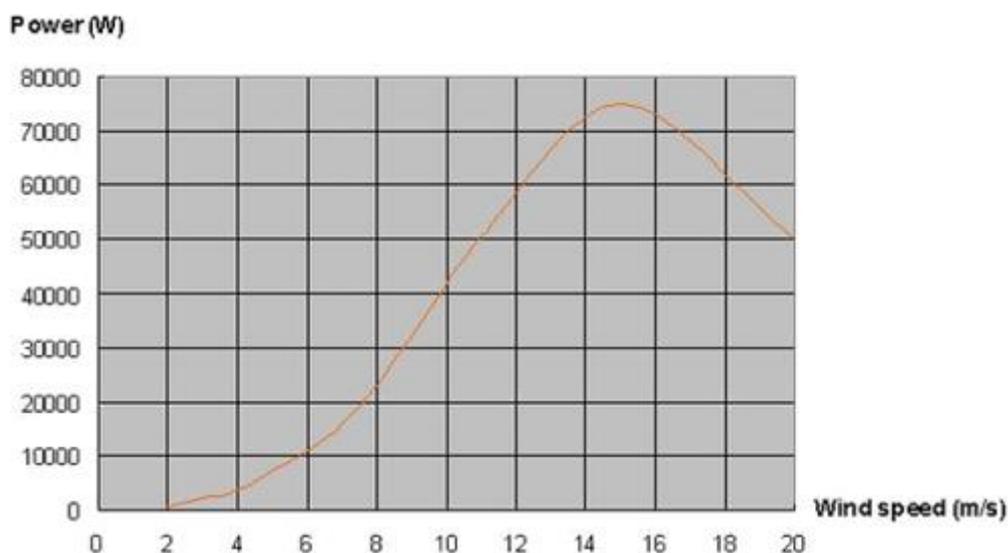


Рисунок 15 – Мощностная характеристика ветрогенератора типа WH7-5000

Ветрогенераторы Weswen являются одними из самых передовых в мире, благодаря использованию запатентованного магнитного материала, а также специальных сплавов меди, авиационного алюминия и нержавеющей стали. Данные ветрогенераторы могут генерировать больше энергии, чем конкурентные модели. Коэффициент использования энергии ветра высок, при этом КПД генератора составляет более 80%. Вал и хвост крыла выполнены из стали, полюсной хвост – из марганцевой стали. Использование высококачественных материалов обеспечивает надежность и долговечность. Стабильная работа системы. В модели Weswen7-5000 и выше экономически обосновано использование интеллектуальной системы управления Siemens

PLC, которая реализует функции: самозащиты, автоматического поиска оптимального направления ветра, мониторинг и т.д., это исключает рыскания вала ветрогенератора, обеспечивает плавное управление коробкой передач, что в свою очередь увеличивает надежность и срок службы всей системы.

4.3 Вспомогательное оборудование ветроэнергетической установки

Вспомогательное оборудование не входит в основной состав оборудования ВЭУ, так как при изменчивых ветровых погодах и электрических потребителей на одну ветровую турбину можно подключить несколько различных емкостных устройств и разместить не схожих по мощности инверторы. Вспомогательные устройства оборудуются и рассчитываются для каждого объекта отдельно.

"Аккумулятор предназначен для хранения электричества, чтобы использовать его в безветренное время. Им также свойственно стабилизировать выходной импульс генератора. Благодаря емкостным батареям можно снять постоянное напряжение даже во время порыва ветра" [35, 36]. В условиях безветренности местности, питание объектов и потребителей осуществляется от таких емкостных устройств.

Бесперебойную работу ветровых турбин обеспечивают также другие модели накапливающих устройств. Среди них есть такие:

1. Автомобильная батарея, которая является одной из самых простых батарей. Они делятся на ремонтируемые и уплотненные. Первый тип аккумуляторной батареи может разрядится до 100 периодов, постоянно проверяет уровень электролита дистиллированной водой, что соответствует требованиям стандарта, герметичным оборудованием является не луженая аккумуляторная батарея, способная выдерживать до 200 циклов разряда в год. После достижения данного значения разрядов они уже не пригодны к нормальной работе.

2. Гелевые АКБ относятся к необслуживаемому виду химических источников электрической энергии. Они отличаются наличием специального загустителя селикогеля в составе кислотного электролита и повышенной чувствительностью к перезарядам. Пластины производятся обычной штамповкой или с использованием «намазной» технологии. Низкое значение конечного напряжения, по сравнению с другими типами АКБ, обеспечивает небольшое количество циклов разрядов, которое варьируется в пределах 350 раз.

Помимо АКБ и аккумуляторов в состав ВЭУ могут входить следующие устройства.

- Стабилизатор напряжения (с расширенным диапазоном входящего напряжения), позволяющий при его использовании в составе различных систем гарантированно получать на выходе с генератора напряжение уровня 220/380В.

Данное устройство обычно применялось ранее в системах, где для приемников стабильное напряжение являлось важным.

- Управляющие устройства, которые могут, например, сочетать в себе мощную систему возбуждения асинхронного генератора и мощное выпрямительно-зарядное устройство с ШИМ-регулированием. Основным преимуществом данных устройств является возбуждение асинхронного генератора всего при трех оборотах ветроколеса. Уже при столь малых оборотах создается ток, достаточный для устойчивой зарядки АКБ.

- "Ввод автоматического резерва электропитания - АВР. При выключении основного питания подключает несколько источников питания автоматически на выдержке времени 0,5 секунды. Он объединит ветряную турбину, главную сеть, альтернативные источники энергии и остальные в одну автоматизированную систему. Ввод резерва не позволяет объектной сети работать параллельно от другого источника электропитания [40].

- Выпрямитель - регулирует выходное напряжение генератора для питания батареи или инвертора (для улучшения качества ветрового напряжения);

- Инвертор - преобразует постоянный ток от выпрямителя или батареи в переменный ток. Электрооборудование дробильно-обогащительной фабрики работает на переменном напряжении. Поэтому очень важно иметь инвертор.

Инверторы бывают разных типов. Поскольку нагрузка цеха – трехфазная, то нужен инвертор, на выходе у которого – 3-х фазная система напряжения.

В настоящее время наиболее широко распространены автономные инверторы напряжения, в которых в качестве коммутирующих ключей работают биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы).

Посредством системы управления каждый из электронных ключей периодически подключается к постоянному напряжению, имеющему место на выходе неуправляемого выпрямителя. Другими словами, с помощью ШИМ-модулирования формируется трехфазное напряжение переменного тока, первая гармоника которого имеет амплитуду и частоту, как у сетевого напряжения. На наш взгляд, что в состав ВЭУ должен входить инвертор именно рассмотренного здесь типа.

4.4 Установка и монтаж ветряных установок

"По возможности рекомендуется устанавливать ветряные турбины над естественными или искусственными преградами.

Как показано на рисунке 16 чем ближе место установки, тем меньше скорость ветра, независимо от того, где находится ветровая установка. Визуально тактовая частота ветра намного выше, чем данные видимые на земле.

Данные результаты показанные на рисунке обусловлены тем, что поверхность земли и объекты расположенные в нем, а так же не ровность создает видимый эффект силы трения. Такие препятствия создают турбулентность, которое негативно влияет на нормальную работу ветро турбины. Следовательно, ветропарки устанавливаются на открытых зонах, где помехи на ветер снижены до минимума. Расположение ветростанции на высоких местах является приоритетом» [40].

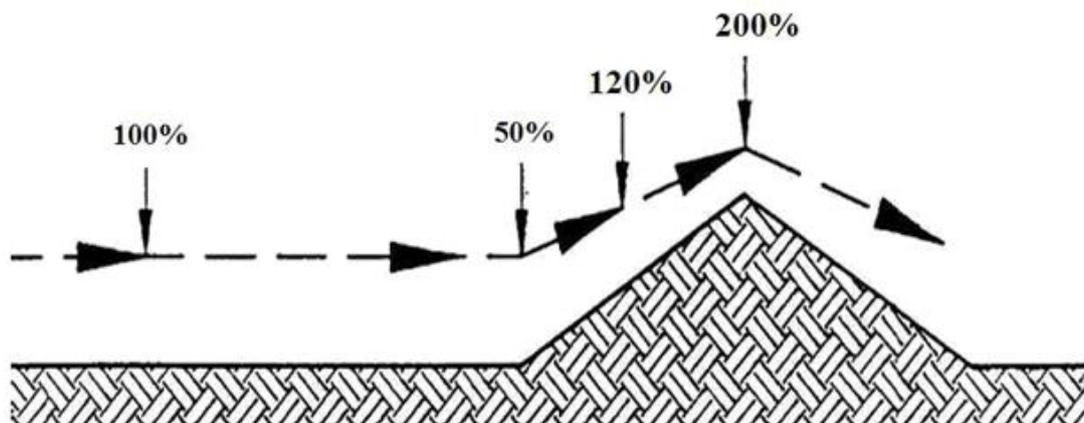


Рисунок 16 – Плотность ветрового потока, %

Сила ветра - это функция скорости потока в кубе. Таким образом, даже небольшое изменение поточности ветра вызывает большое изменение выходного сигнала. Сила увеличивается, когда скорость ветра увеличивается вдвое. Надо учитывать, что небольшие изменения в производственной структуре могут значительно повлиять на эффективность ветряных турбин.

В случае подземных установок следует учитывать свойства почвы ветряной электростанции. Если не принять меры по укреплению фундамента существующих ветряных турбин, вспомогательные элементы не подходят для установки ветряных турбин и рыхлого песка в отличных погодных условиях.

Выбирая место, надо учитывать расстояние между ветряком и вспомогательными устройствами. Более короткие расстояния требуют более коротких кабелей. Результат - снижение потери при передаче. Для передачи на большие расстояния рекомендуется использовать провода с большим сечением [40].

Во время эксплуатации специально обученный персонал должен установить ветряную турбину со строгим контролем технической безопасности.

Установка должна осуществляться при скорости ветра 2 м/с в пригодную и нормированную погоду, если значение поточности ветра превышает норму то работа по вводу в эксплуатацию ветровой установки должна быть прервана.

4.5 Вычисление технических характеристик ветроэнергетического оборудования

4.5.1 Площадь для установки ветровой станции

Рассчитываем площадь участка, на котором будут расположены ветровые установки. Это – площадь размещения нижнего основания мачты S_M и зона крепления растяжек S_p .

Требуемые значения рассчитываются исходя из технических характеристик ветрогенераторов из таблицы 3:

- диаметр трубы мачты, $d = 185$ мм;
- высота мачты, $h = 12$ м;
- угол растяжки, $\Omega = 300$.

Таблица 3 - Технические характеристики ветрогенератора Weswen7-5000

Номинальная мощность	5000 Вт
Максимальная выходная мощность	7500 Вт
Зарядное напряжение	Постоянный ток 180 В
Выходное напряжение	Переменный ток 180В
Лопастей/ количество	3
Материал лопасти	Армированный стекловолокном пластик
Лопастей несущего винта диаметра	6,4 м
Начальная скорость ветра	2,5 м/с
Номинальная скорость ветра	10 м/с
Номинальная скорость вращения	240
Регулировка скорости (защита)	Механическая + ручная
Коэффициент исп. энергии ветра	40%
Выход генератора	Трехфазный переменный ток
Частота выхода напряжения	0-360Гц
Расчетный ток	20.0 А
Максимальный ток (кратковременно)	32 А
Уровень шума (при скорости ветра 5 м/с)	34 дБ
Эффективность преобразования генератора	80%
Свободно стоящая мачта - диаметр	Ø495· Ø185/2шт.
Высота мачты	12 м
Рекомендуемые батареи	400/ 600 А·ч

Площадь сечения мачты S_M :

$$S_M = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,85^2}{4} = 2,7 \text{ м}^2, \quad (4.4)$$

где d - диаметр трубы мачты.

Определим площадь, занимаемой растяжками S_P :

$$D_P = 2 \cdot h \cdot \sin \Omega = 2 \cdot 12 \cdot 0,5 = 12 \text{ м}, \quad (4.5)$$

где h - высота мачты;
 Ω - угол растяжки.

Площадь под установку растяжек равна площади вписанного в окружность квадрата со сторонами L_{KB} как на рисунке 17:

$$S_P = S_{KB} = L_{KB}^2 = \frac{S_{окр}}{\pi \cdot 0,5} = \frac{\pi \cdot D_P^2}{\pi \cdot 4 \cdot 0,5} = \frac{D_P^2}{2} = \frac{12^2}{2} = 72 \text{ м}^2 \quad (4.6)$$

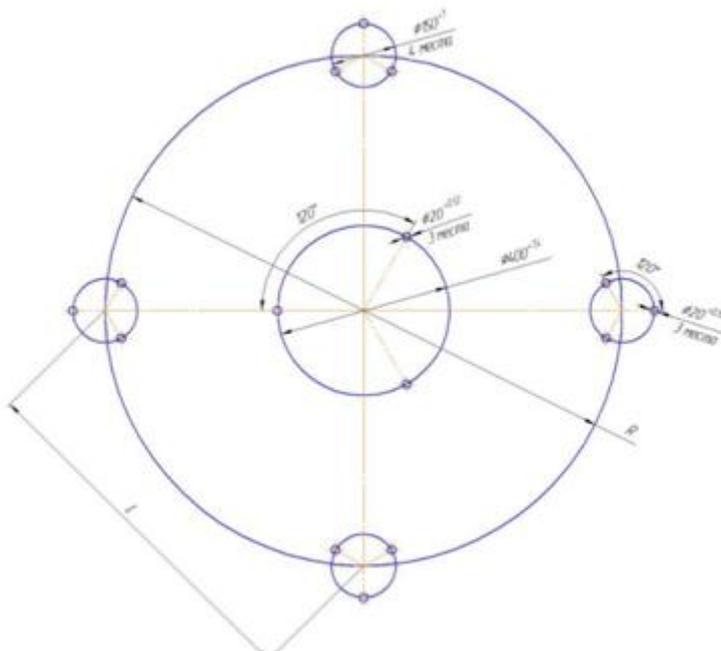


Рисунок 17 – Схема расположения фундаментов под мачту и растяжки

По результатам расчета получаем что, площадь земли занимаемой ВЭУ складывается из площади сечения мачты S_M (4.4) и территории под растяжки S_P (4.6). Сумма этих значений равна $74,7 \text{ м}^2$. Эта площадь, требуемая для установки одной ВЭУ.

Для расположения ветровой электростанции на территории промышленного предприятия, состоящей из 2 «ветряков», понадобится место в два раза больше, т.е. 149,4 м².

Выбор места для установки ветроэлектростанции должен производиться в благоприятных условиях с высоким ветровым потенциалом, чтобы обеспечивать экономическую целесообразность установки.

Наиболее благоприятными условиями считаются возвышенности и равнинные участки.

Мы предполагаем, установить альтернативное электроснабжение на крыше предприятия, тем самым создадим условия для выработки электроэнергии для цеха. Это место ограждено и недоступно для посторонних лиц, удалена от жилых зданий, тем самым обеспечивает снижение уровня шума ветроустановки до 45 дБ. На крыше нет линий электропередач, магистральных газопроводов, кабельных и водопроводных трасс. Что создает идеальное условие для монтажа и выработки электроэнергии ветроэлектростанции.

4.6 Аэродинамические параметры ВЭУ

4.6.1 Аэродинамическая мощность

Характеристики ветрогенератора зависят от его аэродинамических особенностей.

Электрическая мощность ВЭУ связана с аэродинамической мощностью через коэффициент использования энергии ветра ξ :

$$P_{\text{Э}} = \xi \cdot P_{\text{А}}, \text{ Вт.} \quad (4.7)$$

Реальный ξ горизонтально-осевых установок изменяется в пределах 0,25...0,4. Максимальное возможное значение коэффициента использования энергии ветра, определяемое расчетным путем по Жуковскому-Бетцу равно $\xi_{\text{ж}} = 0,593$. На практике это значение получить нельзя из-за возникающих потерь.

Аэродинамическая мощность является энергией набегающего потока ветра, передаваемой ветроколесу за 1 секунду:

$$P_{\text{А}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot v \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot v \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}, \text{ Вт} \quad (4.8)$$

где $P_{\text{А}}$ - аэродинамическая мощность, Вт;
 ρ - плотность воздуха, проходящего через ротор (принимается 1,2041 кг/м³ в сухом воздухе при температуре 20°C и давлении 101,325 кПа);
 v - скорость ветрового потока до встречи с ротором, м/с;

m - масса воздуха, проходящего через ротор за 1 секунду, кг;
 V - объем воздуха, проходящий через ротор за 1 секунду, м³;
 S - ометаемая ветром площадь ветроколеса.

Площадь, ометаемая ветром, для горизонтально-осевых установок равна:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2 \quad (4.9)$$

где D - диаметр ветроколеса.

Для расчетов нам потребуются технические характеристики ветрогенератора Weswen7-5000, приведенные в таблице 3:

Номинальная мощность ВЭУ - 5000 Вт;

Номинальная скорость ветра - 10 м/с.

Из формулы (4.7) находим идеальную аэродинамическую мощность P_A при идеальном коэффициенте использования ветра по Жуковскому:

$$P_A = \frac{P_{\text{э}}}{\xi_{\text{ж}}} = \frac{5000}{0,593} = 8432 \text{ Вт.} \quad (4.10)$$

Из формулы (4.8) находим ометаемую площадь ротора S :

$$S = \frac{2 \cdot P_A}{\rho \cdot v^3} = \frac{2 \cdot 8432}{1,2041 \cdot 10^3} = 14 \text{ м}^2 \quad (4.11)$$

В действительности ометаемая площадь должна быть на 33-35% больше по сравнению с идеальной, та как реальный коэффициент использования ветра не превышает 65-67% от идеального.

$$S_{\text{реал}} = S \cdot 1,33 = 18,6 \text{ м}^2 \quad (4.12)$$

Из формулы (4.9) находим диаметр ротора D :

$$D = \frac{\sqrt{4 \cdot S}}{\pi} = 4,9 \text{ м.} \quad (4.13)$$

Наружный диаметр колеса найдем по формуле:

$$D_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{8N}}{C_p \rho V^3 \pi \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{мех}}} = 3,63 \text{ м,} \quad (4.14)$$

где C_p - коэффициент в рабочей точке принимаем $C_p = 0,4$.

Округляем значение $D_{\text{расч}} = 4$ м.

Радиус ветроколеса соответственно $R = 2$ м.

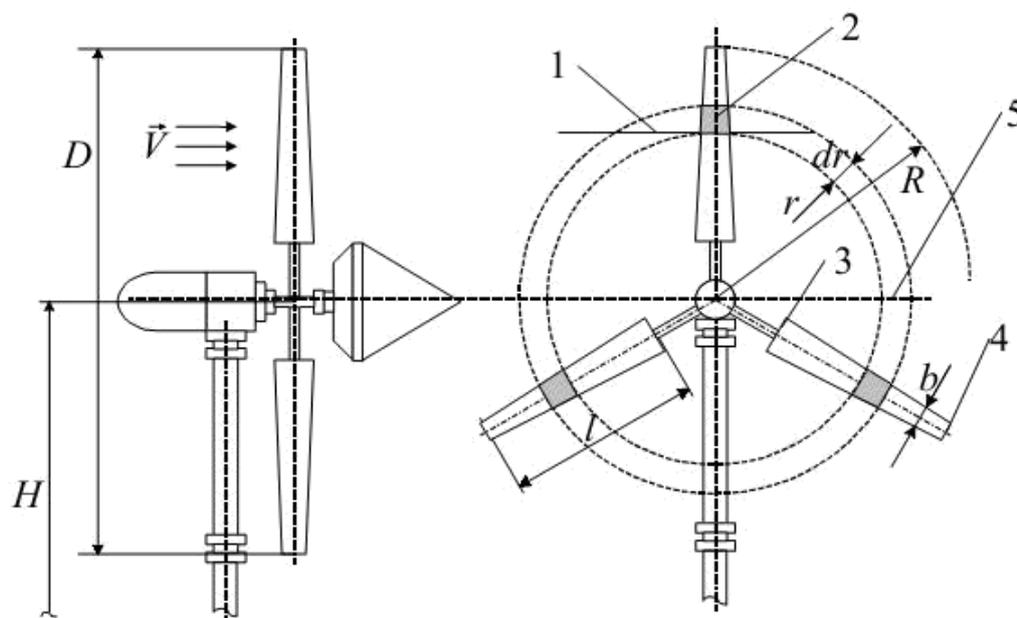
Таким образом, разрабатываемая ВЭУ имеет следующие аэродинамические характеристики:

- аэродинамическая мощность $P_A = 8432$ Вт;
- ометаемая площадь ветроколеса $S = 18,6$ м²;
- диаметр ротора $D = 4,9$ м;
- наружный диаметр ветроколеса $D_{\text{расч}} = 4$ м.

4.6.2 Методика расчета ветроколеса с горизонтальной осью вращения

Метод использует два уравнения для расчета ветрового колеса. Осевая составляющая реактивной силы, протекающей в первом предложении, расположена в зоне вращательного течения лопасти как показано на рисунке 18 для влияния на площадь поперечного сечения циркулирующего воздушного потока она равна разности давлений от передней и задней частей ветрового перехода. Первым уравнением является выражение:

$$i_n b C_{y_a} = \frac{8\pi r e}{1+e - e^2(Z_u + \mu_a)1 + Z_u^2}. \quad (4.15)$$



1 – промежуточное сечение; 2 – Элементарная лопасть; 3– коневое сечение; 4 – периферийное сечение; 5 – кольцевая струя

Рисунок 18 – Ветроколесо горизонтального типа

Второе уравнение отражает теорему об изменении момента количества движения. Данная теорема в применении к ветровому колесу формулируется следующим образом: момент относительно оси ветряка аэродинамических сил, действующих на лопасти на рисунке 18, равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, получаемого кольцевой струёй, увлеченной ветряным колесом. Вторым уравнением является выражение:

$$Z = Z_u \left(1 - e - \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1-\mu_a \cdot Z_u}{Z_u + \mu_a} \right) \quad (4.16)$$

Уравнения (4.15) и (4.16) представляют собой основу для аэродинамического расчета ветроколеса.

Предложенная методика позволит рассчитать аэродинамику ветроколеса с горизонтальной осью вращения. В нашем случае можно избежать громоздких расчетов. Так как, предполагается использовать готовую ветроустановку, в состав которой входит рассчитанное по данной методике ветроколесо.

4.7 Анализ результатов расчета характеристик ВЭУ

Приведенный метод расчета позволил определить следующие параметры ветроэнергетической установки:

- Пиковую мощность цеха;
- Количество энергии, потребляемой цехом в сутки;
- Номинальную мощность ветровой установки;
- Площадь, занимаемая одной ветровой установкой
- Аэродинамическую мощность;
- Площадь ротора;
- Диаметр ротора.

Максимальная пиковая мощность за сутки составляет $P_{\text{в}}=155000$ Вт.

Значит мощность инвертора $P_{\text{и}}$ должна быть не менее 160 кВт.

Количество энергии, потребляемой цехом в сутки находится на уровне $E_{\text{сут}}=402880$ Вт·ч. На это значение необходимо ориентироваться при выборе комплектующего оборудования ВЭУ и расчете емкости аккумуляторной батареи.

Номинальная мощность ветроэнергетической установки для автономного энергоснабжения цеха с учетом средней скорости ветра в регионе равна 15 кВт. Площадь, занимаемая одной ветроустановкой с растяжками равна 74,7 м². Для ветровой электростанции в целом требуется 149,4 м².

Параметры ветроколеса должны быть следующими:

- Идеальная аэродинамическая мощность равна $P_{\text{А}}=8432$ Вт;

- Ометаемая площадь должна быть равной $S = 18,6 \text{ м}^2$;
- Диаметр ветроколеса - $D = 5 \text{ м}$;
- Наружный диаметр ветроколеса $D_{\text{расч}} = 4 \text{ м}$.

4.8 Выбор электрогенератора

«Величина электрической мощности, вырабатываемая электрогенератором ветроэнергетической установки, во многом зависит от формы лопастей ветроколеса и кинетической энергии ветра» [8].

Определение кинетической энергии ветра производится известному согласно выражению:

$$\mathcal{E}_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2}, \quad (4.17)$$

где V - средняя скорость ветра;

$m = \rho VS$ - масса воздуха;

S - ометаемая площадь ветроколеса (ВК) с горизонтальной осью вращения, перпендикулярно которой проходит ветровой поток;

$\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха соответствующая нормальным климатическим условиям ($t = 15^\circ\text{C}$, давление равно $760 \text{ мм рт.ст.}(101,3 \text{ кПа})$).

Подставив в (4.17) значение массы воздуха и ометаемой площади ветрового колеса можно получить выражение для расчета механической мощности на валу электрогенератора:

$$N_{\text{ВК}} = 0,5\rho\xi D^2 V^3, \quad (4.18)$$

где $\xi = 0,4 \dots 0,45$ - коэффициент использования энергии ветра [10].

Электрическая мощность из-за потерь в электрической и механической частях генератора несколько меньше:

$$P_{\text{ВЭУ}} = N_{\text{ВК}}\eta_{\text{МЕХ}}\eta_{\text{Г}}, \quad (4.19)$$

где $\eta_{\text{МЕХ}} = 0,8 \dots 0,9$ - КПД механической передачи ветрогенератора;

$\eta_{\text{Г}} = 0,7 \dots 0,9$ - КПД электрогенератора.

Заменим $N_{\text{ВК}}$ в формуле (4.19) на выражение (4.18). Это подстановка дает возможность выявить функциональную связь между механическими и электрическими величинами ветрогенератора:

$$P_{\text{ВЭУ}} = 0,68D^2 V^3 \quad (4.20)$$

Существует четкая связь между производством электроэнергии, диаметром лопасти и поточностью ветра.

Кроме того, мощность ветрогенератора связан с аэродинамическим параметром ветроколеса [9].

В этой конструкции допускаем применение ветровой установки с осью кручения в горизонтальной плоскости и лопастями на подобие крыльчаток.

«Мощность генератора ВЭУ пропорциональна скорости ветра в третьей степени. Поэтому при изменении скорости ветра в широком диапазоне происходят большие потери энергии в генераторах вследствие низких КПД на малых нагрузках, а в асинхронных генераторах возникают, кроме того, большие реактивные токи, которые необходимо компенсировать. Для исключения этого недостатка в некоторых ВЭУ применяют два генератора с номинальными мощностями ВЭУ. При слабых ветрах первый генератор отключается. В некоторых ВЭУ малый генератор обеспечивает также возможность работы установки при малых скоростях ветра при пониженных оборотах с высоким значением коэффициента использования энергии ветра» [6, 10].

«На выбор генератора ВЭУ оказывают влияние три основных фактора:

1. Выходная мощность (кВт), определяется только мощностью инвертора и не зависит от потока ветра, ёмкости аккумуляторов. Еще её называют «пиковой нагрузкой». Параметр выходной мощности определяет максимальное количество электроприборов, которые могут быть одновременно подключены к системе электроснабжения. Невозможно одновременно потреблять больше электроэнергии, чем позволяет мощность инвертора. Для увеличения выходной мощности возможно одновременное подключение нескольких инверторов» [4, 8, 10].

«2. Время безпрерывной работы при отсутствии ветра или при слабом ветре определяется ёмкостью аккумуляторной батареи (АБ) и зависит от мощности и длительности потребления. Если потребление электроэнергии происходит редко, но в больших количествах, то необходимо выбрать АБ с большой ёмкостью» [10].

«3. Скорость заряда АКБ зависит от мощности самого генератора. Также этот показатель зависит от скорости ветра, высоты мачты, рельефа местности. Чем мощнее генератор, тем быстрее будут заряжаться АБ, а это значит, что быстрее будет потребляться электроэнергия из батарей. Более мощный генератор следует брать в том случае, если ветра в месте установки слабые или потребители потребляют электроэнергию постоянно, но в небольших количествах» [10].

Одним из ограничивающих факторов в ветряных колесах является сама конструкция генератора. Среди ученых нет единого мнения относительно однозначно лучшей конструкции генераторов для ВЭУ [15-17]. Существуют три основных типа генераторов, применяемых в ВЭУ. Они могут быть использованы для различных систем ветродвигателей. Это:

- Генераторы постоянного тока;

- Синхронные генераторы;
- Асинхронные генераторы.

В принципе, каждый из конструктивных вариантов генераторов может работать при фиксированной или переменной скорости.

Сравним специфику применения указанных видов генераторов при их использовании в ветроэнергетических установках.

а) Генераторы постоянного тока

В двигателях постоянного тока поле намагничивания образуется в статорной обмотке. Ротор в данных машинах выступает как якорь. Статор имеет полюса с явным видом, возбуждающие электромагнитные полюсы с постоянными магнитами или обмотками постоянного тока. Обычно эта обмотка соединяется параллельно якорю.

При параллельном возбуждении генератора постоянного тока величина магнитного потока и тока намагничивания зависит от частоты вращения лопастей. В этом случае определяется баланс тормозного момента между фактической частотой вращения ротора постоянного тока, вызываемого ветром, и силы трения нагрузки.

Амплитуда магнитного потока уменьшается по мере увеличения нагрузки, а количество образовавшихся ЭДС уменьшается.

Еще одним важным недостатком машин постоянного тока является наличие в конструкции коллекторно-щеточного устройства. При работе генератора постоянного тока возникает необходимость постоянного технического ремонта и замены щеток. Следовательно, этот недостаток дает существенный минус для таких машин и делает их не конкурентоспособными [32].

В целом, использование таких генераторов в структуре ветровой турбины неразумно, помимо приемников малой мощности. Для примера можно привести силу для зарядного устройства или отдельную систему вентиляции.

б) синхронный генератор

Данный вид двигателя часто применяется на станциях в роли основного генератора, и особенно в ветровой установке. Главным достоинством данных машин является способность производить не только активную, но и реактивную энергию. Структура машин этого типа сконструированы различными четкими и нечеткими полюсами. Они также отличаются в системе возбуждения. Использование стимуляции от источников постоянного тока для ветровых мельниц не оптимистично. В этом случае связь будет зависеть от всех недостатков системы с контактными кольцами и устройством для передачи тока. Лучше использовать генератор со стойкими магнитами или контур бесконтактного магнитного возбуждения.

Синхронные машины на постоянных магнитах часто используются в ветровых турбинах в нынешнее время. Магнит из металла неодим который постоянный - самый мощный стабильный магнит на рынке. Так как, ветровая установка не требует возбуждения постоянного магнита. Постоянные

магниты применяются на роторе и всегда "подключены" независимо от потока ветренности. С наименьшей скоростью ветра ветроколесо начинает вырабатывать электрическую энергию и сохраняет их в емкостных батареях.

Поскольку он обеспечивает более высокую производительность за счет более высокой эффективности, есть возможность получить много мощности, конструкция крепкая и устойчивая, так как у него на роторе находятся магниты и не имеется щеток. Структура СГПМ относительно проста. «Прочные постоянные магниты установлены на роторе для создания постоянного магнитного поля, и произведенная электроэнергия берется из якоря (статора) через использование коллекторных, контактных колец. Постоянные магниты могут быть установлены в цилиндрическом роторе из литого алюминия, чтобы снизить затраты. Принцип работы генераторов на постоянных магнитах аналогичен синхронному генератору за исключением того, что генераторы на постоянных магнитах могут работать асинхронно» [35, 42]. Преимуществом СГПМ является то, что у них отсутствует коллектор, контактные кольца и щетки, поэтому машины прочны, надежны и просты.

Для непосредственного использования этих машин на ветровых электростанциях рекомендуется использовать постоянный магнит. Постоянный магнит в конструкции не создает трение, а также большой срок службы и отсутствие шума и вибрации являются достоинством во время работы ветроустановки. В этом случае синхронные генераторы с постоянными магнитами способствуют более эффективному использованию ветра.

в) асинхронный генератор

"По сравнению с генераторам с постоянными магнитами, асинхронные генераторы в конструкции простые, надежные и дешевые. Применение асинхронных машин в роли генератора (АГ) на ветряках решает эти вопросы из-за отсутствия малых конденсаторов, обеспечивающих возбуждение и восполнение генераторов с нагрузкой реактивной мощности, а также появления новой системы стабилизации напряжения с конденсаторами меньшей, чем стабилизация выходного напряжения" [36].

Этот тип генератора можно использовать только без помех высокого пускового тока и меньшим скачком напряжения оборудования. Этот генератор по себестоимости стоит меньше, чем синхронные, и имеет более высокий уровень протекции.

В различии от вида обмотки имеются короткозамкнутые и фазные. Крутящееся магнитное поле, образующееся от вспомогательной составляющей статора, индуцирует электродвигательную силу ротора, рабочая обмотка статора вращается вместе с магнитным полем ротора, вращающееся магнитное поле синхронного генератора не всегда остается неизменным и может регулироваться.

Асинхронные машины обладают низкой чувствительностью к коротким замыканиям (КЗ), но обладают хорошей степенью защиты. Низкая цена данного вида генератора вносит в его значимость хороший плюс.

Недостатки асинхронных машин:

- Для нормальной работы требуется конденсатор, так как ток намагничивания высокий;

- В экстремальных ситуациях не очень надежно эксплуатируется;

- Напряжение и частота тока прямо связаны с работой машины;

Выбор правильной схемы генератора зависит от вида связи между генератором и сетью. В случае отдельных ветрогенераторов, используемых для зарядки емкостной батареи генератором, при непосредственном подключении ветровой электростанции к электрической сети допускается использование вспомогательных не дешевых выпрямителей и выравнивателей напряжения.

Выбор типа генератора ветряка на прямую связана от типа подключаемой сети. При непосредственном включении ветрогенератора в сеть выбираются асинхронные двигатели, не требующие вспомогательных преобразователей величины тока. Это нецелесообразно в зависимости от высокой стоимости мощных выпрямителей, необходимых для преобразования постоянного на величину переменного тока [23].

В этом случае наиболее распространенными являются синхронные генераторы на постоянных магнитах при проектировании и эксплуатации электростанций, что показывает их внушительные характеристики при работе.

4.8.1 Расчет синхронного генератора с постоянными магнитами

Синхронный генератор на постоянных магнитах (СГПМ) приводится в движение от регулируемого привода с постоянной частотой вращения $n = 250$ об/мин и имеет исходные данные, взятые из технических требований выбранного ветрогенератора с таблицы 3:

- активная мощность $P = 5000$ Вт;

- напряжение на выходе $U = 220$ В;

- частота переменного напряжения $f = 50$ Гц;

- число фаз $m=1$ (с резервом перехода на $m=3$).

Главными размерами СГПМ являются внутренний диаметр D и расчетная длина l_δ . Эти параметры определяют из основного уравнения электрической машины. Машинная постоянная Арнольда:

$$C_a = \frac{D^2 l_\delta n}{P} = \frac{6,1}{a_\delta k_\phi k_0 B_\delta A}; \quad (4.21)$$

где P - расчетная мощность;

a_δ - расчетный коэффициент полюсного перекрытия $a_\delta = 0,8$;
 k_ϕ - коэффициент формы поля $k_\phi = 1,11$;
 k_0 - обмоточный коэффициент обмотки статора $k_0 = 0,92$;
 A - линейная нагрузка статора $A = 220 \cdot 10^2$ А/м;
 B_δ - максимальное значение индукции в воздушном зазоре при нормальной нагрузке $B_\delta = 0,8$ Тл.

Расчетную мощность P можно определить по формуле:

$$P = \frac{k_e P_a}{\cos \varphi}, \quad (4.22)$$

где $k_e = \frac{E_i}{U_H}$ - коэффициент, характеризующий внутреннюю ЭДС якорной обмотки, k_e принимается равным 1,2 согласно расчетным данным для СГПМ.

Главные размеры рассчитываются исходя из мощности при трехфазном питании. Рассчитаем соотношения между однофазным и трехфазным питанием:

$$P_{1\phi} = 0,7P_{3\phi}, \quad (4.23)$$

$$P_{3\phi} = \frac{P_{1\phi}}{0,7} = \frac{5000}{0,7} = 7142,8 \text{ Вт.}$$

Обычно при отстающем токе принимаем $\cos \varphi = 0,8$:

$$P_W = P = \frac{1,2 \cdot 7142,8}{0,7} = 10714,2 \text{ Вт.}$$

Значения расчетного коэффициента полюсного перекрытия зависит от числа пар полюсов p , которое определяют из соотношения:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12. \quad (4.24)$$

Между главными размерами синхронного генератора есть соотношение:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}, \quad (4.25)$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (4.26)$$

Если соединить эти соотношения (4.25) и (4.26) то получим выражение:

$$\lambda = \frac{2l_{\delta}p}{\pi D}, \quad (4.27)$$

Соотношение λ - зависит от числа пар полюсов, для выпускаемых СГПМ это значение обычно равно $\lambda = 1,5$. Тогда расчетная длина, выраженная из формулы (4.27) будет равна:

$$l_{\delta} = \frac{\lambda \pi D}{2p}, \quad (4.28)$$

Если подставить выражение (4.28) в уравнение машинной постоянной Арнольда (4.21), то получим следующее выражение:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2pP}{\lambda \pi a_{\delta} k_{\phi} k_0 B_{\delta} A n}} \quad (4.29)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 24 \cdot 10714,2}{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 220 \cdot 10^2 \cdot 0,8 \cdot 250}} = 0,4525 \text{ м.}$$

Округлим значение $D = 0,45$ м.

Рассчитаем полюсное деление по формуле (4.26):

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,45}{24} = 0,0589 \text{ м.}$$

Найдем расчетную длину статора, из выражения:

$$l_{\delta} = \lambda \tau = 1,5 \cdot 0,0589 = 0,0883 \text{ м.}$$

Округляем значение $l_{\delta} = 0,08$ м.

Главными размерами синхронного генератора на постоянных магнитах являются внутренний диаметр D и расчетная длина l_{δ} . Путем расчетов по уравнению машинной постоянной Арнольда мы получили, что внутренний диаметр $D = 0,45$ м, а расчетная длина $l_{\delta} = 0,08$ м.

4.8.2 Расчет параметров ротора для синхронного генератора

«По стандарту постоянные магниты для синхронных генераторов выпускаются призматической формы. Широкое применение нашли сборочные конструкции роторов синхронных генераторов с возбуждением от

постоянных магнитов типа «звездочка». Данная конструкция ротора типа «звездочка» содержит намагниченные в радиальном направлении постоянные магниты, которые своими внутренними торцами примыкают к магнитомягкой втулке, закрепленной на валу генератора» [27].

Для расчета ротора нам потребуется найти следующие значения выражений:

1. Воздушный зазор между статором и ротором принимаем равным $\delta = 0,6$ мм.

2. Рассчитаем наружный диаметр ротора:

$$D_p = D - 2\delta, \quad (4.30)$$

где D - внутренний диаметр генератора $D = 0,45$ м;

Подставляем в формулу и получаем, что:

$$D_p = 0,45 - 2 \cdot 0,0006 = 0,4488 \text{ м.}$$

Округлим значение $D_p = 0,45$ м.

3. Определим расчетный коэффициент полюсного перекрытия:

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - a_p}}, \quad (4.31)$$

где a_p - конструктивный коэффициент полюсного перекрытия $a_p = 0,68$

Подставляем значения и получаем:

$$a_i = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,0589}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,716$$

4. Рассчитаем ширину полюса по формуле:

$$b_M = a_p \cdot \tau, \quad (4.32)$$

$$b_M = 0,68 \cdot 0,0589 = 0,04 \text{ м.}$$

Расчетная длина ротора равна длине статора $l_M = l_\delta = 0,08$ м

Наружный диаметр ротора $D_p = 0,45$ м

Определили расчетный коэффициент полюсного перекрытия $a_i = 0,716$.

Ширина полюса $b_M = 0,04$ м

Длина ротора $l_M = 0,08$ м.

4.9 Работа редукторов в ветроустановках

«Ветер, как альтернативный источник энергии, в последнее время приобретает все большую популярность. Одними из важнейших характеристик, которые определяют ценность этого природного явления, представляют собой его направление и скорость. Но в виду непостоянства природных условий приходится прибегать к разного рода техническим приемам для устранения имеющихся проблем. Одной из таких проблем в ветроэнергетике является небольшая скорость вращения ветродвигателя, причем, чем больше габариты установки, тем сильнее проявляется этот недостаток. Решением, отчасти, может служить механический редуктор или, по-другому, мультипликаторы» [35-10].

Разделяют ВЭУ на два типа: редукторные (соединение ротора с генератором через редуктор) и безредукторные (с прямым соединением генератора и ветроколеса).

Рассмотрим достоинства редукторных ВЭУ:

- позволяют получать большие моменты на единицу массы;
- небольшая стоимость.

Недостатки:

- Низкий КПД;
- Быстро выходят из строя;
- Создают высокий уровень шума;

Достоинства безредукторных ВЭУ:

- Низкий уровень шума;
- Могут работать при малых скоростях ветрового потока;
- Долговечны в использовании;
- Конструкция позволяет избежать потерь, характерных редукторным ветроэнергетическим установкам;

Недостаток:

- Высокая цена.

Редуктор - это сложные оборудования, но суть их работы очень прост. Это система для отдачи крутящего момента и его изменения. Для изменения энергии от вращения вала в ветряках применяется передача механическим путем.

Редукторы бывают с различным типом используемой передачи:

а) Цилиндрические – самый распространенный тип редуктора за счет простоты и высокого КПД. Имеют длительный ресурс эксплуатации. Такие редукторы применяются при сложных режимах работы, для преобразования и передачи больших мощностей, эффективны при не прерывных промышленных процессах. КПД такого редуктора может достигать 98%, это зависит от его передаточного числа.

б) Червячные – редуктор называется червячным по виду червячной передачи, находящейся внутри редуктора, передающей и преобразующей крутящий момент. У таких редукторов высокое передаточное отношение, большое тепловыделение и относительно низкий КПД. При серьезных нагрузках такой тип редукторов не используется.

в) Планетарные – они имеют большую нагрузочную способность, небольшой вес, люфт и сравнительно малые габариты, а также позволяют получить большие передаточные числа.

г) Конические – этот тип редукторов применяют в том случае, если есть необходимость в изменении направления кинетической передачи. Конический редуктор имеет следующие параметры: невысокая окружная скорость, средний уровень надежности, точности и металлоемкости, сравнительно низкая себестоимость и трудоемкость. Могут непрерывно работать при высоких оборотах.

д) Комбинированные – представляют собой сочетание зубчатых (цилиндрических и конических) и червячных передач, например, коническо-цилиндрический или червячно-цилиндрический редукторы. Они имеют выгодное соотношение технических характеристик, габаритов и стоимости.

«Безредукторные ВЭУ предусматривают установку электромагнитного подвеса ротора. Это решает ряд проблем: износ рабочих поверхностей, вибрации, шумность, затраты энергии на трение, затраты на смазочные материалы.

После сравнения редукторных и безредукторных ветроэнергетических установок можно сделать вывод, что, несмотря на все свои недостатки, редукторные установки еще не скоро будут вытеснены безредукторными, но и в силу своих особенностей могут остаться конкурентоспособными еще долгое время» [9, 28, 35].

4.10 Заключение к четвертому разделу

С учетом средней скорости ветра региона номинальная мощность ветроэлектростанции для автономного питания производственного цеха составляет 16 кВт.

Площадь, занимаемая одной ветровой установкой с растяжками равна 74,7 м². Для размещения ветровой электростанции в целом понадобится 149,4 м².

Параметры ветроколеса должны быть следующими:

- Идеальная аэродинамическая мощность равна $P_A=8432$ Вт.
- Ометаемая площадь должна быть равной $S = 18,6$ м².
- Диаметр ветроколеса - $D = 5$ м.

Параметры синхронного генератора для ротора и статора:

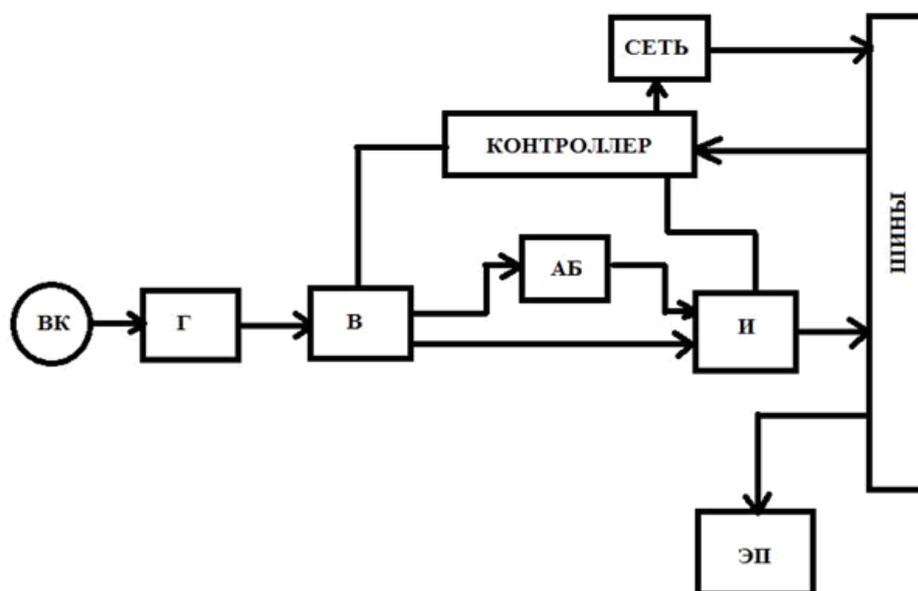
- Внутренний диаметр ротора $D = 0,45$ м;
- Расчетная длина ротора равна длине статора т.е. $l_M = l_\delta = 0,08$ м;

- Наружный диаметр ротора $D_p = 0,45$ м;
- Расчетный коэффициент полюсного перекрытия $a_i = 0,716$;
- Ширина полюса $b_M = 0,04$ м.

Перечисленным параметрам вполне соответствует ветрогенератор типа Weswen7-5000, который при среднегодовой скорости ветра, характерного для нашей области, должен вырабатывать 10000 Вт.

Для нагрузки дробильно-обогащительного цеха, равной 16кВт, предполагается установка двух ветрогенераторов.

В состав ветроэнергетической установки необходимо включить дополнительные элементы, основные из которых изображены на структурной схеме рисунка 19, системы альтернативного электроснабжения цеха.



ВК — ветроколесо; Г— генератор; В —выпрямитель; АБ — Аккумуляторные батареи; И —инвертор; К — Контроллер; С — Сеть; Ш — общие шины; ЭП — Электрический потребитель

Рисунок 19 - Структурная схема альтернативного электроснабжения объекта на основе ВЭУ

Важными конструктивными элементами, создающие преобразование механической энергии потока ветра в электрическую энергию, выступают колесо и СГПМ. Для достижения высокого качества напряжения для потребителей устанавливается управляемый инвертор. Сейчас в роли таких инверторов выступают IGBT-транзисторы. СГ и инвертор имеют неуправляемое управление для выполнения предусмотренного соединения постоянного тока. Соединяя емкостной аккумулятор, работающий от микропроцессорного контроллера, обеспечиваем должное питание потребителя в безветренные часы.

5 Технико-экономическая оценка показателей ВЭУ

5.1 Математическое моделирование ветроэлектростанции

Оценку работоспособности ВЭУ проведем, используя один из наиболее актуальных и универсальных исследовательских методов – математическое моделирование. Для реализации данного вида исследования необходимо сначала разработать модель ветроэнергетической установки, которая должна учитывать каталожные данные выбранного в главе 4 горизонтального ветрогенератора Weswen7-5000.

Дифференциальное уравнение движения ветрогенератора имеет вид [24]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_g - M_e - k_{mp}\omega, \quad (5.1)$$

где J - суммарный приведенный к валу генератора момент инерции, кг·м²;

M_g - механический момент ветроколеса, Н·м;

M_e - электромагнитный момент электрогенератора, Н·м;

ω - частота вращения вала генератора, рад·с.

Выполнив подстановку $s = \frac{d}{dt}$, запишем уравнение (5.1) в операторной форме:

$$Js\omega = M_g - M_e - k_{mp}\omega \quad (5.2)$$

Структурная схема, характеризующая рабочий процесс в электроустановке, представлена на рисунке 20.

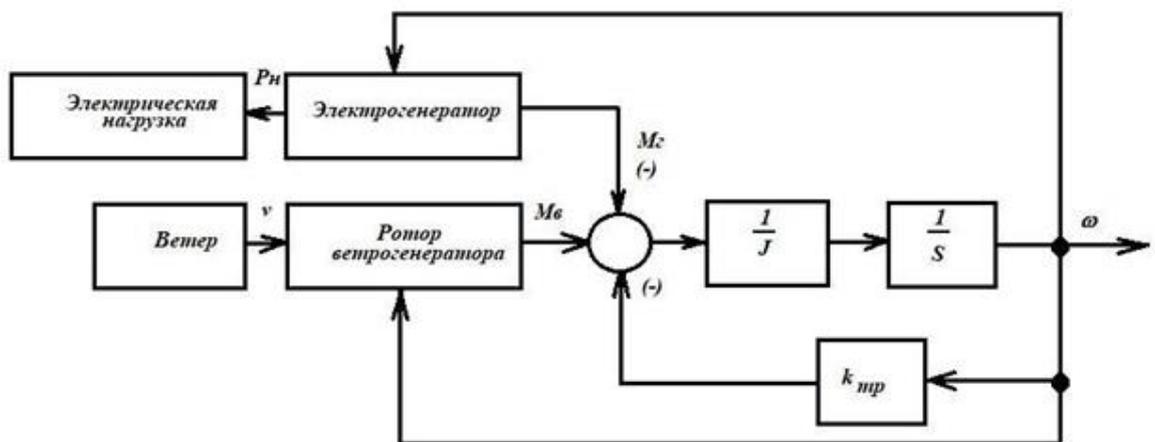


Рисунок 20 – Структурная схема ветроэнергетической установки

Найдем передаточную функцию для механической части ветрогенератора:

$$\frac{\omega(s)}{M_{\text{рез}} s} = \frac{1 J s}{1 + k_{\text{тр}} \cdot 1 J s'} \quad (5.3)$$

где $M_{\text{рез}} s = M_{\text{в}} - M_{\text{г}}$ - результирующий момент на валу электрогенератора, создаваемый от вращения ветроколеса и действием электромагнитного момента синхронного генератора.

Умножим числитель и знаменатель выражения (5.3) на $J s$, получим следующее выражение:

$$\frac{\omega(s)}{M_{\text{рез}} s} = \frac{1 J s}{1 + k_{\text{тр}} \cdot 1 J s} = \frac{1}{J s + k_{\text{тр}}}, \quad (5.4)$$

Вынесем коэффициент в знаменателе за скобку $k_{\text{тр}}$, получим следующее выражение для передаточной функции $\frac{\omega(s)}{M_{\text{рез}} s}$:

$$\frac{\omega(s)}{M_{\text{рез}} s} = \frac{1 k_{\text{тр}}}{T_{\text{мех}} + 1}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{мех}} = \frac{J}{k_{\text{тр}}}$ - постоянная времени механической части ветрогенератора.

Отразим введенные упрощения на структурной схеме в виде рисунка 21.

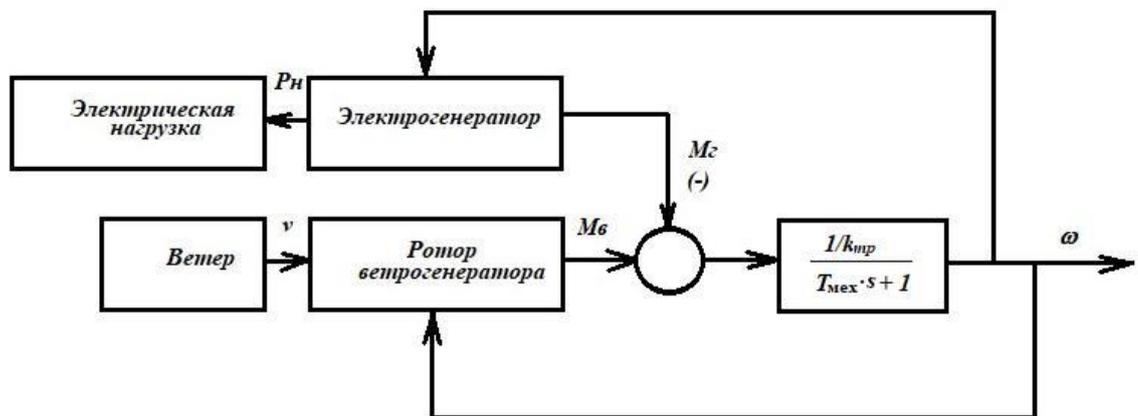


Рисунок 21 – Структурная схема ветроэнергетической установки с упрощением механической части

Положительный механический момент, создаваемый ветряным колесом, зависит от его радиуса (R), плотности воздуха (ρ) и скорости ветра (v):

$$M_B = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_p \quad (5.6)$$

В данную формулу входит коэффициент мощности ветрового колеса C_p , величина которого нелинейно связана с такими коэффициентами, как быстроходность (λ) и угол атаки лопастей (β) [20].

Из паспортных данных ветрогенератора известны:

- коэффициент использования мощности равен $C_p = 0,4$;
- радиус ветрового колеса $R = 3,2$ м;
- номинальная скорость вращения $\omega = 25,12$ рад/с (240 об/мин);
- максимальная скорость ветра $v = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
- плотность воздуха $\rho = 1,25$ кг/м³.

Выполнив подстановку указанных параметров в формулу (5.3) получаем значение двигательного момента на валу электрогенератора:

$$M_B = 24,69 \cdot v^2 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.7)$$

Суммарный момент инерции равен сумме моментов инерции вала генератора и ветрового колеса. Поскольку диаметр ветрового колеса существенно превышает диаметр ротора электрогенератора, то при моделировании будем использовать только значение момента инерции ветрового колеса:

$$J = \frac{G \cdot D^2}{12} = \frac{2 \cdot 6,4^2}{12} = 6,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 \quad (5.8)$$

Коэффициент трения составляет 2-5% от номинальной мощности ветроэнергетической установки, что приблизительно равно

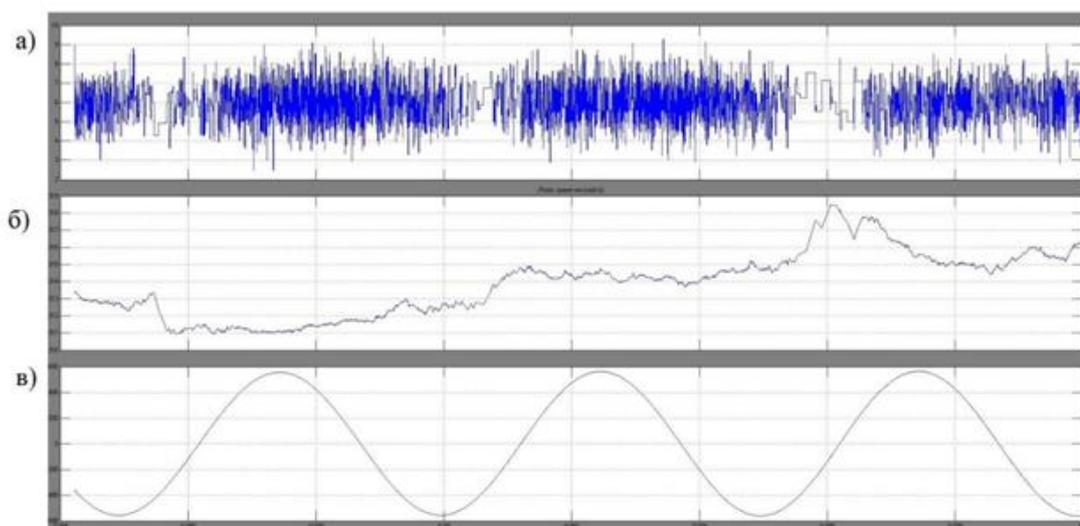
$$k_{\text{тр}} \approx 0,02 \cdot P_{\text{ном}} = 0,038 \cdot 5 = 0,019 \quad (5.9)$$

Модель будем создавать в приложении Simulink программы Matlab.

1. Для моделирования ветра будем использовать генератор нормально-распределенных случайных величин. Среднее значение случайной последовательности соответствует средней годовой скорости ветра на территории фабрики (6 м/с).

2. Для имитации генератора и нагрузки будем использовать виртуальные блоки этих элементов из библиотеки SimPawerSystem.

Результаты моделирования показаны на рисунке 22.



а – скорость ветра, б – скорость вращения вала синхронного генератора,
в – генерируемое напряжение

Рисунок 22 – Результаты моделирования

Как видно из графиков, скорость вращения электрогенератора меняется в соответствии с изменением скорости ветра. Этот результат соответствует реальности. Поэтому данная модель может применяться в качестве основы для решения более сложных задач. Например, ее можно использовать при проектировании контура стабилизации частоты вращения электрогенератора ω .

В приложении А показана схема разработанной модели.

На приведенной виртуальной схеме выделены следующие структурные части:

- а – электрогенератор и нагрузка; б – ветер;
- в – ветроколесо; г – механическая часть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По программе энергосбережения в производственном масштабе потребление электричества из основной энергосистемы должна быть оптимизировано. В этих целях в данной работе было предложено применить автономное, альтернативное так и резервное электроснабжение непосредственно с применением ВИЭ.

2. Был сделан выбор и расчет рассчитываемого дробильно-обоготительного цеха, которая в свою очередь потребляет пиковую мощность равной 155000 Вт в день, и значение электрической энергии используемая за один час равна 16786 Вт*ч.

3. По анализу и вычисленным данным для снабжения цеха электрической энергии выбрали конкретную модель ветровой установки с горизонтальной осью вращения, имеющая хорошую эффективность чем вертикально-осевой формы вращения.

4. Было подтверждено, для выбранного типа ветрогенератора применить электрогенератор с магнитной постоянной синхронного вида с редуктором повышения.

5. Доказано, с учетом всех выше перечисленных анализов использовать пару ветроустановок модели Weswen7-5000, которые по параметрам удовлетворят нормированные требования, а также выступят как качественный источник энергии для энергоснабжения цеха.

6. Был разработан математический образ ветроэнерго установки содержащий в себе синхронный генератор виртуального типа в программном приложении Matlab библиотеки SimPowerSystems, являющийся частью блоков Simulink, который будет учитывать характеристику выбранной ветровой установки Weswen7-5000W, а также имитировать процессы механической части ветрогенератора и движения потока ветра. Данную модель ветроэлектро установки можно использовать как автономный, аварийный и резервный источник питания для отдельных и отдаленных от энергосистем потребителей горной промышленности, также с помощью данной математической модели дать решение другим сложным задачам.

7. Цель магистерской диссертации была достигнута.

Заключения в пунктах 1) и 3) описывают практическую значимость работы.

Заключение в пункте 6) характеризует новизну проделанной работы.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ, ТЕРМИНОВ

ВИЭ - возобновляемые источники энергии
ВЭС - ветроэлектростанция
ПРООН - программа развития Организации Объединенных Наций
ВЭУ - ветроэлектростанция
КПД - коэффициент полезного действия
АКБ - аккумуляторная батарея
ГОСТ - государственный стандарт
ШИМ - широтно-импульсная модуляция
АВР - автоматическое включение резерва
ЭДС - электродвижущая сила
СГПМ - синхронный генератор с постоянными магнитами
АГ - асинхронный генератор
СГ - синхронный генератор
КЗ - короткое замыкание
ВК - ветроколесо
ЭП - электроприемник

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия «Казахстан-2050»: новый курс состоявшегося государства, Послание президента Р.К. –лидера нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана, г. Астана, 14.02.2012.
2. Национальная Программа развития ветроэнергетики в Республике Казахстан до 2015г с перспективой до 2024г - Проект ПРООН «Казахстан-инициатива развития рынка-ветроэнергии», Алматы- Астана 2007г.
3. Сценарий развития направления «Безопасная, чистая и эффективная энергетика» в Казахстане до 2030 года. [http:// www.ncste.kz/sites/default/files/](http://www.ncste.kz/sites/default/files/).
4. Statistical Review of World Energy June 2014.xlsx//BP: Energy economics. [http:// www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview).
5. www.atlas.windenergy.kz - Веб-версия Ветрового Атласа Казахстана.
6. Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. Саратов : Профобразование, 2017. 144 с.
7. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия. Ветроэнергетика. Харьков : ХАИ, 2014. 158 с.
8. Научный журнал Куб ГАУ [Электронный ресурс] // интернет-сайт URL: <http://ej.kubagro.ru/> (дата обращения: 16.04.2020)
9. Безруких П. П. Ветроэнергетика : справочное и методическое пособие. М. : ИД «ЭНЕРГИЯ», 2015. 320 с.
10. Безруких, П. П. Ветроэнергетика. М. : Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
11. Безруких, П. П. Ветроэнергетика. М. : Энергия, 2014. 665 с.
12. Бурмистров А. А., Виссарионнов В. И., Дерюгина Г. В. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии : учеб. пособие. М. : МЭИ, 2009. 144 с.
13. Бубенчиков А. А., Артамонова Е. Ю., Дайчман Р. А., Файфер Л. А., Катеров Ф. В., Бубенчикова Т. В. Применение ветроколес и генераторов для ветроэнергетических установок малой мощности // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 5–2 (36). С. 35–39.
14. Архив фактической погоды [Электронный ресурс] // интернет-сайт URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda/> (дата обращения: 01.05.2020)
15. Прогноз погоды [Электронный ресурс] // интернет-сайт URL: https://rp5.ru/Погода_в_Карагандинской_области/ (дата обращения: 04.05.2020)
16. Бальзанников М. И. Эколого-экономическое обоснование эффективности гидроаккумулирующих ветровых электростанций // Экономика и управление собственностью. 2015. № 1. С. 68–72.
17. Бубенчиков А. А., Артамонова Е. Ю., Дайчман Р. А., Файфер Л. А., Катеров Ф. В., Бубенчикова А. А. Применение ветроэнергетических установок с концентраторами ветровой энергии в регионах с малой ветровой нагрузкой // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 5–2 (36). С. 31–35.

18. Иванов В. М. Электроснабжение и энергосбережение с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 2 (19). С. 88–93.
19. Jean-Luc Menet, Nachida Bourabas. Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation [Text] / Jean-Luc Menet // *popularmechanics*. 2014. URL: http://educyclopedia.karadimov.info/library/23_1400_jeanlucmenet_01.pdf/ (дата обращения: 12.05.20)
20. Jeff Whalley, Matt Johnson, Brian MacMillin. Effect of Turbulence on Savonius Rotor Efficiency [Text] / Jeff Whalley // *lux review*. 2016. URL: [http://www.me.rochester.edu/courses/ME241.gans/SavoniusRotors\(7\).pdf/](http://www.me.rochester.edu/courses/ME241.gans/SavoniusRotors(7).pdf/) (дата обращения: 11.05.20)
21. Mahmoud N. H., El-Haroun A. A., Wahba E. An experimental study on improvement of Savonius rotor performance [Text] / Mahmoud N. H. // *Atlantalightbulbs*. 2016. URL: http://ac.els-cdn.com/S111001681200049X/1-s2.0-S111001681200049X-main.pdf?_tid=f77caf3a-951f-11e6-809500000aab0f01&acdnat=1476787701_e632ae06184035ad9b52d9db13533db3/ (дата обращения: 11.05.20)
22. Rogowski K, Maronsky R. CFD computation of the Savonius rotor / Rogowski K // *Journal of Theoretical and Applied Mechenics*. 2018. PP. 43-53. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/> (дата обращения: 06.06.2020)
23. Simonds M.H., Bodek A. Perfomence Test of Savonius rotor [Text] / Simonds M.H.//*Atlantalightbulbs*. 2016. URL: http://www.pssurvival.com/ps/Windmills/Performance_Test_Of_A_Savonius_Rotor_1964.pdf/ (дата обращения: 12.05.20)
24. Пронин, Н. В. Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете matlab // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. № 37. С. 143–145.
25. Жолудева Ю. К., Мальцев М. В. Математическая модель ветрогенератора // *Научный альманах*. 2017. №4-3(30). С. 63 – 67. Амерханов Р. А., Бессараб А. С., Драганов Б. Х., Рудобашта С. П.,
26. Шишко Г. Г. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства. М.: Колос-Пресс, 2014. 424 с.
27. Федоренко В. Ф., Сорокин Н. Т., Буклагин Д. С. Инновационное развитие альтернативной энергетики. М. : ФГНУ « Росинфорагротех», 2016. 348 с.
28. Christian Bussar, Melchior Moos, Ricardo Alvarez, Philipp Wolf et al, Optimal allocation and capacity of energy storage systems in a future European power system with 100% renewable energy generation // *Energy Procedia*. 2014. № 46. PP. 40 – 47.
29. William F. Pickard, Amy Q. Shen, Nicholas J. Hansing, Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources// *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. № 13. PP. 1934.

30. Jami Hossain, A case study of high wind penetration in the Tami l Nadu Electricity Utility, Energy policy August 2014. PP. 868–874.
31. Andreev V.M., Zabrodsky A.G., Kognovitsky S.O. Integrated power plant with an energy storage on the basis of the hydrogen cycle // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology.2017. №2 (46). PP. 99–105.
32. Bryce S. Richards, Gavin L. Park, Thomas Pietzsch, Andrea I. Schafer. Renewable energy powered membrane technology: Brackish water desalination system operated using real wind fluctuations and energy buffering, //Journal of Membrane Science. 2014. № 468. PP. 224 – 232.
33. Обухов С. Г. Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор/ Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. №3. 88 с.
34. Лакутин Б. В., Сурков М. А., Нетрадиционные способы производства электроэнергии : учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2018. 193с.
35. Лакутин Б. В. Возобновляемые источники энергии //Электронное учебное пособие.2015. №1. С 16–20. URL: <https://ses.susu.ru/wp-content/uploads/2017/09/Кирпичникова-И.М.и-др.-Возобновляемые-источники-энергии-13.03.02.pdf/> (дата обращения: 13.05.2020)
36. Безруких П. П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России // СПб.: Наука.2015. 314с.
37. Альтернативная энергетика как фактор модернизации российской экономики. Тенденции и перспективы : сб. науч. тр. / В. Н. Борисов, И. А. Буданов, И. Л. Владимирова [и др.] ; под ред. Б. Н. Порфирьев. М. : Научный консультант, 2016. 212 с.
38. Янсон, Р. А. Ветроустановки : учеб. пособие. М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2017. 37 с.
39. Ветрогенераторы горизонтально-осевые серия «Condor Air» (мощность от 10 до 60 кВт) Руководство пользователя [Электронный ресурс] //интернет-сайт. URL: <http://docplayer.ru/54793519-Vetrogenerator-y-gorizont-alno-osev-y-e-seriya-condor-air-moshchnost-ot-10-do-60-kvt-rukovodstvo-polzovatelya.html/> (дата обращения 15.0.20)
40. Елистратов В. В. Ветроэнергоустановки. Автономные ветроустановки и комплексы : учеб. пособие. СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. 101 с.
41. Литвинова В. С. Разработка низкооборотного электрического генератора на неодимовых магнитах для малой ветроэнергетики // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 4-2(50). С. 103–107.

Приложение А - Модель ветроэнергетической установки в приложении Simulink программы Matlab

