

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование)

11.04.04 Электроника и наноэлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Анализ режимов работы полупроводникового преобразователя в ветроэнергетической установке»

Студент

Д.О. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Е.С. Глибин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

| | |
|---|-----|
| Введение..... | 3 |
| 1 Особенности работы и устройства ветроэнергетических установок | 6 |
| 1.1 Актуальность использования ветрогенераторов как источника электроэнергии | 6 |
| 1.2 Анализ конструкций ветрогенераторов основных типов | 11 |
| 1.3 Классификация ветроэнергетических установок..... | 26 |
| 1.4 Системы управления ветрогенераторов | 35 |
| 2 Разбор системы моделирования Simulink..... | 45 |
| 2.1 Анализ возможностей библиотек Simulink | 45 |
| 2.2 Система моделирования SimPowerSystem | 69 |
| 3 Моделирование и анализ режимов работы полупроводникового преобразователя..... | 74 |
| 3.1 Описание схемы полупроводникового преобразователя | 74 |
| 3.2 Анализ режимов работы полупроводникового преобразователя | 79 |
| Заключение | 88 |
| Список используемой литературы и источников | 94 |
| Приложение А Особенности аэродинамики, регулирования и систем передачи мощности ветродвигателей классифицируемых ВЭУ | 100 |

Введение

На альтернативные источники энергии в настоящее время всё больше специалистов из разных областей обращают пристальное внимание. Это связано с тем, что традиционные источники энергии имеют конечное итоговое количество и несут огромный вред для экологической среды. Одним из самых перспективных и быстроразвивающихся направлений в нетрадиционной энергетике, является ветроэнергетика. Так только в 2010 году общая мощность ветроэнергетических установок в мире составила 197 ГВт, этого хватило бы для покрытия 2.5% спроса на электроэнергию. В 2020 году суммарная мощность уже составила внушительные 744 ГВт, что в свою очередь хватит для покрытия потребностей 7% потребителей в мире. И с каждым годом эта цифра будет всё сильнее увеличиваться из-за серьёзных государственных инвестиций в эту область ведущих стран. Скандинавские страны, такие как Дания, Швеция, Норвегия используют активно шельфовые ветроэнергетические электростанции в виду своего географического расположения, что в итоге позволяет вырабатывать значительную часть электроэнергии в этих странах (в 2015 году Дания выработала 42% от всего энергопотребления в стране с помощью ветроэнергетики). Поэтому неудивительно что, например в Германии в 2020 году ветряные и солнечные электростанции выработали больше электроэнергии, чем электростанции использующие традиционные источники энергии и число таких стран со временем будет только расти.

Производство электроэнергии в основном на электростанциях осуществляется с помощью ископаемых источников энергии, на которые постоянно растёт цена, поэтому увеличивается и стоимость на неё. Поэтому всё более актуальным становится применение частных автономных ветроэнергетических установок. Такие установки как правило небольшой мощности до 20кВт, могут бесперебойно вырабатывать электроэнергию в

течение всего года, при условии верного места расположения такого агрегата. Подобные устройства включают в себя сам ветрогенератор с механической частью, который использует кинетическую энергию воздушных масс, преобразуя сначала в механическую, а потом в электрическую. В период отсутствия ветра, когда выпадают безветренные дни используются блоки с аккумуляторными батареями как резерв электроэнергии. Одним из наиболее важных элементов в таких системах является инвертор. Его задача, сделать напряжение сетевым 220В, 50Гц синусоидальной формы. От его работы зависит очень многое и выход из строя может привести самым разным последствиям. Сам преобразователь работает в трёх основных режимах работы: максимальной, номинальной и пиковой мощности. В режиме пиковой мощности прибор должен в течении короткого промежутка выдержать двух кратное повышение мощности. Номинальный режим – работа на номинальную мощность в течение продолжительного промежутка времени пока не выйдет из строя. И режим максимальной мощности подразумевает работу устройства в течение часа на мощность, превышающую его номинал более чем на 30%. В большинстве случаев подобные приборы имеют встроенную защиту, которая гарантирует в случае аварии его отключение. Подобная промоделированная схема может использоваться в простых ветроэнергетических системах для обеспечения нагрузки небольшой мощности (до 100 - 300 Вт).

Таким образом, основной проблемой исследования является выбор оптимальной и простой схемы преобразователя с необходимыми параметрами, чтобы отвечала базовым техническим требованиям и которую можно использовать в автономной ветроэнергетической системе.

Целью магистерской диссертации является разработка математической модели, наглядно демонстрирующей режимы работы полупроводникового преобразователя, который можно использовать в автономной ветроэнергетической системе.

Практической значимостью будет являться, то что данные могут использоваться другими людьми в качестве теоретической информации для дальнейших работ при выборе или создании подобных устройств.

Новизна работы будет состоять в том, что будет разработана математическая модель простого инвертора для ветрогенератора в среде моделирования Tina TI при использовании библиотек аналоговых элементов которая наглядно покажет его работу в 3 ключевых режимах работы.

1 Особенности работы и устройства ветроэнергетических установок

1.1 Актуальность использования ветрогенераторов как источника электроэнергии

Поиск всё новых источников экологически безопасной или «чистой» электроэнергии является на сегодняшний день одним из ключевых вопросов в мире. Традиционные источники электроэнергии, которыми является древесный уголь, нефть, древесина, торф и т.д., имеют конечные запасы и в итоге рано или поздно кончатся. Использование таких видов топлива наносит разного характера ущерб экологии, отравляя воздух выбросами с промышленных предприятий, воду (в особенности при авариях на нефтедобывающих заводах или буровых вышках) и флору с фауной.

Применение как альтернативы ядерного топлива (урана или плутония), частично решает этот вопрос, уровень выброса вредных веществ с таких электростанций значительно ниже, чем, например с угольных. Однако результат аварии на атомной электростанции гораздо страшнее, чем на той же угольной (можно вспомнить взрыв на Чернобыльской АЭС в 1986 году, когда авария привела к колоссальным экологическим последствиям на многие десятилетия или авария на АЭС в префектуре Фукусима в 2011 году, что тоже привело к большим экологическим последствиям), помимо этого большая проблема с утилизацией радиоактивных отходов, которые со временем тоже становятся опасными. Особенно такие места являются желанной целью для террористических атак, что в итоге может привести к очень негативным последствиям в случае успеха. Очевидно, необходимость поиска других, более экологически безопасных источников энергии.

Использование технологий по освоению возобновляемых или альтернативных источников энергии считается перспективным направлением. К таким источникам относят энергию ветра, воды, солнца, геотермального тепла, которые теоретически являются неисчерпаемыми.

Энергия ветра считается одним из самых перспективных источников в альтернативной энергетике. Такой источник энергии практически повсеместен и доступен, а его общий потенциал оценивается во внушительные 170 трлн кВт·ч в год. Ветроэнергетика в последние десятилетия бурно развивается, так в 2010 году общая мощность всех ветроэнергетических станций составляла примерно 197 ГВт. В 2020 году общая мощность установок составила уже целых 744 ГВт. С 2010 года активно ветроэнергетические мощности стал наращивать Китай, который сейчас является мировым лидером по этому показателю. На 2019 год по общей мощности работы ветрогенераторов можно выделить 5 стран: Китай, США, Германия, Индия и Испания, на их долю приходится 72% всех мощностей в мире (рис 1.1).



Рисунок 1.1 – Диаграмма ведущих стран по мощности работающих ветрогенераторов

А в 2020 году Китай ввёл в эксплуатацию рекордные 52 тыс. МВт (это больше чем суммарные мощности всех стран в мире), дальше 16,2 тыс. МВт США, далее Бразилия 2,3 тыс. МВт, Нидерланды 2 тыс. МВт, Германия 1,6 тыс. МВт, но 5 лидеров стран не изменилась. Такие результаты достигаются ещё и за счёт больших инвестиций в отрасль как со стороны правительства, так и крупных предприятий и инвесторов. В Европе за 2018 год вложения составили 65 млрд. евро и цифры с каждым годом будут только увеличиваться. Лидерами по выработке произведённой в стране электроэнергии ветроэнергетическими установками в Европе стали Дания 48%, Ирландия 33%, Португалия 27%, Германия 26% и Великобритания 22%. Больше 66% всех ветроэнергетических мощностей Европы составили: Германия 61 ГВт, Испания 26 ГВт, Великобритания 24 ГВт, Франция 17 ГВт, Италия 11 ГВт.

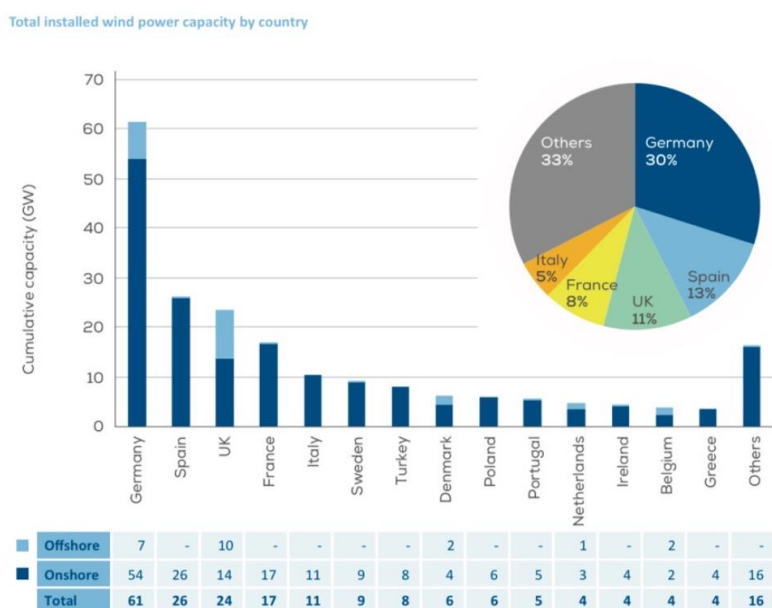


Рисунок 1.2 – Общая мощность ветроэнергетических установок стран Европы в 2019 году

Некоторые страны ввиду своего удачного географического расположения в основном для выработки электроэнергии используют

шельфовые ветроэнергетические станции. Такие станции более эффективны в выработке электроэнергии в отличие от тех, что расположены на земле, в виду того с моря или океана дует более постоянный и сильный ветер. На территориях таких стран как Германия, Дания, Великобритания, Швеция, Голландия, Бельгия Финляндия, Норвегия, Ирландия располагаются десятки таких электростанций, а Англия здесь является лидером по объёму ветроэнергетических ресурсов шельфовой зоны Европы (около 30%). В Дании правительство планирует довести потребление электроэнергии в стране от шельфовых ВЭС до 50%. Общий потенциал прибрежных электростанций в мире составляет 100 ГВт к 2030 году. На рисунке 1.3 изобразим пример такой электростанции, находящейся в Великобритании.



Рисунок 1.3 - Шельфовая электростанция Sheringham Shoal, Великобритания

Россия не является передовой страной в мире по развитию ветроэнергетической отрасли, однако в последние годы активно наращивает мощности (сейчас реализуются 20 проектов общей мощностью 4 ГВт и будут представлены ещё 24). Наша страна из-за большой площади имеет самый большой потенциал ветровой энергии в мире и оценивается в 50000 млрд. кВт·ч в год. Так в 2019 году мощность электростанций в нашей стране

составила 190,5 МВт. Наиболее перспективными считаются места, где среднегодовая скорость ветра больше 6 м/с: Камчатский полуостров, Сахалин, Северные области страны, Прикаспийские области на юге, Прибайкальские области на Алтае, Кольский полуостров и Прибалтика и др. На рисунке 1.4 приведём карту, показывающую среднегодовую скорость ветра в стране.

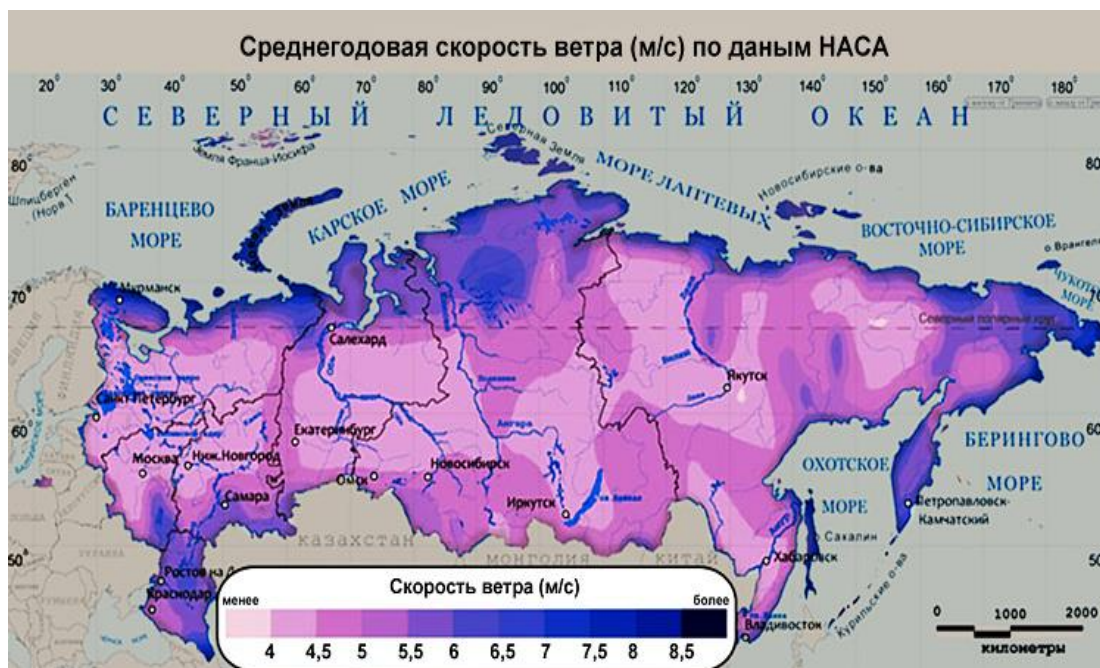


Рисунок 1.4 – Среднегодовая скорость ветра в России по данным НАСА

Несмотря на рост ветроэнергетических мощностей в нашей стране, замена традиционной энергетике на альтернативную в ближайшем будущем не предвидится, как например в ряде стран Европы. Традиционная электроэнергетика будет ещё долгое время доминировать, однако определённый прогресс всё же наблюдается не только в нашей стране, но и во всём мире. Рано или поздно практически полный переход на возобновляемые ресурсы неизбежен, это лишь только вопрос времени.

1.2 Анализ конструкций ветрогенераторов основных типов

Ветрогенератор или ветроэнергетическая установка (ВЭУ) представляет из себя устройство, которое способно преобразовать кинетическую энергию движения воздушных масс, сначала в механическую энергию за счёт передачи вращательной энергии редуктора на ротор, а затем в электрическую при помощи электрогенератора. На сегодняшний день существует два основных типа конструкций ВЭУ для выработки электроэнергии (рис. 1.2.1):

1. Горизонтально-осевые – у таких установок ось вращения расположена перпендикулярно, относительно земной поверхности;
2. Вертикально-осевые – у таких установок ось вращения располагается параллельно относительно земли.

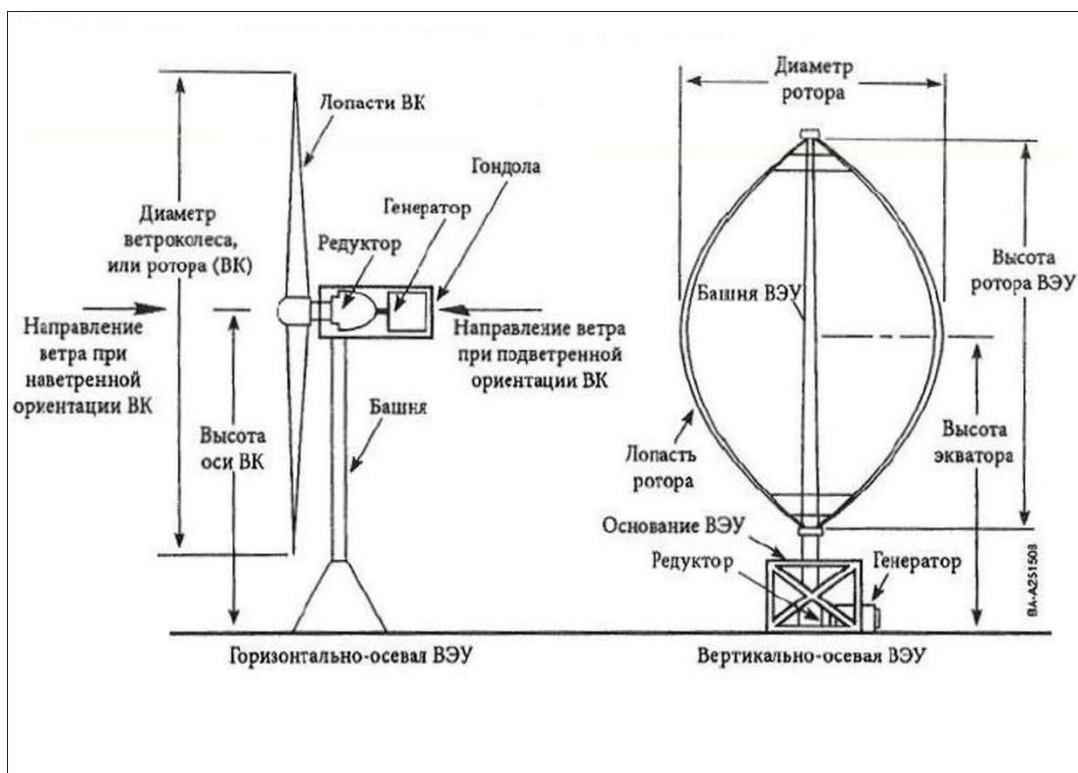


Рисунок 1.2.1 – Конструктивная схема ветрогенераторов основных типов

У ветрогенератора с вертикальной осью вращения принцип работы, следующий: как видно из рисунка выше сначала с наветренной стороны воздушный поток, который под определённым углом атакует лопасти ротора (2-5 градусов). Сам поток создаёт напор на лопасти, перпендикулярно которому действует подъёмная сила, обеспечивающая их вращение и направление вращения. Так наилучшие аэродинамические показатели достигаются, если угол атаки имеет значение «быстроходности» равным 5, позволяя снизить потери и увеличить КПД установки. Если это значение выше, то скорость оборотов растёт, но при этом увеличивается вибрация установки, меньше, то теряем скорости, но выигрываем в стабильности работы. Затем вращательное движение передаётся с ротора на редуктор, который повышает его частоту вращения для работы электрогенератора. Далее приходит в работу сам генератор, например, асинхронный с коротко замкнутым ротором, параметры которого зависят напрямую от параметров ветроколеса. Такой генератор может работать как постоянной скорости, так и по переменной, во втором случае более выгодней из-за меньших нагрузок на трансмиссию и лопасти турбины. Потом он преобразует механическую энергию в электрическую переменного тока, который потом понижается и выпрямляется для зарядки АКБ или преобразуется и подаётся в сеть. Гондола, корпус, содержащий полностью электромеханическую часть ветрогенератора. На ней обычно располагается флюгер, который способствует её ориентации по ветру. Анемометр, располагается на флюгере и отвечает за сбор аэродинамических данных, которые потом передаются на контролер. Сама гондола закрепляется на мачте определённой высоты, на которой скорость ветра будет наиболее оптимальной 6 м/с. У такого типа ветрогенераторов ветроколесо может быть:

1. Однолопастным – ротор с одной лишь лопастью вращения, имеет как правило высокий показатель быстроходности;

2. Двухлопастным – ротор с двумя лопастями вращения, имеет хорошие показатели КПД и экономической стоимости;
3. Трёхлопастным – ротор с тремя лопастями вращения наиболее сбалансированный вариант по соотношению КПД и надёжности;
4. Многолопастным – ротор имеет более 3 лопастей и низкий показатель быстроходности, что вызывает большой инерционный момент.

Однолопастные ветрогенераторы имеют единственную лопасть вращения на роторе, совмещённую с противовесом для стабилизации работы при высоких оборотах из-за гироскопического эффекта, который стремится отклонить винт. Такие устройства имеют высокий показатель быстроходности равный 9 и как следствие низкий инерционный момент. Этот фактор позволяет применять с асинхронными и синхронными генераторами с большими оборотами вращения, что положительно влияет на массогабаритные показатели ветряка. Скорость оборотов может достигать при скорости ветра в 9 м/с целых 774 оборота в секунду, что намного больше, чем у трёхлопастного – 478 м/с и работать такой ветрогенератор может при более слабом ветре. Однако такие ветрогенераторы имеют некоторые существенные недостатки, которые не позволяют их широко применять (рис 1.2.2):

1. Высокий гироскопический эффект, из-за которого оказывается повышенная нагрузка на механическую часть устройства, что приводит к преждевременному изнашиванию;
2. Требуется обязательно точная балансировка, в противном случае будут сильные вибрации и биения из-за дисбаланса устройства;
3. При работе такие ветряки более опасные из-за высокой силы удара.



Рисунок 1.2.2 – Модель однолопастного ветрогенератора компании «Электроветер»

Двухлопастные ветрогенераторы имеют две лопасти вращения и характеризуются уравновешенностью, стабильностью работы ротора и низким инерционным моментом. У таких ветряков показатель быстроходности равен 6, что позволяет работать на высоких оборотах (около 700 м/с) и использовать в конструкции генераторы с высокой частотой вращения. Одним из весомых плюсов таких установок, это удобство ремонта и монтажа, так как при подъёме и опускании на землю ротора его лопасти будут стремиться занять горизонтальное положение. Также стоит отметить довольно невысокий уровень аэродинамического шума и конечную стоимость устройства за счёт экономии материалов конструкции. Однако такие ветрогенераторы имеют определённые недостатки, которые не дают их широко использовать в работе (рис 1.2.3):

1. По причине высокой скорости вращения возникают вибрации, что приводит к износу механических компонентов как в однолопастных ветрогенераторах;

2. Повышенный уровень шумность установки.



Двухлопастная ВЭУ, модель Gev MP, мощностью 275 кВт, Vergnet S.A.

Рисунок 1.2.3 – Модель двухлопастного ветрогенератора мощностью 275кВт

Трёхлопастные ветрогенераторы имеют 3 лопасти вращения, отличаются плавностью хода, сбалансированностью конструкции, оптимальным коэффициентом быстроходности равным 5 и инерционным моментом, а также надёжностью конструкции. Такие устройства получили самое широкое распространение среди остальных ветрогенераторов в мировой ветроэнергетике. Мощность таких установок может составлять от нескольких ватт до 7 мВт и более, что позволяет их использовать в крупных ветроэнергетических станциях. Также такая конструктивная особенность считается наилучшей с точки зрения вариативности, можно использовать много разных конструкций. У подобных ветрогенераторов хороший КПД в среднем равный 0,4, что является весомым аргументом для их применения. Однако у таких агрегатов есть определённые недостатки (рис 1.2.4):

1. Повышенный уровень аэродинамического шума, что может привести к неудобствам, если ветряк расположен вблизи;
2. Сложность монтажа таких устройств при поломках, в особенности промышленных ветрогенераторов;
3. Опасность для пролетающих птиц и как результат для самого ветрогенератора;
4. Сильнее подвержены грозам и молниям ветрогенераторы промышленного типа из-за большой высоты конструкций.



Рисунок 1.2.4 – Модель трёхлопастного ветрогенератора Enercon e-126 мощностью 7,58 МВт

Многолопастные ветрогенераторы имеют более 3 лопастей вращения (от 3 до 50), отличаются высоким инерционным моментом, низкими скоростями вращения и коэффициентом быстроходности равным 3 (если лопастей 10). Обуславливается это тем, что из-за большого количества

лопастей на них оказывается большее аэродинамическое сопротивление и потери складываются, а обороты падают. Так у 6 лопастного ветряка скорость оборотов будет в двое меньше, по сравнению с 3 лопастным на небольших скоростях ветра. Такие устройства тихходные, поэтому генератор в них имеет больше обмотки и магнитов, что в итоге сказывается на конечном весе и его стоимости. Широкое применение они получили в ветронасосных системах, например для откачки воды из глубоких колодцев из-за своих конструктивных особенностей. Ниже приведём основные недостатки таких ветрогенераторов (рис 1.2.5):

1. Высокая стоимость подобных агрегатов из-за их конструкции;
2. Низкий КПД в следствии малой эффективности использования ветрового потока;
3. Дороговизна ремонта при поломках;
4. Хуже реагирует на изменение ветра.



Рисунок 1.2.5 – Модель многолопастного ветрогенератора AWG 5000
фирмы АРЕКОМ

У ветрогенераторов с вертикальной осью вращения (рис 1.2.1) следующий принцип работы: набегающий воздушный поток оказывает давление на симметричные лопасти ротора в результате чего возникает аэродинамическая подъёмная сила и происходит вращение. Наиболее распространёнными типами роторов является конструкция Дарье и её разновидности, которые рассмотрим ниже. Далее вращательный момент передаётся с помощью вала на редуктор, который повышает крутящий момент для работы электрогенератора. Сам генератор начинает вырабатывать электроэнергию и может использоваться для пуска лопастей ротора, который самостоятельно не может запускаться (если их меньше 3) или применяется конструкция с ротором Савониуса. Потом эта электроэнергия преобразуется и поступает на АКБ. Растяжки в таких ветрогенераторах нужны для надёжного крепления устройства на месте. ВЭУ с ротором Дарье стоит на опорной раме, где и располагается вся электромеханическая часть. В силу своей конструкции подобные устройства имеют меньший КПД по сравнению с вертикально-осевыми порядка 20-30%, что и обуславливает применяемость ветрогенераторов первого типа. Однако в 2010 году было проведено подробное исследование в Новосибирском РАН, где было доказано, что в идеале КПД таких ветрогенераторов равно 72%, но лучшие современные конструкции не достигают и близко этого значения. Коэффициент быстроходности у таких устройств низкий реактивной силы. Подробнее рассмотрим основные виды роторов, использующихся в данной конструкции:

1. Ротор типа Дарье;
2. Ротор Савониуса, модификация 1 вида;
3. Геликоидный ротор или турбина Горлова;
4. Ротор Н типа или ортогональный ротор;
5. Многолопастной ротор.

1) Ветрогенератор с ротором типа Дарье имеет две или три лопасти не имеющие характерного аэродинамического профиля. Такое устройство не требует ориентации на ветер, так как всегда вращается в одну и ту же сторону. У лопастей подъёмная сила будет максимальной в момент пересечения лопасти, у которой скорость воздушного потока наивысшая. Такой ротор обладает плохим самозапуском, так как для возникновения подъёмной силы необходимо движение лопастей. Поэтому для этого необходим стартер (ротор Савониуса) или генератор, который даст запуск вращения. У таких ВЭУ низкий коэффициент использования ветра, КПД (15%) и быстроходность. Всё основное оборудование расположено внизу, что упрощает монтаж и ремонт установки. Но подобная конструкция ВЭУ имеет следующие недостатки (рис.1.2.6):

1. Низкий КПД;
2. Необходимость минимальной скорости ветра не менее 4 м/с для раскрутки ветроколеса;
3. Высокая динамическая нагрузка на механические элементы;
4. Высокий уровень акустического шума.



Рисунок 1.2.6 – Ветрогенератор с ротором типа Дарье

2) Ветрогенератор с ротором Савониуса представляет дополнительную модификацию ветрогенератора предыдущего типа. Такой ротор имеет несколько полуцилиндрических тонко изогнутых лопастей прямоугольной формы. Ветер, набегая на лопасть создаёт на вогнутой и выгнутой её части аэродинамическое давление, а лопасть сопротивляется ему, в силу этого и создаётся вращательный момент. Данная конструкция является популярной из-за простоты изготовления, оптимального пускового момента, работе при малых скоростях ветра, габаритами, надёжностью и низким уровнем акустического шума. Подобные ВЭУ тихоходные, у них низкий коэффициент использования ветра 0,18-0,24 и поэтому невысокий КПД 17-18%. Мощность таких агрегатов в силу конструктивных особенностей небольшая 5 кВт. Поэтому применение данного решения не целесообразно экономически и технически из-за чего они имеют относительно невысокую популярность. Основные минусы ветрогенераторов с ротором Савониуса (рис.1.2.7) следующие:

1. Небольшой КПД 17-18%;
2. Невысокая мощность, не получится использовать в промышленных масштабах;
3. Высокая стоимость материалов конструкции.

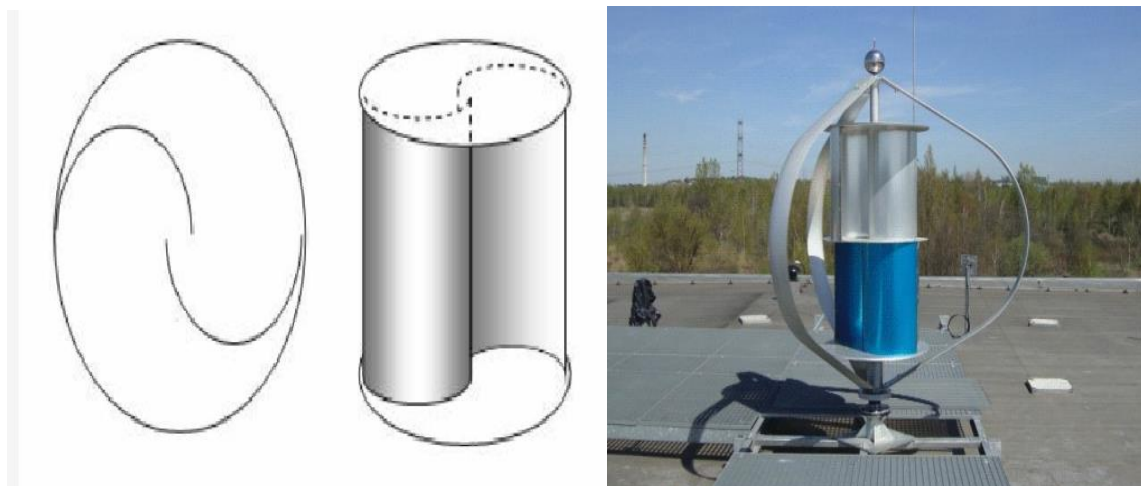


Рисунок 1.2.7 – Ветрогенератор с ротором Савониуса

3) Ветрогенератор с геликоидным ротором является также модификацией ротора Дарье. В такой конструкции у ротора есть 3 лопасти, имеющие характерный аэродинамический профиль, набегающий ветровой поток оказывает давление на вогнутую часть профиля крыла больше, чем на выгнутую, так и создаётся подъёмная сила. Закрутка лопастей влияет сильно на равномерность, плавность и скорость набора вращения вдоль несущей оси. Также это положительно влияет на эксплуатационные возможности конструкции, динамические нагрузки на опорные узлы сильно уменьшаются. Подобные турбины быстроходные (коэффициент больше 3) и в следствии этого у них хороший КПД 38%. Но процесс изготовления лопастей сложный и трудоёмкий, что сильно сказывается на стоимости и ремонте устройств. Геликоидные ветрогенераторы имеют следующие весомые недостатки (рис 1.2.8):

1. Повышенный уровень шума и инфразвука из-за особенностей конструкции лопастей;
2. Высокая стоимость турбины из-за сложности изготовления винтов;
3. Небольшая мощность из-за конструктивных особенностей устройства.

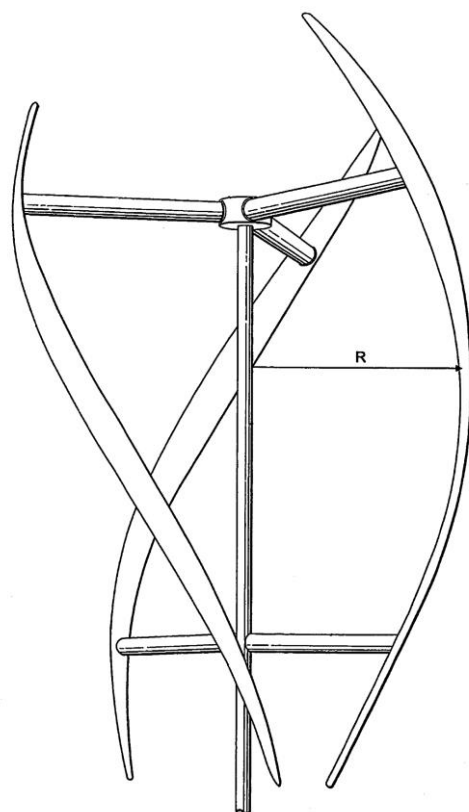


Рисунок 1.2.8 – Ветрогенератор с геликоидным ротором

4) Ветрогенератор с ортогональным или Н типа ротором является разновидностью ротора Дарье. Принцип работы подобных устройств похож на предыдущие, на каждое крыло оказывается давление воздушным потоком, в силу конструкции крыла на его переднюю часть оно больше, чем на заднюю. Поэтому в результате этой разницы возникает подъёмная сила на нём, а потом также поочерёдно и на остальных, происходит постоянное вращение. Такие установки быстроходные (коэффициент больше 3), имеют хороший КПД 38% и высокую эффективность использования ветра. У них пониженный уровень акустического шума и отсутствие инфразвука. Конструкция прочная (зачастую ставят дополнительные рёбра жёсткости) и относительно простая (лопасти располагаются на одной оси вращения, а оборудование внизу устройства). Однако подобные решения имеют следующие недостатки (рис 1.2.9):

1. Большие динамические нагрузки на опорные узлы, в следствии чего меньше их срок службы;

2. Высокие массо-габаритные показатели.



Рисунок 1.2.9 – Ветрогенератор с ротором Дарье ортогонального типа

5) Ветрогенератор с многолопастным ротором это разновидность ветряка предыдущего типа. Исходя из конструктивных особенностей можно сказать, что подобное решение имеет следующие отличия: добавляется дополнительный ряд лопастей для того, чтобы преобразовать воздушный поток а именно усилить его и направить в необходимом направлении. Далее такой воздушный поток с большой скоростью попадает на второй ряд, который начинает вращаться и вырабатывать электроэнергию . Так такие ветрогенераторы из-за высокого количества лопастей имеют высокий процент использования энергии ветра, высокий КПД и могут работать при невысоких скоростях ветра. Однако у них есть следующие недостатки (рис 1.2.10):

1. Высокая стоимость из-за большого количества элементов;

2. Повышенный уровень акустического шума, что может негативно сказываться на людях и животных, так как в основном такие второгенераторы используются в частных энергосистемах.

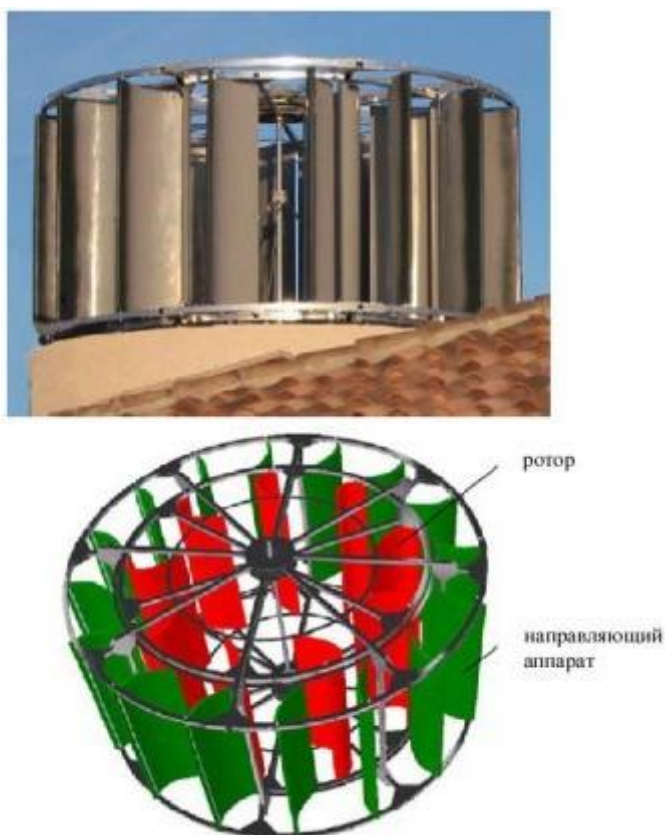


Рисунок 1.2.10 – Ветрогенератор с ротором многолопастного типа

Были рассмотрены основные типы конструкций ветрогенераторов, которые имеют разные преимущества и недостатки и каждый из них занимает свою нишу на рынке ветроэнергетики. Есть сегодня и другие конструкции таких устройств, некоторые из которых совсем новые разработки, а другие носят «экзотичекий» характер. Возможно в будущем они займут свою долю на рынке и станут популярными, вытеснив существующие, а может и нет. Фактом остаётся то, что горизонтально-осевые агрегаты являются наиболее распространёнными в мире из-за соотношения цена-производительность и широко применяются в промышленных ветряных электростанциях. Новые разработки по

оптимизации существующих конструкций позволяют выжать из них максимум возможной производительности, стараясь не повысить стоимость конечного продукта. Подобные изыскания будут и дальше продолжаться, поскольку это экономически выгодно, до тех пока не будет найдено более прогрессивное, новое конструктивное решение.

1.3 Классификация ветроэнергетических установок

Любой ветрогенератор или ветроэнергетическую установку классифицируют по ряду следующих признаков (приложение А):

1. По виду вырабатываемой электроэнергии – так если устройство стоит, например, в ветронасосной системе, то такой ВЭУ вырабатывает механическую энергию для откачки воды. Если же агрегат производит электрическую энергию и отдаёт её в сеть, то это электрический ВЭУ, который бывает переменного и постоянного тока.
2. По мощности – какую максимальную мощность может выработать ветроустановка и отдать в сеть. Ниже перечислим четыре основные группы:
 - большой мощности (мегаватники) – более 1 МВт, такие ветроустановки только горизонтально-осевого типа, которые объединяют вместе, так создаются высокомошные ветряные электростанции. К примеру ВЭУ «Enercon E-126» производит 7МВт энергии, а диаметр лопастей достигает 126 метров;
 - средней мощности – от 100 кВт до 1 МВт, здесь применяются ветроустановки в основном горизонтально-осевого типа, которые могут обеспечить, например, промышленный цех, небольшой посёлок или ферму. Подобные устройства довольно выгодно использовать, так как они не требуют серьёзных технических и экономических затрат;
 - малой мощности – от 5 до 99 кВт, тут могут использоваться ветроустановки обоих типов для обеспечения электроэнергией небольших зданий (коттеджей, частных

домов, дач), маленьких посёлков и т.д., и не требуют существенных трудозатрат, а также больших экономических затрат;

– очень малой мощности – менее 5 кВт, могут применяться ВЭУ обоих типов и подходят для снабжения потребителей, использующих небольшую нагрузку или соизмеримых по мощности электроприборов и как правило являются самыми дешёвыми.

3. По областям применения – у механических ветрогенераторов это ветронасосные и ветросиловые системы, например, в сельском хозяйстве. Электрические агрегаты применяются в энергетических системах, например, в промышленности.
4. По назначению – используются как источник электрической энергии (установленной, максимальной и номинальной) для снабжения потребителей.
5. По признаку работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса – при переменной частоте ВЭУ позволяет обеспечить наилучшую выработку электроэнергии в силу конструктивных особенностей устройства. Если частота постоянная то агрегат имеет упрощённую конструкцию и сниженную выработку электроэнергии из-за диапазона работы устройства.
6. По способам управления – в основном все ветрогенераторы управляются с помощью полупроводникового преобразователя (инвертора напряжения или частоты), который со стороны генератора позволяет управлять частотой и амплитудой напряжения на статоре, а это позволяет управлять скоростью вращения ветроколеса.
7. По структуре системы генерирования энергии – генерация осуществляется с помощью электрического генератора

(синхронный или асинхронный), например, конструкция с синхронным генератором с постоянными магнитами или асинхронным генератором с коротко замкнутым ротором.

Приведём основные данные по электрическим и механическим ВЭУ далее.

Таблица 1 – Классификация механических ВЭУ по областям применения

| Наименование подгруппы | Признак | Область применения | Применяемая система | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|---------------------|--|-------------------|--|---|---|
| | | | Регулирование ВК | | Передачи мощности | Нагрузки | Автоматического управления | |
| | | | Параметры | Тип | | | | |
| Ветронасосные | Работа ВЭУ с насосами | Водоснабжение, орошение, осушение земель, подъём воды и т.д. | Частота Вращения ВК | Прямое центробежное - поворотом лопастей. Прямое аэродинамическое - выводом ВК из под ветра | Пневматическая | Насосы: центробежные, струйные и эрлифты | Залив центробежных насосов. Контроль уровня заполнения водой резервных ёмкостей | |
| | | | | | Электрическая | | | Насосы: центробежные, вибрационные, водо-струйные, погруженные и плавающие на понтоне |
| | | | | | Механическая | | | |

Окончание таблицы 1

| Наименование подгруппы | Признак | Область применения | Применяемая система | | | | |
|------------------------|---|--|---------------------|---|--|----------------|----------------------------|
| | | | Регулирование ВК | | Передачи мощности | Нагрузки | Автоматического управления |
| | | | Параметры | Тип | | | |
| Ветросиловые | Работа ветрогенератора с промышленными и бытовыми механизмами | Механизация трудоёмких процессов сельскохозяйственных и других работ | Частота Вращения ВК | Прямое центробежное - поворотом лопастей. Прямое аэродинамическое - выводом ВК из под ветра. Непрямое центробежно-аэродинамическое - поворотом лопастей стабилизаторами | Механическая с отбором мощности от нижнего редуктора | Рабочие машины | |

Электрические ВЭУ постоянного тока подразделяют на три подгруппы: ветрозарядные, гарантированного питания и негарантированного питания согласно таблице 2.

Таблица 2 – Классификация электрических ВЭУ постоянного тока по областям применения

| Наименование подгруппы | Признак | Область применения | Применяемая система | | | | |
|--------------------------|---|--|---------------------|--|--|---|--|
| | | | Регулирование ВК | | Передачи мощности | Нагрузки | Автоматического управления |
| | | | Параметры | Тип | | | |
| Ветрозарядные | Работа ВЭУ на заряд аккумуляторных батарей (АБ) | Зарядка АБ | Частота Вращения ВК | Прямое центробежное - поворотом лопастей. Прямое аэродинамическое - выводом ВК из под ветра. | ВК устанавливаются непосредственно на вал генератора, применение мультипликатора | Нагрузка питается от АБ | Защита АБ от перезарядки и глубокого разряда |
| Гарантированного питания | Работа ветрогенератора параллельно с АБ | Гарантированное снабжение электроэнергией потребителей | Частота вращения ВК | Прямое центробежное - поворотом лопастей. Прямое аэродинамическое - выводом ВК из под ветра. | ВК устанавливаются непосредственно на вал генератора | Нагрузка питается одновременно или раздельно от двух источников электроэнергии: ВК и АБ | Параллельная работа ВЭУ и АБ. Защита АБ от перезарядки и глубокого разряда |

Окончание таблицы 2

| Наименование подгруппы | Признак | Область применения | Применяемая система | | | | |
|----------------------------|--------------------|--|---------------------|--|--|--|---|
| | | | Регулирование ВК | | Передачи мощности | Нагрузки | Автоматического управления |
| | | | Параметры | Тип | | | |
| Негарантированного питания | Работа ВЭУ без АКБ | Электропитание маломощных потребителей в местах с устойчивыми ветрами и в экстремальных условиях | Частота Вращения ВК | Прямое центробежное - поворотом лопастей. Прямое аэродинамическое - выводом ВК из под ветра. | ВК устанавливаются непосредственно на вал генератора | Нагрузка питается от через блок управления, имеющий регулятор напряжения | Регулятор напряжения, защита от токов короткого замыкания |

6 Электрические ВЭУ переменного тока подразделяют по назначению, управлению и структуре системы генерирования энергии согласно таблице 3.

Таблица 3 – Классификация электрических ВЭУ переменного тока по назначению, управлению и структуре системы генерирования энергии

| Наименование подгруппы | Классификация по назначению | | Классификация по способу управления | | Классификация по структуре системы генерирования | |
|------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
| | Признак | Назначение | Признак режима работы ВЭУ | Способ управления | Признак режима работы ВЭУ | Состав системы генерирования энергии |
| Автономные | Работа ветрогенератора индивидуально | Источники электропитания потребителей, | Частота | | Частота | Синхронные или асинхронные, |

Продолжение таблицы 3

| Наименование подгруппы | Классификация по назначению | | Классификация по способу управления | | Классификация по структуре системы генерирования | |
|------------------------|---|--|-------------------------------------|--|--|--|
| | Признак | Назначение | Признак режима работы ВЭУ | Способ управления | Признак режима работы ВЭУ | Состав системы генерирования энергии |
| | (автономно) | не связанные с электрической сетью, отличающиеся сравнительно низкими значениями коэффициента использования установленной мощности | Вращения ВК постоянная | Регулирование ВК и балластным сопротивлением (раздельно или совместно) | вращения ВК постоянная | регулируемые или нерегулируемые генераторы, балластное сопротивление |
| | | | частота вращения ВК переменная | Регулированием ВК и преобразователем частоты (раздельно или совместно) | Частота вращения ВК переменная | Синхронные или асинхронные регулируемые или нерегулируемые генераторы, преобразователь частоты |
| Гибридные | Работа ветрогенератора параллельно с независимыми электрос- | Источники электропитания для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией | Частота Вращения ВК постоянная | Совместным или раздельным регулированием параллельно работающих электростанций | Частота вращения ВК постоянная | Синхронный генератор |
| | | | Частота вращения ВК переменная | Совместным регулированием параллельно работающих | Частота вращения ВК переменная | Синхронный генератор и преобразователь частоты или машина |

Окончание таблицы 3

| Наименование подгруппы | Классификация по назначению | | Классификация по способу управления | | Классификация по структуре системы генерирования | |
|------------------------|---|---|-------------------------------------|---|--|--|
| | Признак | Назначение | Признак режима работы ВЭУ | Способ управления | Признак режима работы ВЭУ | Состав системы генерирования энергии |
| | | | | электростанций и преобразователей частоты | | двойного питания |
| Сетевые | Работа ветрогенератора параллельно с мощной электрической сетью | Источники получения и выдачи электрическую сеть максимально возможной выработанной электроэнергии | Вращения ВК постоянная | Регулированием ВК | вращения ВК постоянная | Синхронный или асинхронный генератор |
| | | | частота вращения ВК переменная | Регулированием ВК и преобразователем частоты (совместно или отдельно) | Частота вращения ВК переменная | Асинхронный генератор и преобразователь частоты или синхронный генератор и преобразователь частоты или машина двойного питания |

Были рассмотрены основные характерные признаки классификации ветрогенераторов. Так по мощности, самыми применяемыми являются устройства средней и большой мощности. Из последних создаются самые крупные ветряные электростанции, которые могут вырабатывать несколько ГВт электроэнергии, однако это сопрягается с рядом сложностей, таких как установка, высокая стоимость, ремонт и эксплуатация. Низкомощные ВЭУ пользуются популярностью в частных или загородных домах (в основном это

автономные и гибридные). В зависимости от выходной мощности бывают разные способы управления и системы питания, которые подходят под тот или иной случай их применения.

1.4 Системы управления ветрогенераторов

Выбор системы управления ВЭУ сегодня является основополагающим аспектом при проектировании любого ветряка и сильно влияющим на его производительность. Такая система реализуется при помощи инвертора (напряжения или частоты), который и осуществляет регулирование устройством. Его наличие в схеме позволяет существенно оптимизировать и согласовать режимы работы механической и электрической частей, а именно скорость вращения лопастей, нагрузку на лопасти, скорость ветрового потока и т.д. Немаловажную роль в общей эффективности системы играет и выбор генератора, который участвует в выработке электроэнергии. Можно выделить три основные структуры управления ВЭУ:

1. ВЭУ с неконтролируемой скоростью вращения ротора;
2. ВЭУ с контролируемой скоростью вращения и полупроводниковым преобразователем в цепи статора;
3. ВЭУ с машиной двойного питания.

В первом случае такие ветрогенераторы изначально в ранних этапах своего развития были наиболее распространёнными. Принцип работы таких устройств следующий: механическая энергия с трансмиссии передаётся на асинхронный генератор с коротко замкнутым ротором, а статор подключается к обмоткам понижающего трансформатора. Такое подключение обеспечивает большие пусковые токи (превышающие норму в 5-7 раз) что довольно плохо. Поэтому, чтобы такого избежать монтируют перед генератором устройство плавного пуска, которое их значительно снижает. Также не хорошо и то, что статор забирает из сети реактивную мощность (до 30%) от номинала. Для устранения подобной проблемы подключают параллельно ему блок конденсаторов, которые уменьшают потери в цепи статора, сводя их к минимуму. Далее полученное напряжение понижается с помощью трансформатора, делая его сетевым и отдавая его по

линиям передачи потребителям. У подобного решения существенным недостатком является невозможность управления ветроколесом. Следственно это негативно сказывается на КПД ветроустановки, оно не высокое. Так самый лучший режим работы подобного устройства достигается при оптимальном соотношении скорости вращения ротора и скорости воздуха. Тут стоит отметить, что в виду конструкции, уровень вырабатываемой энергии зависит от погодных условий, а именно от постоянства скорости ветра, если его нет то происходит значительное колебание мощности в системе электроснабжения, что может привести к негативным последствиям. Ещё одним недостатком является сильная нагрузка на силовые и механические части ветрогенератора, что приводит к их преждевременному износу. На рисунке 1.4.1 изобразим подобную схему устройства:

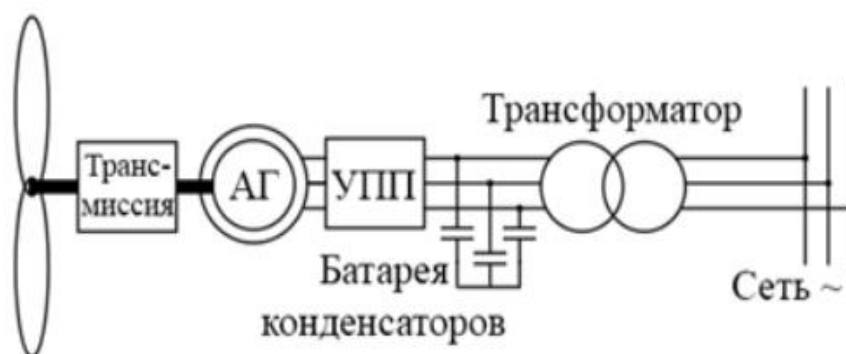


Рисунок 1.4.1 – Схема ветрогенератора с неуправляемой скоростью вращения ротора

Вторая структура представляет собой существенную модернизацию предыдущего типа в 1980-х гг., когда широкое распространение в ветроэнергетике стали получать силовые полупроводниковые преобразователи. Принцип работы системы следующий: механическая энергия с трансмиссии передаётся на вал генератора (синхронного или асинхронного), который через статор подключается к силовому полупроводниковому преобразователю. Можно отметить, что если

используется конструкция с синхронным генератором на постоянных магнитах, то данное решение может предложить отличную эффективность и уменьшить затраты на обслуживание ввиду своего устройства. Это также позволяет упростить конструкцию (можно убрать трансмиссию, если устройство имеет большое число пар полюсов). Сам преобразователь выполняется на IGBT транзисторах или тиристорах и представляет из себя инвертор напряжения (АС-АС) со звеном постоянного тока. Он преобразует напряжение с генератора, дела его сетевым, а активный L-С фильтр уменьшает пульсации на выходе. Такое устройство позволяет в отличие от предыдущей схемы, позволяет регулировать скоростью вращения генератора и соответственно ротора ВК, изменяя частоту и напряжение на его обмотках, что в итоге позволяет увеличить КПД установки. Недостатком такой конструкции является их относительно высокая стоимость преобразователей и потери на переключениях силовых ключей. На рисунке 1.4.2 приведём схематическое изображение такого устройства:

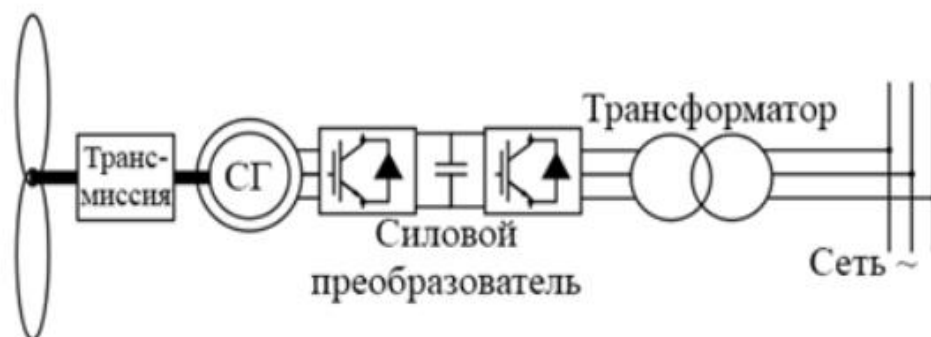


Рисунок 1.4.2 – Схема ВЭУ с контролируемой скоростью вращения ротора

Следующая конструкция это относительно недавняя разработка, где используется другое устройство асинхронного генератора с фазным ротором у которого главной особенностью является отдельное питание обмоток статора и ротора(отсюда и название – машина двойного питания). Принцип работы следующий: механическая энергия через трансмиссию или

передаточный механизм передаётся с вала ротора на вал генератора. В нём статор подсоединяется напрямую к коллекторной системе ветрогенератора, а ротор соединяется с полупроводниковым преобразователем (инвертор напряжения). Сам инвертор подключается к обмоткам трёхфазного понижающего трансформатора. Энергия с помощью инвертора преобразуется, делая его сетевым и отдаётся потребителям. Номинальная мощность такого устройства составляет 25-30% от номинальной мощности генератора. Поэтому главным преимуществом подобной системы является то что ротор может поддерживать только 25-30% от номинальной мощности, следовательно это снижает массо-габаритные показатели ветрогенератора, потери на преклечение силовых ключей, тепловые потери из-за снижения общей его мощности. Активная и реактивная мощность в генераторе управляется независимо. Недостатками подобной системы является наличие скользящих контактов для передачи тока на ротор и «качание ротора» как и других подобных генераторов. На рисунке 1.4.3 изобразим схематическое изображение подобного конструктивного решения:

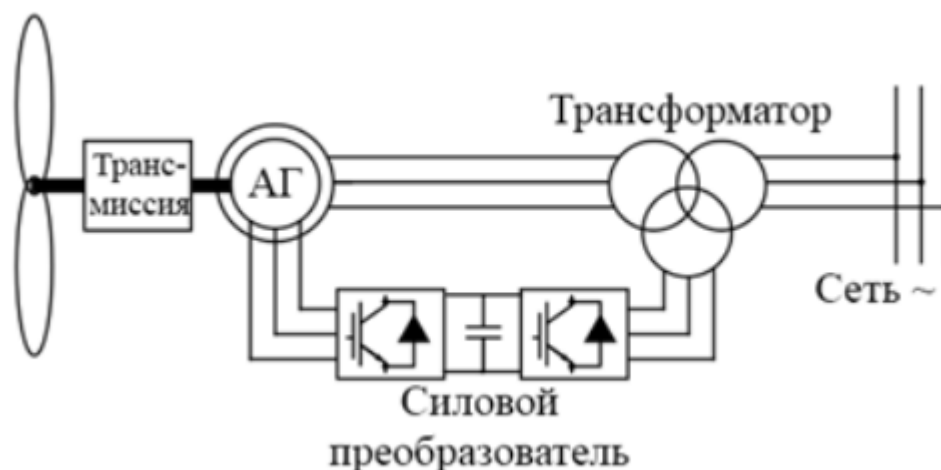


Рисунок 1.4.3 – Схема ВЭУ с машиной двойного питания

В качестве примера можно привести одну из схем управления ветроэнергетической установки. У неё есть два основных параметра управления:

1. Угловой скоростью вращения ротора
2. Стабилизацией скорости вращения ветроколеса

Такое управление позволяет значительно оптимизировать работу устройства. Также важно учитывать при разработке подобных решений механические нагрузки, возможность аварийного отключения генератора, частоту вращения и другие. На рисунке 1.4.4 приведём приблизительную структурную схему такого решения:

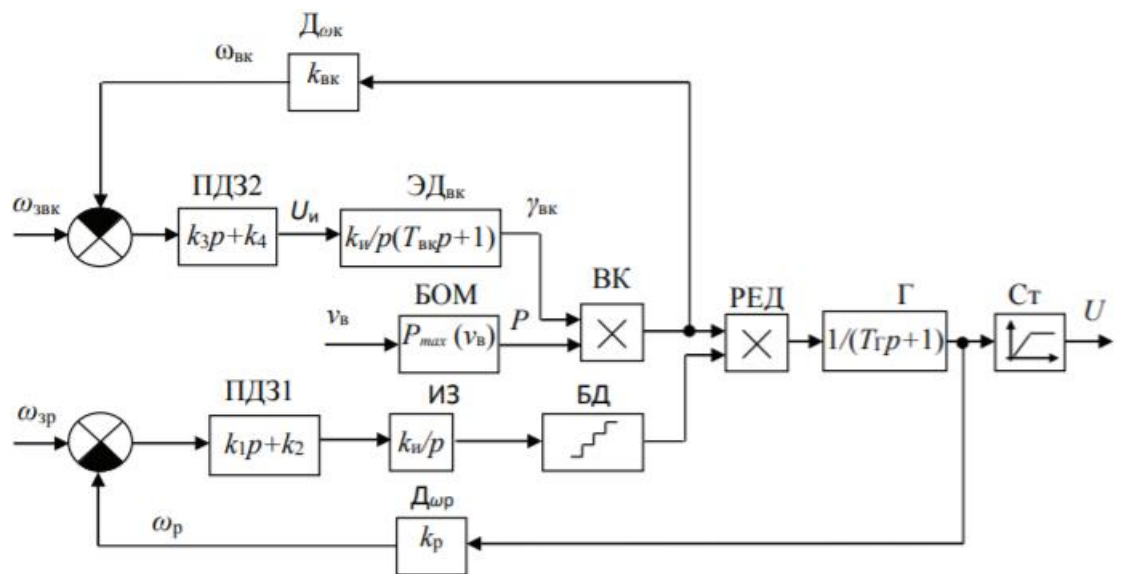


Рисунок 1.4.4 – Схема управления ветроэнергетической установкой. На рисунке обозначены следующие обозначения:

$\omega_{звк}$ – заданная угловая скорость;

$\omega_{зр}$ – заданная угловая скорость редуктора;

$\omega_{вк}$ – угловая скорость вращения ветроколеса;

$\omega_{р}$ – угловая скорость вращения ротора;

ПДЗ2 и ПДЗ1 – пропорционально дифференцирующие звенья;

БД – блок дискретизации;
ИЗ – интегрирующее звено;
РЕД - редуктор генератора;
СТ – стабилизатор;
ВК – ветроколесо;
БОМ – блок по определению максимальной мощности ветроколеса;
 $\text{ЭД}_{\text{вк}}$ – электродвигатель поворота ветроколеса;
 $\text{Д}\omega_{\text{к}}$ – датчик угловой скорости ветроколеса;
Г – генератор;
 $\text{Д}\omega_{\text{р}}$ – датчик угловой скорости вращения ротора;
 $U_{\text{и}}$ – напряжение инвертора;
 $v_{\text{в}}$ – скорость ветра;
 $P_{\text{max}}(v_{\text{в}})$ – блок определения максимальной мощности ветроколеса;
р- оператор Лапласа;
 $\gamma_{\text{вк}}$ – угол поворота ветроколеса;
Р – мощность ветра;
U – напряжение на выходе.

Работает такое устройство примерно следующим образом: есть два основных задающих параметра – скорость вращения ротора и ветроколеса. В первом контуре пропорционально дифференцирующее звено форсирует управляющий процесс, а интегрирующее – придаёт ему апериодические свойства переходному процессу. $\text{Д}\omega_{\text{к}}$ это цифровой датчик отвечающий за показания угловой скорости вращения ротора, в то время как дискретный блок делает сигнал необходимым для управления редуктором. Сам редуктор это исполнительный механизм регулирующий ротор, а блок генератора симулирует его работу. Другой контур описывает процесс по регулированию угла поворота роторных лопастей при разных скоростях воздушного потока. Он включает в себя пропорционально дифференцирующее звено 2, которое форсирует процессы в этом контуре. Звено электродвигателя по повороту

лопастей моделирует его работу, а другой блок - $P_{\max}(v_B)$, отвечает за преобразование скорости ветрового потока в мощность. Следующий блок перемножает эти значения и отображает работу ветроколеса. Соответственно его работу и показывают следующие параметры - $\gamma_{вк}$ и v_B , которые необходимо поддерживать на заданном уровне. А k_p генератора необходима для получения угловой скорости ветра и выходного напряжения. На выходе обоих котуров блок СТ нужен, чтобы стабилизировать выходное напряжение.

Были рассмотрены основные схемы управления ветрогенератором, которые так или иначе используются в современной ветроэнергетике. Стоит отметить, что схема на основе машины двойного питания имеет самое широкое распространение среди других из-за своих ключевых преимуществ – пониженной конечной стоимости продукта и его рабочих особенностей. Они используются в ветряных станциях большой мощности от 1 МВт в горизонтально-осевых конструкциях. При проектировании подобных схем надо соблюдать ряд требований таких как – автоматическую защиту и пуск в работу, ограничение и регулирование частоты вращения ветроколеса, автоматически ориентироваться по направлению ветра и автоматизацию рабочего процесса и другие. В таком случае можно получить безопасный и оптимальный по рабочим характеристикам продукт.

Выводы по первому разделу

Использование в течение продолжительного временного отрезка традиционных источников энергии привело большому количеству экологических проблем, которые требуют комплексного решения. Одним из таких вариантов решения является использование вместо них альтернативных (возобновляемых) источников энергии, которые считаются экологически чистыми и неисчерпаемыми. На сегодняшний день огромное количество стран инвестируют огромные средства на развитие «зелёной энергетики», которые не только приносят прибыль, но и служат хорошим источником электроэнергии. Так в 2015 году уже альтернативные источники энергии перебили рост традиционной и было введено в эксплуатацию ветроэлектростанций суммарной мощностью 63 ГВт и 50 ГВт солнечных электростанций, а общая установленная мощность составила 433 и 227 ГВт из них целых 144 и 45 в Китае, который признан мировым лидером по её выработке. А такие европейские страны как Дания, Германия или Испания являются лидерами по «покрытию» расходов на электроэнергию за счёт использования ветряных станций (40% и более процентов в отдельные дни). В нашей стране тоже активно развивается данное направление и наращиваются мощности (введено уже более 70 МВт) и эта цифра будет только расти, так как есть определённый план проектов, который реализуется в ближайшее время. Однако отставание от ведущих стран всё же довольно существенное, несмотря на огромный потенциал территории страны.

Ветроэнергетические установки или станции позволяют как раз справиться с поставленными задачами по выработке электроэнергии, преобразуя энергию ветра в электрическую. На сегодняшний день используются два основных типа ВЭУ: вертикально-осевые и горизонтально-осевые. Первый тип устройств не нашёл широкого использования в мощных электростанциях ввиду своего конструктивного устройства, высокой стоимости, сложности изготовления некоторых ветрогенераторов и т.д. Но такие решения всё же занимают свою нишу на рынке и применяются для

электроснабжения отдельных потребителей небольшой мощности. Вторым типом устройств используются в ветряных станциях большой мощности. Оптимальным служит конструкция трёхлопастного агрегата, потому что у него высокий КПД, оптимальный коэффициент быстроходности, устройство позволяет использовать различные типы генераторов необходимой мощности, что в итоге допускает делать их большой мощности. В основном большие средства вкладываются в поиск решений, чтобы выжать из этой конструкции максимум производительности, что положительно скажется на общей производительности, но и стоит отметить, что ведутся активные поиски других более выгодных и производительных решений, которые в будущем могут прийти им на смену.

Как и практически любое другое устройство ветрогенераторы имеют свою классификацию, ряд признаков по которым можно их описать. По виду вырабатываемой энергии бывают механические и электрические. Механические имеют менее широкий спектр применения, чем электрические и служат как устройством для использования по откачке воды из глубинных колодцев или в сельскохозяйственных работах. Такое применение обуславливает конструктивной особенностью подобных устройств. А электрические наиболее применяемые на сегодняшний день. Их широко применяют в ветроэнергетических системах для электроснабжения разного рода потребителей. По мощности выделяют установки, очень малой мощности, малой мощности, средней и большой мощности. Наиболее используемые это агрегаты средней и большой мощности, где их эксплуатируют в промышленности для снабжения потребителей огромной мощности. Из них создают большие ветроэлектростанции, которые могут покрывать по потреблению целые большие города. Такие ветрогенераторы могут быть автономного, гибридного и сетевого назначения. Автономные агрегаты в последнее время широко используются для снабжения энергией частных домов, коттеджей или дач. Это связано с тем, что при рациональности применения устройства в требуемом месте, он будет

стабильно покрывать расходы на электроэнергию, так как она с каждым годом всё более дорожает. Гибридные также используются как и автономные, однако такая система более сбалансированна и надёжна за счёт применения фотопанелей в качестве дополнительного источника энергии. Сетевые больше предназначены для работы с общей мощной сетью и применяются в системе ветропарков. Данные требования описываются в ГОСТ Р 51990-2002.

Любой ветрогенератор имеет систему управления, которая нужна для оптимального управления устройством. Есть три основные схемы управления это с неуправляемой и управляемой скоростью вращения ротора и с машиной двойного питания в цепи ротора. В основном используются устройства, которые могут контролировать скорость вращения ротора ветроколеса. Это связано с тем, что при управлении значительно повышается КПД за счёт применения в цепи статора полупроводникового преобразователя – инвертора (АС-АС или АС-DC-АС). Он помогает регулировать частоту и напряжения на обмотках генератора, повышая или понижая частоту вращения и регулируя частоту. Ветрогенераторы на основе машин двойного питания находят наиболее широкое применение из-за своего ключевого преимущества – ротор может поддерживать 25-30% номинальной мощности, что позволяет снизить массогабаритные показатели конечного устройства и следовательно его стоимость. Поэтому по технико-экономическим причинам во всех современных мощных ветрогенераторах используется система управления, основанная на машине двойного питания. Был представлен пример, описывающий систему управления ветрогенератором. Так от её конструирования и при соблюдении ряда требований зависит правильное функционирование всего устройства.

2 Разбор системы моделирования Simulink

2.1 Анализ возможностей библиотек Simulink

Под любым моделированием будем понимать замену рассматриваемого объекта на другой объект условно описанный, который принято называть моделью. Модель с высокой точностью и в пределах допустимых погрешностей должна описывать работу объекта, в противном случае она не нужна. Само моделирование используется в тех случаях когда изучение или исследования исходного объекта невозможно по тем или иным причинам. Также моделирование позволяет экономить большое количество времени и средств. Например в областях точных наук, таких как астрономия, ядерная физика или химия. В той же астрономии описывать течение термоядерных реакций внутри звёзд или что образование новых «солнечных систем» по заданным параметрам, чтобы наблюдать процесс их зарождения в других частях космоса, что естественно реально опытным путём неосуществимо. В той же ядерной физике – это моделирование ядерных процессов протекающих в реакторах АЭС или взрыва атомной бомбы, что при штатных испытаниях очень дорогое и опасное предприятие. В химии моделирование взаимодействий опасных соединений, что при реальных испытаниях это не только опасно, но и может быть дорого. В данных и многих других ситуациях как раз моделирование является самым действенным методом исследования необходимого объекта.

Стоит отметить, что моделирование может применять и в тех случаях, когда оно может быть не совсем оправданным. Например, казалось бы зачем моделировать трубопровод, сливной бачёк или работу бытового вентилятора, но на самом деле это важно так как это позволяет значительно улучшить качество продукта и его конечную стоимость, не расходуя при этом большое количество материалов на испытания. Поэтому чем сложнее рассматриваемы для исследования объект, тем более необходимо именно моделирование. В таких областях как радиотехника, электромеханика, физика, электроника и т.д., находит широкое применение моделирование, а определённый прогресс

в усовершенствовании продукта играет именно успехи в разработках, так как это позволяет разработчикам или добавить или исправить те или иные функции.

Стоит выделить, что любые явления, системы и их модели подразделяются на нестационарные и стационарные. Так стационарные не зависят от параметрических данных во времени, а нестационарные наоборот. Поэтому и смоделировать нестационарную модель гораздо сложнее. Их можно подразделить на два широких класса в зависимости от способа реализации:

1. Физические модели – здесь предполагается реализация физических свойств реального исследуемого устройства с высокой точностью. Используют довольно часто макетные модели, которые представляют собой уменьшенные по габаритам реальные модели и поэтому такой класс моделирования зачастую называют макетированным;
2. Математические модели – здесь исследуемый объект или система описывается при помощи абстрактного языка, например как совокупность математических отношений или алгоритмов. Также можно выделить группу видов такого моделирования:
 - Вербальные- описание модели с помощью слов;
 - Графические – описание модели с помощью поясняющего рисунка (графика);
 - Табличные – описание модели с помощью таблиц с данными о модели;
 - Аналитические – описание модели с помощью формул или уравнений;
 - Алгоритмический – описание модели с помощью определённого алгоритма (действий).

Такие модели могут довольно часто являться следствием рассмотрения модели физического объекта или процесса, например, вольтамперные характеристики транзистора или диода. В основном описание многих явлений в подобных моделях происходит с помощью различных уравнений одного и того же типа, а такие модели называют формальными или говорят «носят формальный характер». Такой моделью может служить например, выходные характеристики биполярного транзистора в виде кривых токов базы в активном режиме и одной кривой в режиме насыщения.

Так математическая модель может служить для имитации действия реально исследуемого объекта во времени, которую принято называть – имитационной. Другое название Simulation Modeling и оно является основным пакетом расширения Simulink в программном продукте MATLAB.

Любая модель будь то физическая или математическая должна соответствовать определённым свойствам при моделировании, которые выделим ниже:

1. Равноценность – подобная модель исследуемого объекта должна с определённой точностью позволить достичь конечного результата исследования, но при этом эта «точность» не бывает стопроцентной. Например, моделирование КПД преобразователя может получиться с точностью в несколько процентов, что в рамках исследования считается допустимым;
2. Простота – любая модель должна разрабатываться из соображения простоты, который является одним из ключевых параметров, потому-что чем сложнее получается модель, тем выше будет вероятность допустить ошибку при моделировании. Поэтому предпочтительнее стараться найти решение более простое, которое поможет достичь необходимых точных результатов;

3. Потенциальность – возможность исследуемой модели или объекта дать спрогнозированный заранее результат об свойствах или поведении, что даст новые знания. Таким примером может служить закон всемирного тяготения описанный с помощью такой модели или движение астероида в солнечной системе. Таким образом были обнаружены чёрные дыры, в том числе и в нашей галактике.

Есть и другие свойства по описанию моделей, но они не играют значительной роли при изучении исследуемых объектов.

При постановке задач, которые должны быть решены в ходе исследовательских работ, стоит вопрос в методах их решения, поэтому ниже приведём основные три группы методов:

Графические – основываются на анализе различных графиков, построенных приближённо и на основании полученных из них данных формируется ответ;

Аналитические – здесь для получения ответа на поставленную задачу используются аналитические выражения, полученные при моделировании, где их анализ и является решением;

Численные – такой метод позволяет получить ответ на сложную решаемую задачу путём решения математических уравнений и является основным при моделировании в Simulink. Именно в этом расширении используются численные методы решения, например, метод Рунге-Кутты 2 порядка.

Так расширение Simulink широко применяется при моделировании различных объектов или систем. Такая популярность обусловлена тем, что данное расширение является довольно простым, понятным и наглядным. Здесь используется визуально-ориентированный подход при моделировании, где нужно необходимые готовые блоки в которых заранее заложены

необходимые формулы. Их просто перетаскивают в текущий открытый проект из библиотеки и соединяют между собой, формируя необходимую модель. Ниже более подробно рассмотрим наиболее интересные разделы и содержащие их блоки:

а) Sources – источники сигналов, содержат следующие блоки:

1. Band-Limited White Noise – генератор белого шума, генерирует нормально распределенные случайные числа, которые подходят для использования в непрерывных или смешанных системах. Теоретически непрерывный белый шум имеет время корреляции 0, плоскую спектральную плотность мощности (PSD) и суммарную энергию, равную бесконечности. На практике физические системы никогда не нарушаются белым шумом, хотя белый шум является полезным теоретическим приближением, когда шумовое возмущение имеет время корреляции, которое очень мало по сравнению с естественной полосой пропускания системы. В расширении Simulink можно имитировать эффект белого шума, используя случайную последовательность с временем корреляции, намного меньшим, чем самая короткая постоянная времени системы. Блок белого шума с ограниченной полосой пропускания создает такую последовательность. Время корреляции шума - это частота дискретизации блока. Для точного моделирования необходимо использовать время корреляции, намного меньшее, чем самая быстрая динамическая система;
2. Chirp Signal – генератор линейно-изменяющийся частоты, генерирует синусоидальный сигнал, частота которого увеличивается линейно со временем. Этот блок можно использовать для спектрального анализа нелинейных систем. Блок генерирует скалярный или векторный вывод. Параметры, начальная частота, целевое время и частота в целевое время

определяют выход блока. Вы можете указать любую или все эти переменные в виде скаляров или массивов. Все параметры, указывающиеся в качестве массивов, должны иметь одинаковые размеры. Блок расширяет скалярные параметры, чтобы они имели те же размеры, что и параметры массива. Выходные данные блока имеют те же размеры, что и параметры, если не установлен флажок «Интерпретировать векторные параметры как 1-D». Если вы установите этот флажок и параметры являются векторами строк или столбцов, то блок выводит сигнал вектора (1-D массив). К данному блоку применяются следующие ограничения:

- Время начала моделирования должно быть равно 0,
 - Всякий раз, когда подсистема включена, выходные данные блока должны соответствовать тому, что в итоге появилось, если бы сама подсистема была включена на протяжении всего процесса моделирования;
3. Clock – источник времени, выводит текущее время моделирования на каждом шаге моделирования. Этот блок полезен для других блоков, которым требуется время моделирования. Когда нужно текущее время в дискретной системе, то нужно использовать блок цифровых часов;
4. Constant – источник постоянного сигнала, генерирует реальное или комплексное постоянное значение сигнала. Блок генерирует скалярный, векторный или матричный вывод в зависимости от:
- Размерности параметра «Constant value»,
 - Установки параметров «Interpret vector parameters as 1-D».

Выходные данные блока тут имеют те же размеры и элементы, что и параметр «Constant value». Если же задаётся этот параметр как вектор, который должен интерпретироваться как вектор, то

тогда нужно выбрать параметр «Interpret vector parameters as 1-D». В противном случае, если указать вектор для параметра «Constant value», то блок будет рассматривать этот вектор как матрицу;

5. Counter Free-Running – источник сигнала типа «счётчик», который считает до достижения максимального значения, $2^{N_{\text{bits}}} - 1$, где Nbits-количество битов. Затем счетчик переполняется до нуля и снова начинает отсчет. После переполнения счетчик всегда инициализируется до нуля. Однако, если выбрать переопределение глобальных двойников, то этот блок не вернется к нулю. Он не предупреждает о переполнении во время моделирования, это нужно смотреть в мастере диагностики;
6. Counter Limited – источник сигнала типа «счётчик» с ограничением, отсчитывает до тех пор, пока не будет достигнут указанный верхний предел. Затем счетчик возвращается к нулю и возобновляет отсчет. Счетчик всегда инициализируется нулем. Можно указать верхний предел с помощью параметра «Upper limit». Вы можете указать время выборки с помощью параметра «Sample time». Если, этот параметр равен -1, то это означает, что он перенимается. Выходные данные представляют собой целое число без знака, равное 8, 16 или 32 битам, с наименьшим количеством битов, необходимых для представления верхнего предела. Этот блок не предупреждает о переполнении во время моделирования, это нужно смотреть в мастере диагностики;
7. Digital Clock – дискретный источник времени, выводит время моделирования только на заданном интервале дискретизации. В других случаях блок удерживает вывод на предыдущем значении. Чтобы управлять точностью этого блока, надо установить параметр «Clock» в диалоговом окне. Использовать

этот блок можно, когда необходимо получить текущее время моделирования в дискретной системе;

8. Enumerated Constant – перечислимая константа, выводит скаляр, массив или матрицу перечисляемых значений. Также может использоваться блок «Constant» для вывода перечислимых значений, но при этом он предоставляет параметры блока, которые не применяются к перечисляемым типам, таким как «Output minimum» и «Output maximum». Если необходимо, выводить только постоянные перечисляемые значения, предпочтительно использовать блок «Enumerated Constant», а не блок «Constant»;
9. From File – блок считывания данных из файла, загружает данные из MAT-файла в модель и выводит данные в виде сигнала. Данные представляют собой последовательность выборок. Каждый образец состоит из метки времени и связанного с ней значения данных. Данные могут быть в формате массива или в формате временных рядов MATLAB. Значок блока «From File» показывает имя файла MAT, который предоставляет данные в блок. Может быть несколько блоков файлов «From File», которые загружаются из одного и того же файла MAT. Можно указать, как загружаются данные, включая:
 - Время выборки,
 - Обработку данных для отсутствующих значений,
 - Возможность использования поиска точек пересечения нуля;
10. From Spreadsheet – блок считывания данных из электронных таблиц, считывает данные из электронных таблиц Microsoft Excel (все платформы) или CSV (платформа Microsoft Windows с Microsoft Office) и выводит данные в виде сигнала. Значок «From Spreadsheet» отображает имя файла электронной таблицы и имя

листа, указанные в параметрах блока «File Name» и «Sheet Name»;

11. From Workspace – блок считывания данных из рабочей области MATLAB, считывает данные сигнала из рабочей области и выводит данные в виде сигнала. Значок «From Workspace» отображает выражение, указанное в параметре «Data». Можно указать, как загружаются данные, включая «Sample Time», как обрабатывать данные для недостающих значений и использовать поиск значений пересечения нуля;
12. Ground – формирователь сигнала нулевого значения, подключается к блокам, входные порты которых не подключаются к другим блокам. При запуске моделирования с блоками, имеющими несоединенные входные порты, Simulink выдает предупреждения. Использование «Ground» блока для заземления этих несвязанных блоков поможет избежать этих предупреждений. «Ground» выводит сигнал того же типа данных, что и порт, к которому он подключается;
13. In1 – входной порт, соединяет из внешней системы в текущую систему. Программное обеспечение расширения Simulink назначает номера входных портов блоков в соответствии с следующими правилами:
 - Он должен автоматически последовательно нумеровать блоки портов в системе или подсистеме верхнего уровня, начиная с 1,
 - Если добавляется блок «Inport», название нумеруется следующим доступным номером,
 - При удалении блока ввода-вывода номера других портов, он автоматически пере нумеруется, чтобы обеспечить последовательность блоков ввода-вывода и отсутствие пропущенных номеров,

- При копировании блока ввода в систему его номер порта не перенумеровывается, если его текущий номер не конфликтует с блоком ввода, уже находящимся в системе. Если скопированный номер порта блока «Inport» не соответствует порядку, то надо изменить нумерацию блока. В противном случае при запуске моделирования или обновлении блок-схемы будет выдано сообщение об ошибке.

Можно указать размеры входных данных для блока «Inport», используя параметр «Port dimensions». Ввод значения -1 позволяет Simulink определить размер порта.

Параметр «Sample Time» – это скорость, с которой сигнал поступает в систему. Значение -1 приводит к тому, что блок перенимает значение времени выборки от блока, управляющего им;

14. Pulse Generator – источник импульсного сигнала, генерирует прямоугольные импульсы с регулярными интервалами. Параметры прямоугольной формы сигнала, «Amplitude», «Pulse Width», «Period» и «Phase delay» определяют форму выходного сигнала. На следующем рисунке показано, как каждый параметр влияет на форму сигнала.

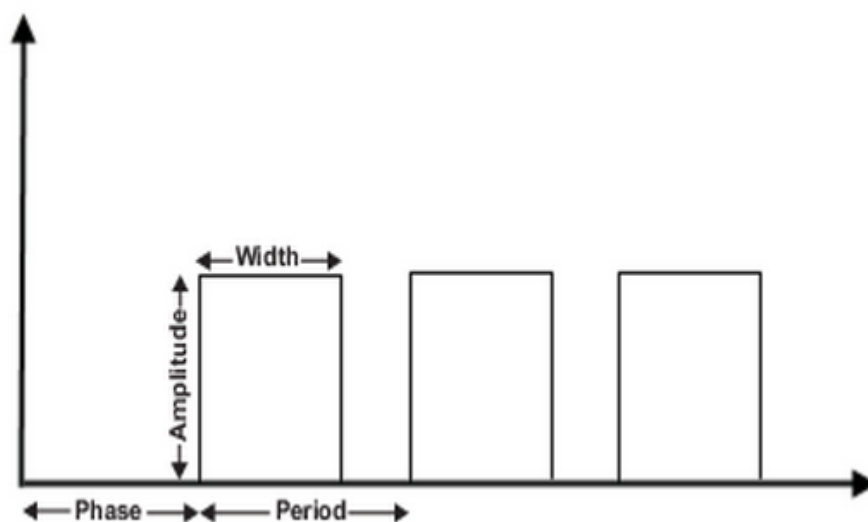


Рисунок 1.2.1 – Название параметров прямоугольной формы сигнала.

Генератор импульсов может генерировать скалярные, векторные или матричные сигналы любого реального типа данных. Чтобы заставить блок генерировать скалярный сигнал, надо использовать скаляр для задания параметров формы сигнала. Чтобы заставить блок излучать векторный или матричный сигнал, нужно использовать вектор или матрицу, соответственно, для указания параметров формы сигнала. Каждый элемент параметров формы сигнала влияет на соответствующий элемент выходного сигнала. Например, первый элемент параметра «Amplitude» вектора, определяет амплитуду первого элемента выходного импульса. Все параметры формы сигнала должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения. Тип выходных данных совпадает с типом данных параметра «Amplitude». Этот выход блока может быть сгенерирован в режиме, основанном на времени или на выборке, определяемом параметром «Pulse Type».

В режиме, «Time-based mode», Simulink вычисляет выходные данные блока только в те моменты, когда выходные данные действительно изменяются. Такой подход приводит к меньшему количеству вычислений для вывода блока в течение периода

времени моделирования. Активировать этот режим, если установить параметр «Pulse Type» на «Time Based». Блок не поддерживает конфигурацию, основанную на времени, которая приводит к постоянному выходному сигналу. Simulink возвращает ошибку, если параметры «Pulse Width» и «Period» удовлетворяют любому из этих условий: $\text{Period} * \text{Pulse Width} / 100 = 0$ и $\text{Period} * \text{Pulse Width} / 100 = \text{Period}$.

В режиме «Sample-based mode» блок вычисляет свои выходные данные с заданными пользователем фиксированными интервалами. Активировать этот режим, можно установив параметр «Pulse Type» на «Sample-based». Важное различие между «time-based» и «sample-based» режимами заключается в том, что в режиме, основанном на времени, вывод блока основан на времени (time-based) моделирования, а в режиме, основанном на выборке (sample-based), вывод блока зависит только от начала моделирования, независимо от прошедшего времени моделирования. Этот блок поддерживает семантику сброса в «sample-based». Например, если генератор импульсов находится в сбрасываемой подсистеме, которая нажимает триггер сброса, выход блока сбрасывается в исходное состояние;

15. Ramp – источник линейно-изменяющегося воздействия, генерирует сигнал, который начинается в заданное время и значение и изменяется с заданной скоростью. Так «block's Slope», «Start time», и «Initial» параметры определяют характеристики выходного сигнала. Все они должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения;

16. Random Number – источник случайного сигнала с нормальным распределением, генерирует нормально распределенные случайные числа. Для генерации равномерно распределенных случайных чисел используйте блок «Uniform Random Number» чисел. Можно сгенерировать повторяемую последовательность,

используя любой блок «Random Number» с тем же неотрицательным начальным значением и параметрами. Начальное значение сбрасывается до указанного значения при каждом запуске моделирования. По умолчанию блок создает последовательность со средним значением 0 и дисперсией 1. Чтобы сгенерировать вектор случайных чисел с одинаковым средним значением и дисперсией, укажите «Seed» параметр в качестве вектора. Необходимо избегать интеграции случайного сигнала, поскольку блок решения должен интегрировать относительно ровные сигналы. Числовые параметры этого блока должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения. Если же установить флажок «Interpret» векторные параметры как 1-D, а числовые параметры являются векторами строк или столбцов после скалярного расширения, блок выводит 1-D сигнал. Если очистить значение «Interpret» параметра вектора как 1-D, блок выводит сигнал той же размерности, что и параметры;

17. Repeating Sequence – источник периодического сигнала с интерполяцией, выводит периодический скалярный сигнал, имеющий форму волны, заданную с помощью параметров «Time values» и «Output values». Параметр «Time values» задает вектор времени вывода. Параметр «Output values» задает вектор амплитуд сигнала в соответствующие выходные моменты времени. Вместе эти два параметра определяют выборку выходного сигнала в точках, измеренных с начала интервала, в течение которого повторяется сигнал (период сигнала). По умолчанию оба параметра равны [0 2]. Эти настройки по умолчанию задают пилообразную форму сигнала, которая повторяется каждые 2 секунды с начала моделирования и имеет максимальную амплитуду равную 2;

18. Repeating Sequence Interpolated – источник периодического сигнала, выводит последовательность дискретного времени и затем повторяет ее. Между точками данных блок использует метод, указанный для параметра «Lookup Method», для определения выходных данных;
19. Repeating Sequence Stair – источник ступенчатого периодического сигнала, выводит и повторяет последовательность ступеней, заданную параметром «Vector of output values»;
20. Signal Builder – конструктор сигналов, позволяет создавать взаимозаменяемые группы кусочно-линейных источников сигналов и использовать их в модели;
21. Signal Editor – редактор сигналов, создает и редактирует взаимозаменяемые сценарии. Можно также использовать блок для переключения сценариев в модели и из них. Блок редактора сигналов поддерживает MAT-файлы, содержащие одну или несколько скалярных Simulink. SimulationData. Dataset objects;
22. Signal Generator – генератор сигналов, генерирует одну из четырех различных форм сигнала: синусоидальную волну, прямоугольную волну, пилообразную волну и случайную волну. Можно выразить параметры сигнала в герцах (по умолчанию) или радианах в секунду. Отрицательное значение параметра «Amplitude» вызывает сдвиг фазы на 180 градусов. Так можно генерировать сдвинутую по фазе волну, отличную от 180 градусов, различными способами. Например, можно подключить сигнал тактового блока к функциональному блоку MATLAB и написать уравнение для конкретной волны. Также можно изменять настройки выходного сигнала блока генератора сигналов во время моделирования. Это полезно для быстрого определения реакции системы на различные типы входных

данных. «Amplitude» и «Frequency» параметры определяют амплитуду и частоту выходного сигнала. Параметры должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения. Если снять галочку «Interpret» на параметры вектора как 1-D, то блок будет выводит сигнал тех же размеров, что и параметры амплитуды и частоты (после скалярного расширения). Если же установите галочку «Interpret» на векторные параметры как 1-D, то блок будет выводит векторный (1-D) сигнал, в том случае, если амплитудные и частотные параметры являются векторами строк или столбцов, то есть однорядными или столбчатыми 2-D массивами. В противном случае блок будет выводить сигнал тех же размеров, что и его заданные параметры;

23. Sine Wave – источник синусоидального сигнала генерирует синусоидальную форму сигнала. Блок может работать во «time-based» или «sample-based» режиме. В «time-based» содержит два подмодуля: «continuous mode» и «discrete mode». Работа блока в «continuous mode», где значение параметра времени выборки, равное 0, приводит к тому, что блок работает в этом режиме. При работе в нём блок «Sine Wave» может стать неверным из-за потери точности, поскольку время становится очень большим. Поведение блока в дискретном режиме, где значение параметра «sample-based» больше нуля, приводит к тому, что блок ведет себя так, как если бы он управлял блоком «Zero-Order Hold», «sample-based» которого установлено на это значение. Применяя этот блок можно создавать модели с источниками синусоидальных волн, которые являются чисто дискретными, а не моделями, представляющими собой смешанные непрерывные/дискретные системы. Смешанные системы по своей сути более сложны и, как следствие, требуют больше времени для моделирования. В дискретном режиме этот блок

использует дифференциальный инкрементный алгоритм вместо алгоритма, основанного на абсолютном времени. В результате блок может быть полезен в моделях, предназначенных для работы в течение неопределенного периода времени, например, при испытаниях на вибрацию или усталость;

24. Step – источник ступенчатого сигнала, делает шаг между двумя определяемыми уровнями в заданное время. Если время моделирования меньше значения параметра «Step time», то выход блока является значением параметра начального значения. Для времени моделирования, большего или равного «Step time», выходным значением является значение параметра «Final value». Параметры числового блока должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения. Если, функция «Interpret vector parameters» 1-D отключена, то блок выводит сигнал тех же размеров и размерности, что и параметры. Если, функция «Interpret vector parameters» 1-D включена, а числовые параметры являются векторами строк или столбцов (то есть однорядными или столбчатыми 2-D массивами), то блок выводит сигнал вектора (1-D массив). В противном случае блок выводит сигнал той же размерности и размеров, что и параметры;

25. Uniform Random Number – источник случайного сигнала с равномерным распределением, генерирует равномерно распределенные случайные числа в течение заданного интервала. Для генерации нормально распределенных случайных чисел надо использовать блок «Random Number». Можно сгенерировать повторяемую последовательность, используя любой однородный блок случайных чисел с одинаковыми неотрицательными начальными значениями и параметрами. Начальное значение сбрасывается до указанного значения при каждом запуске моделирования. Необходимо избегать интеграции случайного

сигнала, поскольку решающий блок должен интегрировать относительно сглаженные сигналы. Вместо этого необходимо использовать блок «Band-Limited White Noise». Числовые параметры этого блока должны иметь одинаковые размеры после скалярного расширения. Если же выбрать галочку «Interpret vector parameters» 1-D, то тогда числовые параметры являются векторами строк или столбцов после скалярного расширения и блок выводит 1-D сигнал. Если убрать галочку с параметра «Interpret vector parameters» 1-D, то блок будет выводить сигнал той же размерности, что и задано в параметрах;

26. Waveform Generator – генератор формы сигнала, выводит осциллограммы на основе обозначений сигналов, введенных в таблице специальной таблице, которую можно найти в разделе поддержки «Supported Waveforms».

б) Sinks – приёмники сигналов, содержит следующие блоки:

1. Display – цифровой дисплей, выводит входные данные. В зависимости от выбора значения «Format» можно отображать данные на дисплее так как необходимо:
 - Short – выводит на дисплей результат до 5 знаков,
 - Long – выводит на дисплей результат до 15 знаков,
 - Short_e – выводит на дисплей результат из 5 знаков с плавающей запятой,
 - Long_e – выводит на дисплей результат из 16 знаков с плавающей запятой,
 - Bank – выводит на дисплей результат в формате долларов или центов (но без \$ или запятых),

- Hex (Stored Integer) – выводит на дисплей сохранённое целочисленное значение ввода в шестнадцатеричном формате,
- Binary (Stored Integer) – выводит на дисплей сохранённое целочисленное значение ввода в двоичном формате,
- Decimal (Stored Integer) – выводит на дисплей сохранённое целочисленное значение ввода в десятичном формате,
- Octal (Stored Integer) – выводит на дисплей сохранённое целочисленное значение ввода в восьмеричном формате.

Чтобы сделать данный блок плавающим, то нужно поставить галочку в «Floating display». Входной порт блока исчезает, и блок отображает значение сигнала в выбранной строке;

2. Floating Scope – плавающий осциллограф, отображает сигналы временной области относительно времени моделирования. У данного блока следующие характеристики входного сигнала:

- Signal - непрерывный (sample-based) или дискретный (sample-based and frame-based),
- Signal data type - любой тип данных, поддерживаемый Simulink, включает в себя реальные, сложные, фиксированные и перечислимые типы данных,
- Signal Dimensions – может быть скалярный, одномерный (вектор), двумерный (матрица) или многомерный. Отображение нескольких каналов внутри сигнала зависит от его размера.

Также у этого блока следующие характеристики:

- Multiple y-axes (displays) – идёт отображение нескольких осей y с несколькими входными портами. Все оси y имеют общий временной диапазон на оси x.

- Multiple signals – идёт отображение нескольких сигналов на одной и той же оси y (дисплее) из одного или нескольких входных портов.
- Modify parameters – идёт изменение значений параметров области действия до и во время моделирования.
- Display data after simulations - если плавающий осциллограф закрыт в начале моделирования, данные области все равно записываются в область во время моделирования. В результате, если открыть его после моделирования, то область отобразит результаты моделирования для входных сигналов.

При использовании параметров конфигурации модели, таких как «Signal storage» и «Block reduction» для более быстрого моделирования и оптимизации сгенерированного кода, Simulink устраняет хранение некоторых сигналов во время моделирования. Так нельзя будет применить плавающий осциллограф к этим исключенным сигналам. Чтобы всё же это сделать, необходимо настроить устраненный сигнал в качестве тестовой точки. Затем можно будет применить его к сигналу независимо от настроек оптимизации;

3. Out1 – выходной порт, соединяет блоки из системы, которые находятся за пределами системы. Так если создать блок «Outport» в подсистеме, то он будет представлять собой выходы из неё. Сигнал, поступающий в блок внешнего порта в подсистеме, будет вытекать из соответствующего выходного порта в этом блоке подсистемы. Блок с, связанный с выходным портом в блоке «Subsystem» – это блок, «Port number» которого соответствует относительному положению выходного порта в блоке «Subsystem». Например, блок выходного порта, его «Port number»

равен 1, посылает свой сигнал блоку, подключенному к самому верхнему выходному порту блока «Subsystem». При перенумеровании «Port number» блока «Output» блок подключается к другому выходному порту, хотя блок продолжает посылать сигнал в тот же блок за пределами подсистемы. При создании подсистемы путем выбора существующих блоков, если в сгруппированные блоки включено более одного «Output» портов, программное обеспечение Simulink автоматически перенумерует порты в блоках. Имя блока внешнего порта будет при этом отображаться на значке подсистемы. Остальную полезную информацию можно найти в разделе «помощь»;

4. Score – осциллограф, отображает сигналы временной области. Такие два блока как «Time Score» и «Score» имеют одинаковую функциональность, но разные настройки по умолчанию. Так «Time Score» оптимизирован для дискретной обработки времени. А «Score» оптимизирован для общего моделирования во временной области. Возможности у осциллографа, следующие:
 - Triggers – настраивает синхронизацию повторяющихся сигналов и останавливает дисплей при возникновении необходимых случаях,
 - Cursor Measurements – можно измерить значения сигнала с помощью вертикальных и горизонтальных курсоров,
 - Signal Statistics – выводит отображение максимального, минимального, разность между пиками, среднего, срединного и среднеквадратичного значений выбранного сигнала,
 - Bilevel Measurements – можно измерить переходы, превышения, понижения и циклы,

- Peak Finder – можно найти максимумы, показывающие значения по оси x, при которых они возникают.

Возможности дисплея осциллографа:

- Simulation control - отладка моделей из окна области с помощью кнопок панели инструментов «Run», «Step Forward» и «Step Backward»,
- Multiple signals – можно нанести несколько сигналов на одну и ту же ось y (дисплей) с использованием нескольких входных портов,
- Multiple y-axes (displays) – можно отобразить несколько осей y. Все оси y имеют общий временной диапазон на оси x,
- Modify parameters – можно изменить значения параметров области действия до и во время моделирования,
- Axis autoscaling – можно сделать автоматическое масштабирование осей вовремя или в конце моделирования. Поля рисуются в верхней и нижней частях осей,
- Display data after simulation - если осциллограф закрыта в начале моделирования, данные области все еще записываются в область во время моделирования. В результате, если вы откроете область после моделирования, в области будут отображаться результаты моделирования для подключенных входных сигналов.

Более подробную информацию можно найти в разделе «помощь»;

5. Stop Simulation – блок остановки моделирования, останавливает моделирование, когда входные данные ненулевые.

Моделирование завершает текущий временной шаг перед завершением. Если вход блока является вектором, любой ненулевой векторный элемент приводит к остановке моделирования. При использовании блока «Stop Simulation» в подсистеме итератора «For» действие остановки выполняется после выполнения всех итераций в подсистеме в течение временного шага. Действие остановки не прерывает выполнение до начала следующего временного шага. Также нельзя использовать блок «Stop Simulation» для приостановки моделирования;

6. Terminator – концевой приёмник, применяется для перекрытия блоков, выходные порты которых не подключаются к другим блокам. При запуске моделирования с блоками, имеющими несоединенные выходные порты, Simulink выдает предупреждающие сообщения. Использование блоков терминатора для перекрытия этих блоков помогает предотвратить появление предупреждающих сообщений;
7. To File – блок записи в файл, вводит сигнал и записывает данные сигнала в MAT-файл. Нужно использовать блок «To File» для регистрации данных сигнала. Значок блока «To File» показывает имя выходного файла. Блок записывает данные в выходной файл постепенно, с минимальными затратами памяти во время моделирования. Если выходной файл существует при запуске моделирования, блок перезаписывает файл. Файл автоматически закрывается, когда моделирование завершено или приостановлено. Если моделирование завершается ненормально, блок «To File» сохраняет данные, которые он зарегистрировал, до момента ненормального завершения;
8. To Workspace – блок записи в рабочую область MATLAB, вводит сигнал и записывает данные сигнала в рабочую область. Во

время моделирования блок записывает данные во внутренний буфер. Когда моделирование завершено или приостановлено, эти данные записываются в рабочую область. Данные недоступны до тех пор, пока моделирование не будет остановлено или приостановлено. Значок блока показывает имя переменной, в которую записываются данные. Чтобы указать имя переменной рабочей области, в которую блок «To Workspace» записывает данные, надо использовать параметр «Variable name». Чтобы указать формат данных переменной, используйте параметр «Save format». Вы можете указать, чтобы сохранить данные в одном из следующих форматов:

- Объект временных рядов MATLAB (или структура объектов временных рядов MATLAB для шины данных),
- Массив,
- Структуру,
- Структура со временем.

Из одного из этих форматов можно преобразовать данные в формат набора данных. Преобразование в формат набора данных упрощает последующую обработку с другими зарегистрированными данными (например, зарегистрированными состояниями), которые также могут использовать формат набора данных;

9. XY Graph – графопостроитель, отображает график X-Y своих входных данных в рабочей области MATLAB. Блок имеет два скалярных входа. Блок строит данные на первом входе (направление x) против данных на втором входе (направление y). Этот блок будет полезен для изучения предельных циклов и других данных о двух состояниях. Данные за пределами указанного диапазона не отображаются. В начале моделирования

для каждого блока графика XY в модели появляется окно рисунка.

Так в расширении Simulink есть и другие разделы с блоками, которые представляют определённый интерес, однако в процессе данной работы рассмотренные блоки будут представлять повышенный интерес, а некоторые другие не были включены. Как и другие их можно найти в этой библиотеке, а подробную информацию можно узнать в разделе «Help». Однако для моделирования электроэнергетических систем или устройств промышленной электроники используют расширение SimPowerSystem, так как блоков Simulink не хватит и промоделировать не получится. Далее более подробно рассмотрим именно это расширение.

2.2 Система моделирования SimPowerSystem

Среда моделирования в которой производится изучение и анализ различных электротехнических и электроэнергетических систем – это пакет расширения SimPowerSystem. Он находит широчайшее применение за счёт того, что в отличие от Simulink использует более специализированные блоки для построения необходимых схем (полупроводниковые элементы, генераторы, трансформаторы, измерительные приборы, преобразователи и т.д.). Так в SimPowerSystem построение моделей и их моделирование почти тоже что и в симулинке, также между собой соединяются блоки линиями. Но есть и отличие, которое состоит в том, что те линии что используются в симулинке служат передатчиками сигнала между блоками, а в SimPowerSystem это виртуальные линии по которым протекает ток по аналогии с реальными. Его можно и замерить, поэтому чтобы это сделать можно взять блок измерителя тока, который можно подключить в разрыв проводника и сигнал с него будет поступать на осциллограф, например. Поэтому можно выделить тесную взаимосвязь расширений.

В целом и то и другое расширение является очень удобным при моделировании систем или устройств, а результаты получаются весьма информативными. Но стоит отметить, что именно в SimPowerSystem блоки более близки по результату моделирования к реальным устройствам, приборам или системам в энергетике и электротехнике, что можно положительно охарактеризовать, как огромный плюс.

Если выделять эффективность MATLAB в плане наличия функционала библиотек, то их работа, качество, количество и возможность создания самим различных блоков не должно вызывать сомнений при моделировании. Тут можно сделать практически любую модель, которая по результатам исследования почти не будет отличаться от реальной, что ещё раз говорит о гибкости расширений продукта. Теперь рассмотрим библиотеку SimPowerSystem с разделом Specialized Techonology:

1. **Fundamental Blocks** – фундаментальные (базовые) блоки, без которых невозможно будет собрать схемы. Это блоки электрических сигналов, как переменного так и постоянного тока, электротехнических элементов (RLC-цепи, трансформаторы, взаимоиנדуктивности и т.д.), электрических машин переменного и постоянного тока, измерительных устройств и силовых устройств (диодов, тиристоров, IGBT-транзисторов и т.д.). Точность при использовании данных блоков при моделировании достаточно высока.
2. **Control & Measurements** – блоки предназначенные для контроля и измерений сигнала. В состав входят блоки логики, фильтры, измерительные, генераторов импульсов и сигналов, фазовой автоподстройки частоты, преобразователей координат.
3. **Electric Drivers** – здесь находятся блоки электроприводов постоянного и переменного тока, блоки источников дополнительной энергии (батареи, суперконденсаторы, батареи топливных элементов), блоки валов и редукторов, блоки базовых электроприводов.
4. **FACTS** – гибкие системы передачи переменного тока, содержат блоки гибких систем передачи переменного тока на базе силовой электроники и блоки трансформаторов с системой регулирования под нагрузкой.
5. **Renewables** – блоки возобновляемых источников энергии, содержат блоки ветроэнергетических установок и блок солнечной панели.

Используя данные блоки SimPowerSystem можно построить любую требуемую модель и получить довольно высокую точность при моделировании. Это хорошо тем, что в виртуальной модели риски выхода из строя устройства сводятся к 0. Более подробно рассматривать данные

блоки нет необходимости так как они создавались на основе реальных элементов и устройств по которым есть много теоретических сведений. Однако, смоделировать нужное устройство в матлабе не совсем получится в силу того, что необходимо учитывать аналоговые особенности компонентов преобразователя. Для того, чтобы её сделать можно взять программу Tina TI, которую ниже кратко опишем. Эта программный продукт, разработанный компаниями DesignSoft и Texas Instruments, использует Spice - модели электронных компонентов и позволяет проводить анализ и проектирование разнообразных аналоговых, цифровых, микропроцессорных и смешанных устройств на современном уровне компьютерных технологий. Все компоненты, представленные в TINA-TI, распределены по шести группам: основные пассивные радиодетали, ключи, полупроводники, измерительные приборы, макромодели сложных устройств и источники. Также данная программа включает в себя несколько десятков разнообразных примеров.

TINA-TI предоставляет широкие возможности по рисованию и редактированию электронных схем. После того как их создание закончено, наступает очередь симуляции. Имеются следующие виды анализов: по постоянному и переменному току (сюда входит: вычисление узловых напряжений, создание таблицы результатов, построение переходных характеристик и температурный анализ), переходных процессов, шумов, преобразование Фурье и некоторые другие. Каждый из вариантов имеет свои собственные уникальные настройки. В зависимости от вида выполняемого анализа программа генерирует результаты в виде графиков или таблиц. Перед стартом любой симуляции выполняется проверка схемы на ошибки (ERC). Все найденные дефекты отображаются в особом окне в виде списка. При щелчке мыши на строке с ошибкой «непонятый» программой элемент или область схемы выделяются маркерами.

В программе TINA-TI также доступны возможности тестирования и измерения сигналов. Для этого существуют следующие виртуальные приборы: осциллограф, анализатор сигналов, цифровой тестер (с измерителем частоты), генератор функций и записывающее устройство. Виртуальные приборы программного комплекса максимально приближены по использованию к реальным устройствам. «Подключить» их можно к любой точке рассматриваемой схемы. Самое главное у программы имеется довольно широкая библиотека компонентов, где на своё усмотрение можно изменять нужные параметры. Для получения необходимых данных при моделировании можно использовать анализ переходных процессов, который и применим далее при моделировании, а из групп различных компонентов как раз соберём требуемое устройство с учётом его особенностей.

Выводы по второму разделу

Так на сегодня MATLAB является одной из лучших и эффективных систем автоматизации математических расчётов. Популярность данного продукта обусловлена его эффективностью, тем что он ориентирован на матричные вычисления с программной эмуляцией параллельных вычислений и упрощёнными средствами задания циклов. Также в нём весьма удачно реализованы средства работы с большими матрицами, многомерными массивами и другими типами данных. Такой программный продукт имеет мощные средства для диалога, графики и комплексной визуализации вычислений с привлечением средств виртуальной реальности. Сам продукт имеет большое количество расширений, одним из самых используемых является Simulink, который основан на блочном имитационном моделировании с применением визуально-ориентированного программирования. Главным его достоинством в составе MATLAB является то, что он позволяет строить виртуальные модели, исследуя которые можно получить аналогичный результат, так как если бы это был реальный стенд. Это не требует серьёзных затрат как материальных так и физических, что находит довольно широкое применение практически во всех современных областях (энергетика, автомобилестроение, аэрокосмическая отрасль, ядерная физика и т.д.). Так в составе библиотек к расширениям с каждым годом различных блоков становится больше, как и различных возможностей. Для моделирования электроэнергетических и электротехнических систем широко применяется библиотека SimPowerSystem. В ней линии соединения блоков это виртуальные провода по которым протекает электрический ток. Моделирование электротехнических устройств с использованием блоков из этой библиотеки позволяет получить высокоточные и информативные результаты в ходе исследования. А программный продукт Tina TI позволяет исследовать объект с учётом его аналоговых возможностей и получить высокоточный результат.

3 Моделирование и анализ режимов работы полупроводникового преобразователя

3.1 Описание схемы полупроводникового преобразователя

Инвертор в любой ветроэнергетической установке является одним из ключевых устройств. Его задача состоит в том, чтобы сделать из постоянного напряжения, переменное. Есть два основных типа инверторов:

1. Ведомые – такие устройства зависят от питающей его сети;
2. Автономные – такие устройства никак не зависят от сети переменного тока.

Так ведомые инверторы обычно работают в сети переменного напряжения, где именно сама сеть определяет его форму, частоту и величину. Также в подобной сети инвертор может добавлять недостающую или дополнительную активную мощность, так как это одна из его функций работы. Например, если в системе где есть ведомый инвертор применяется передача электрической энергии постоянным током при взаимосвязи двух энергосистем переменного напряжения, тогда выпрямитель в одном из концов линии сделает переменное напряжение, постоянным, а в другом конце (приёмном) инвертор сделает постоянное напряжение, переменным отдавая в эту энергосистему свою активную энергию. Это один из примеров реализации работы ведомого инвертора.

Автономные инверторы работают не зависимо от сети переменного напряжения, то есть в замкнутой энергосистеме. Это как раз и есть основное отличие от ведомых инверторов. Так в качестве нагрузки у такого типа инверторов может быть как один потребитель так и несколько. Частота выходного напряжения здесь определяется частотой импульсов управления вентилей инвертора а форма и величина - характером, то есть величиной нагрузки и схемой. Есть три основных типа инверторов:

1. АИН (автономный инвертор напряжения);
2. АИН (автономный инвертор тока);
3. АИР (автономный резонансный инвертор).

Основой принцип работы любого автономного инвертора это поочерёдное переключение вентилях в различных схемах, в роли которых обычно выступают транзисторы или тиристоры. Также важным элементом в таких схемах является конденсатор, который отвечает за формирование выходной кривой напряжения преобразователя и определения характера переходных процессов в цепи переменного тока и для повышения напряжения на нагрузке. Так АИР основан на работе колебательного RLC контура, в нём происходит колебательный процесс, который по частоте кратен или практически равен частоте переключения транзисторов или тиристоров, а ток и напряжение на нагрузке имеют фактически синусоиду. Такие инверторы нужны для преобразования напряжения одной частоты (например 1000 Гц) до напряжения более высокой частоты (например 10000 Гц). Применяются они в основном для индукционной плавки металла или индукционного нагрева. В АИТ функционирование происходит за счёт периодического переключения с постоянной или настраиваемой частотой через вентильный коммутатор хорошо сглаженного источника питания. Индуктивность в цепи питания обеспечивает постоянное значение тока в цепи источника энергии и делает необходимым коэффициент пульсаций. А конденсатор создаёт необходимые условия для переключения транзисторов. Применяются могут, например, для обеспечения потребителей переменного тока энергией в различных системах снабжения энергией, как и АИН. Его и рассмотрим более подробно так как он и будет использоваться в рассматриваемой схеме преобразователя. Устройство хорошо тем, что форма напряжения задаётся в нагрузке, а форма тока самой нагрузкой. Поэтому подобные инверторы могут работать в режиме холостого хода. Также такие приборы способны работать в режимах близких к короткому замыканию, а

значит можно в больших диапазонах регулировки нагрузки. Он работает и в широких диапазонах изменения частоты (значит что не изменяет форму напряжения и его амплитуду на нагрузке), что выгодно его отличает от тех же АИТ, поэтому и нашёл более широкое применение. На рисунке 3.1.1 рассмотрим схему преобразователя, который может использоваться в автономной ветроэнергетической системе для снабжения электроэнергией потребителей.

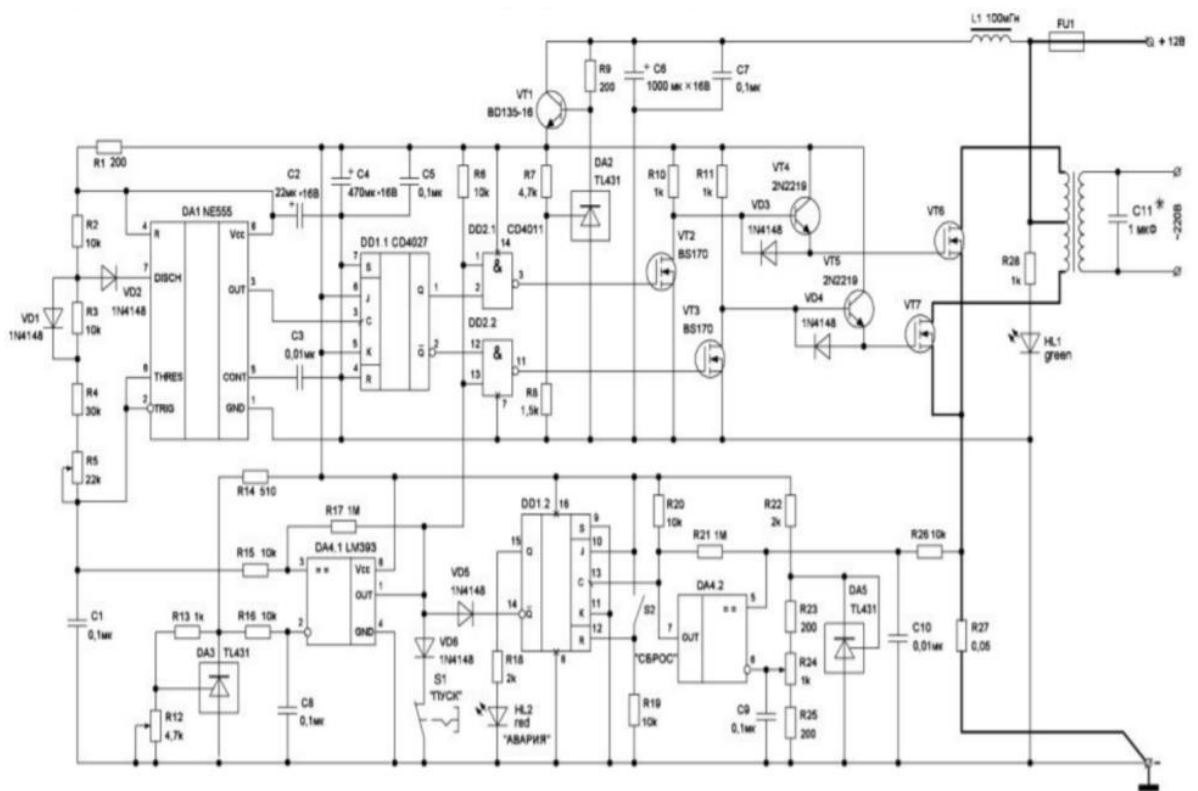


Рисунок 3.1.1 – Схема инвертора для ветроэнергетической установки

Теперь более подробно опишем эту схему. Начнём с элемента NE555 – это микросхема интегрального таймера, на которой построен задающий генератор. Резисторы R2, R3, R4, R5 и конденсатор C1 предназначены в схеме для определения частоты его колебаний. Резистор R5 необходим для фиксирования частоты равной 100 Гц. С элемента CD4027, а это - собственно JK-триггер, подаются на него импульсы с микросхемы таймера. Он же включается делителем импульсов на два. Так на Q инверсном и обычном

выходе проходят противофазные импульсы в 50 Гц, однако на силовые ключи они не подаются. В свою очередь на них ставят время на включение и выключение, что приводит к сквозному току. Поэтому чтобы такого не случилось применяют компаратор DA4.1, который формирует «мёртвое время» при переключении ключей. Поэтому с конденсатора C1 на его не инвертирующий вход подаётся пилообразное напряжение, а на другой опорное. В итоге получается так, что на выходах DD1.1 формируются импульсы длинее, чем на DA4.1 они здесь короткие. А резистор R12 как раз 74 служит регулятором их длительности. Так на элементе 2И – НЕ CD4011 с выходов DD1.1 и выхода DA4.1 начинают появляться импульсы. Низкий уровень напряжения на элементах DD2.1 и DD2.2. появляется только при совпадении высоких уровней напряжения. Теперь предположим, что низкий уровень напряжения появился у элемента DD2.1 на его выходе. Тогда транзистор VT4 закрыт, а VT4 открывается током через резистор R10. У МОП-транзистора VT6 при этом довольно быстро разряжается входная ёмкость эмитерным током. Поэтому этот транзистор коммутирует полуобмотку силового трансформатора, форсированно открываясь. Формируется полупериод высокого напряжения на его выходной обмотке. VT2 закрывается, поскольку на выходе элемента DD2.2 появляется напряжение низкого уровня и ток через R11 открывает транзистор VT5. У МОП – транзистора VT7 довольно быстро разряжается входная ёмкость из-за эмитерного тока VT5. Поэтому данный МОП – транзистор коммутирует другую полуобмотку трансформатора. И в следствие этого на выходной полуобмотке формируется последующий полупериод высокого напряжения. Транзистор VT2 открывается из-за наличия высокого уровня напряжения на выходе элемента DD2.1, если на выходе элемента DD2.2 имеется низкий уровень напряжения и ёмкость затвора транзистора VT6 быстро разряжается на общую шину через диод VD3. Далее форсированно закрывается силовой транзистор. Когда получается, что на элементах DD2.1 и DD2.2. отрицательные импульсы короче, чем полупериод формируемого

напряжения на выходе DD1.1, то тогда происходит запираение транзистора VT6 и последующее отпираение транзистора VT7 в одном полупериоде этого напряжения, а уже в следующий он запирается и отпирается соответственно предыдущий. В итоге таким способом можно не допустить протекание сквозного тока через эти силовые МОП – транзисторы. При появлении аварийной ситуации элементы DA4.2 и DD1.2 выполняют защитную функцию, не допуская протекать сверхбольшим токам. Так на резисторе R27 протекающий ток будет создавать падение напряжения, которое потом 75 подаётся на DA4.2. Резистор R24 принимает требуемое напряжение со второго входа. И на JK – триггере DD1.2 появляется напряжение при превышении опорного на компараторе. Далее загорается светодиод HL2 при появлении напряжения на выходе Q и подаётся таким образом сигнал об аварии. На элементах DD2.1 и DD2.2 блокируется прохождение импульсов соответственно диодом VD5, когда на инверсном выходе самого триггера напряжение приближается к потенциалу общей шины. В итоге силовые транзисторы закрываются. Чтобы запустить инвертор при аварии нужно нажать кнопку S2. В этом случае в исходное состояние возвратится триггер DD1.2. Чтобы запустить само устройство надо нажать на кнопку S1, тогда произойдёт обрыв цепи диода VD6 на общую шину и импульсы смогут пройти на выходы элементов DD2.1 и DD2.2. Если её нажать повторно, то устройство отключится. Об исправности инвертора и информации о подключении к нему аккумуляторов служит светодиод HL1. А с помощью интегрального стабилизатора DA2 и транзистора VT1 нормализуется электропитание управляющего узла.

Была рассмотрена схема полупроводникового преобразователя, которую можно применить в ветроэнергетической установке. Данное устройство может обеспечивать нагрузку мощностью до 300 Вт. Данная нагрузка небольшая, но тем не менее к ней можно подключать небольшой

мощности устройства. Далее рассмотрим в каких режимах работы функционирует подобное устройство.

3.2 Анализ режимов работы полупроводникового преобразователя

Для начала нужно разобраться какие рабочие режимы работы есть у инвертора. У любого подобного устройства есть три основных режима работы, которые указываются производителем в характеристиках:

1. Номинальный режим или по другому длительный режим;
2. Режим максимальной мощности или по другому режим перегрузки;
3. Режим пиковой мощности или по другому пусковой режим.

Более подробно рассмотрим каждый режим. Первый режим работы – номинальный, в этом случае прибор должен работать на свою номинальную мощность в течение неограниченного промежутка времени. Например если у нас есть инвертор на 1 кВт, то его номинальная мощность может быть порядка 600 Вт. Режим максимальной мощности предполагает, что устройство должно отработать не менее получаса, когда потребитель начинает потреблять энергии больше номинала на 30% и более. Например если у нас инвертор на 1 кВт, то это как раз и есть его максимальная мощность работы, так как номинал его может составлять 600 Вт. При более длительном превышении этого значения максимальной мощности устройство уйдёт в защиту. И режим пиковой мощности или проще говоря пусковой режим, в этом случае устройство должно будет работать если номинал устройства превышен в 2 раза или на 200% в течение нескольких секунд. Такое явление может вызвать, например пуск холодильника, заряд ёмкости и т.д. Большинство инверторов весьма хорошо выдерживают большие пусковые

токи, так как в основном делаются с небольшим запасом по мощности и построены на хорошей компонентной базе.

Далее рассмотрим как будем моделировать схему 3.1.1. Для простоты и наглядности моделирования уберём нижнюю часть защиты от короткого замыкания, JK-триггер и компараторы DD2.1, DD2.2, стабилитрон D2 и транзистор VT1 с верхней обвязкой элементов. При моделировании будем подразумевать что исследуемое устройство постоянно получает энергию от источника постоянного напряжения на контактах $\pm 12\text{В}$. Не будут учитываться аварийные условия и соответственно экстренное отключение. На нагрузке будут элементы имитирующие реальную нагрузку потребителя в зависимости от подключения которой будут показаны и проанализированы режимы работы преобразователя.

а) Режим номинальной мощности.

Для моделирования данного режима подключим в нагрузку резистор сопротивление 2.5 кОм, он и будет имитировать этот режим. Перед нагрузкой поставим сглаживающий конденсатор ёмкостью 1 мкФ, он поможет сгладить прямоугольные импульсы и сделать модифицированную синусоиду, похожую на реальную. На рисунке 3.2.1 приведём схему устройства в этом режиме работы.

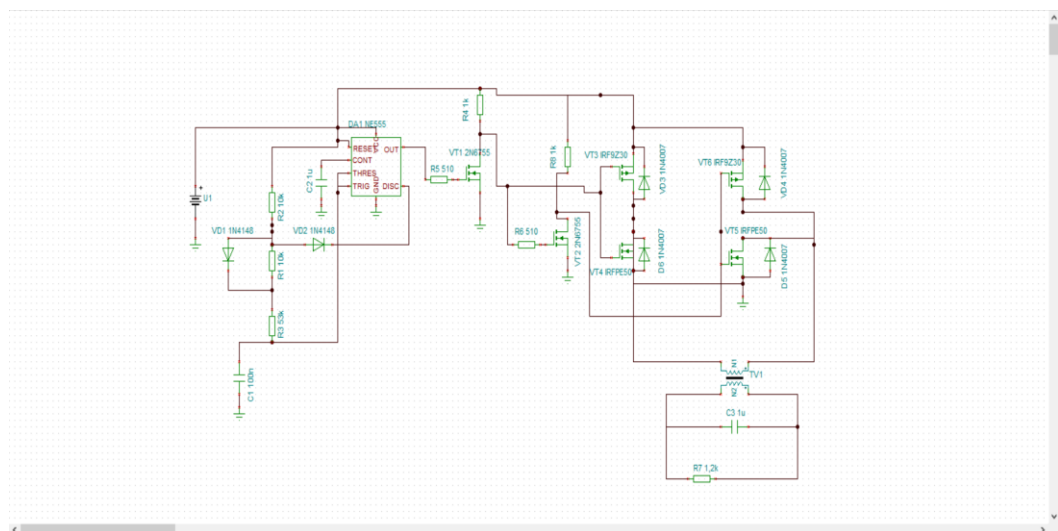


Рисунок 3.2.1 – схема инвертора в номинальном режиме работы.

Далее приведём график номинального режима, где покажем напряжение на нагрузке и рассчитаем мощность измерив ток нагрузки. Мощность устройства этом режиме будет равна: $P = I \cdot U = 0,46 \times 220 = 101,2$ Вт. Здесь приняли что ток в среднем равен это значение и в среднем взяли такое напряжение. На рисунке 3.2.2 изобразим данный график.

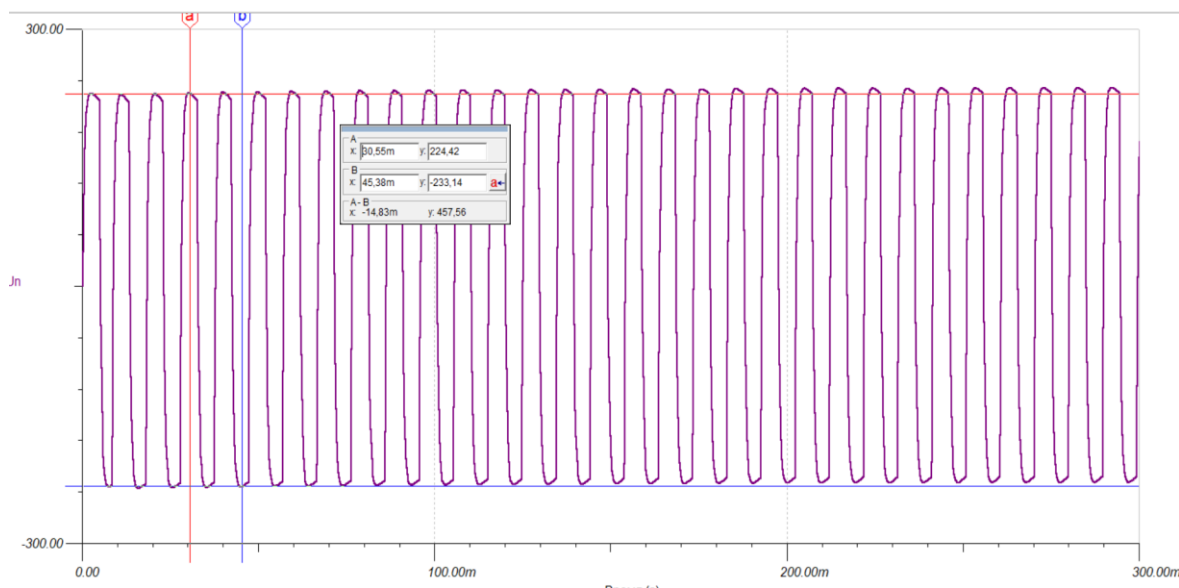


Рисунок 3.2.2 – график напряжения нагрузки инвертора.

Видим что напряжение выхода примерно 220В и 50Гц, задаваемые таймером DA1. В таком режиме в течении большого числа времени мощность не будет изменяться как и положено. Подобную мощность и КПД устройства задают силовые ключи VT3, VT4, VT5, VT6 от их выбора зависит выходная мощность преобразователя, в данном случае для примера мощность выхода получилась чуть выше 100Вт. От выбора параметров трансформатора TV1 также сильно зависит выходная мощность, а именно от числа витков на первичной и вторичной обмотках так как здесь и происходит повышение мощности.

б) Режим максимальной мощности

Чтобы смоделировать данный режим, необходимо увеличить выходную мощность инвертора на 30% и более от номинальной. Для этого поставим резистор на 400 кОм. Мощность в данном режиме тогда составит: : $P = I \cdot U = 0,46 \times 284 = 130 \text{ Вт}$. Ниже на рисунке 3.2.3 приведём получившуюся схему преобразователя в данном режиме.

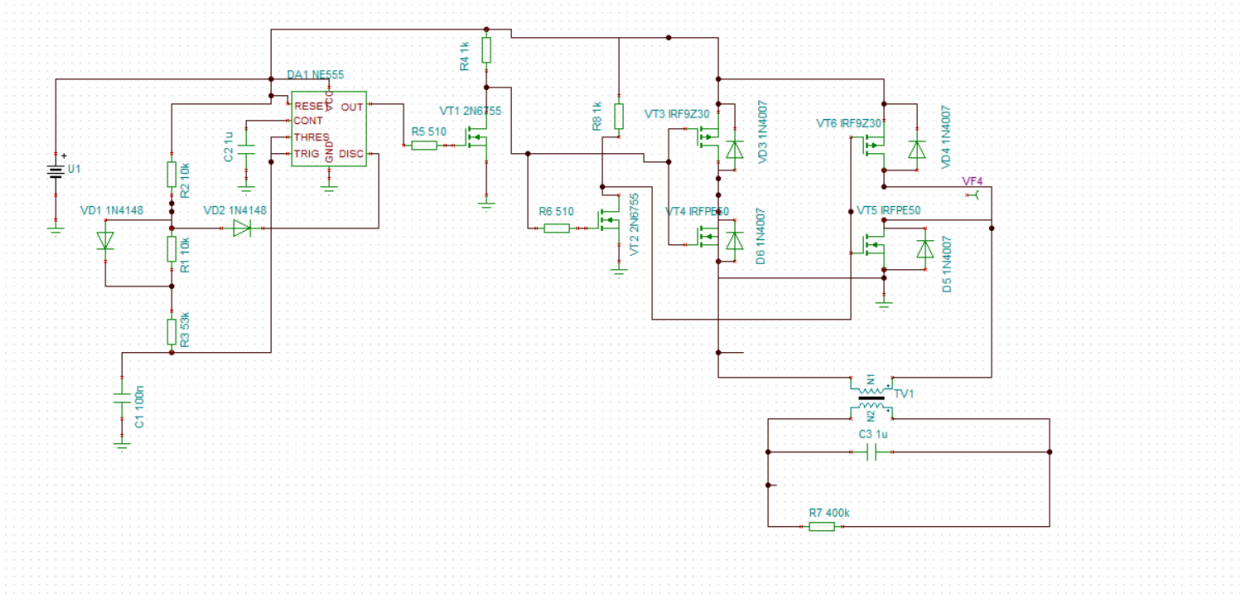


Рисунок 3.2.3 – Схема инвертора в режиме максимальной мощности

В таком режиме преобразователь должен по хорошему выдерживать повешенное на 30% и более напряжение в течение часа и более. Здесь именно от повышения нагрузки и зависит в основном повышение напряжения на ней и соответственно мощности, так как в данном случае параметры трансформатора и транзисторов неизменны. На рисунке 3.2.4 приведём график такого режима работы.

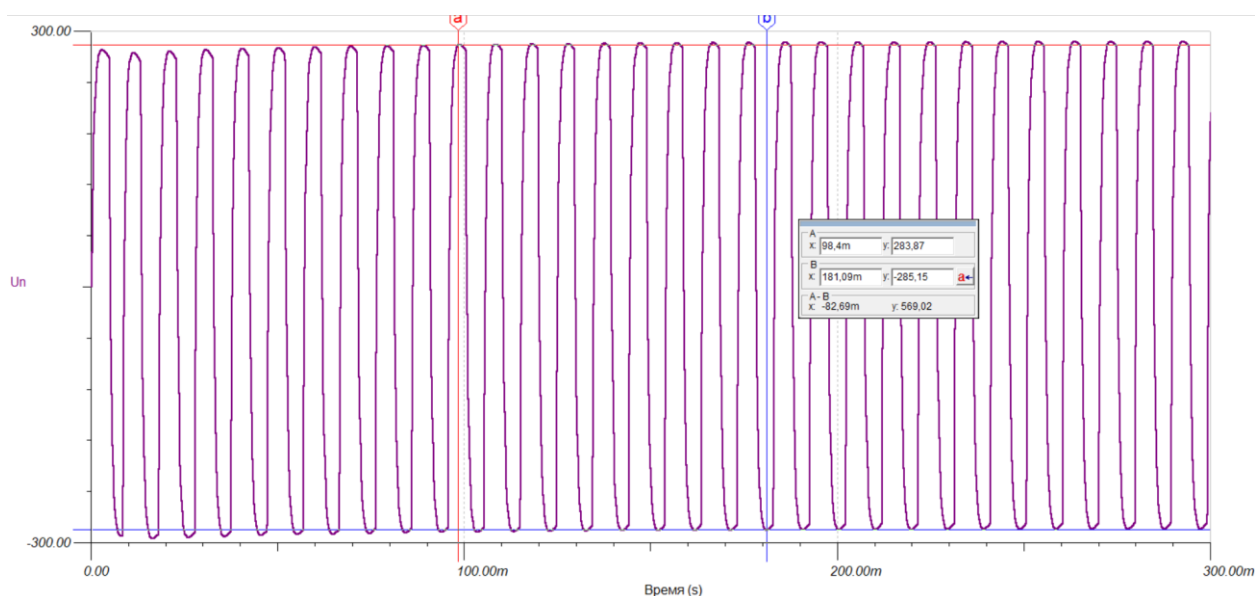


Рисунок 3.2.4 - График напряжения на нагрузке в режиме максимальной мощности.

Как видим из графика напряжение на нагрузке возросло на чуть более 30%. В целом при более длительном моделировании результат будет тем же. Лучше подобного случая желательно не допускать, так как может произойти выход устройства из строя, если например, подобраны не качественные транзисторы, которые много гасят на себе энергии что снижает КПД устройства или сработает защита и процесс снабжения энергии прекратиться. Также в таком режиме на силовых ключах будет выделяться большое количество мощности, что может привести к нагреву элементов. Целесообразно использовать преобразователь в таком режиме небольшое количество времени и не особо часто, чтобы возможно избежать проблем с его работой в будущем.

с) Режим перегрузки или пусковой режим работы

Для того чтобы смоделировать такой режим нужно добиться резкого роста мощности за короткий промежуток времени. Для этого поставим ключ SW1, открытие и закрытие которого будет моделировать такой скачок, также дополнительно поставим резистор номиналом 500 Ом. На рисунке 3.2.5 покажем получившуюся схему.

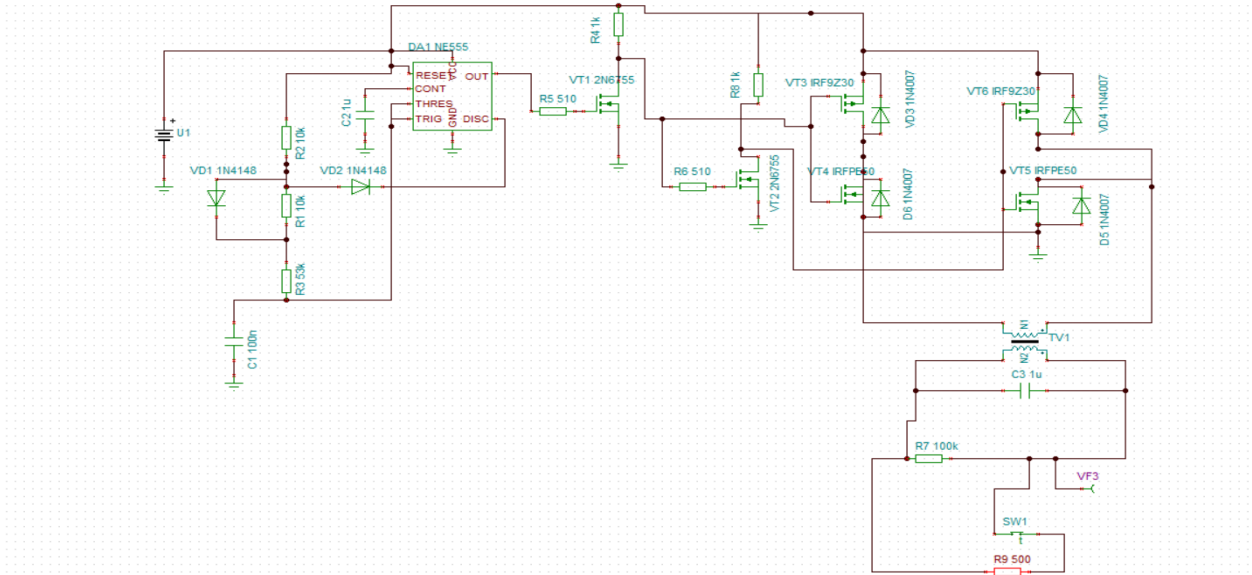


Рисунок 3.2.5 – Схема инвертора в пусковом режиме

По хорошему преобразователь должен выдерживать в течение пары секунд двухкратную перегрузку по мощности. В противном случае он уходит в защиту или вовсе может выйти из строя. На рисунке 3.2.5 покажем график напряжения на нагрузке в таком режиме.

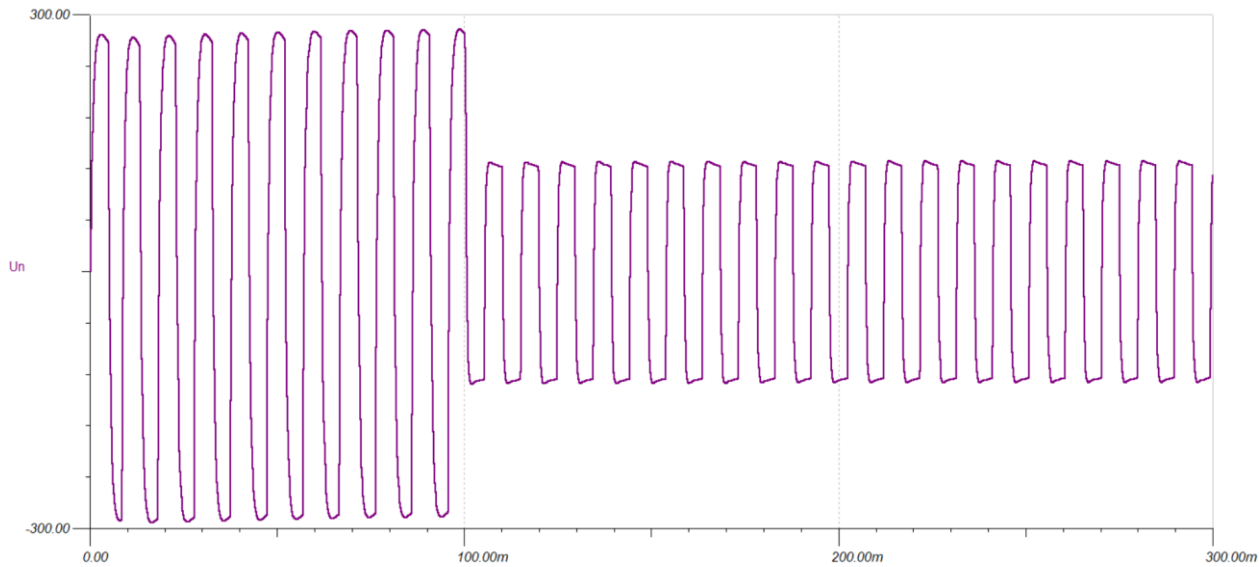


Рисунок 3.2.6 – напряжение на нагрузке в пусковом режиме

Как видно из графика идёт превышение напряжения в два раза. Здесь показано так как должно это быть на самом деле, однако в силу подобранных

элементов не вышло продемонстрировать полную мощность в таком режиме. Но для наглядности вполне достаточно. Такое изменение напряжения может вызвать наличие конденсаторов или индуктивностей в нагрузке. Они вызывают большие пусковые токи и напряжение, так как напряжение на конденсаторе и ток в индуктивности скачком измениться не могут. Не всегда однако существует гарантия того, что устройство может выдержать пусковые токи, по тем или иным причинам. Здесь был показан более идеализированный вариант работы устройства, в реальности оно может их и не выдержать.

Так были подробно рассмотрены основные режимы работы преобразователя, рассмотрены диаграммы напряжений на нагрузке. Стоит подчеркнуть что собранное здесь устройство в реальности, может быть расширено добавлением защиты по току и напряжению. Здесь была показана основа инвертора, доработав который можно получить нужный результат. Даже подобранные оптимальные компоненты в реальном устройстве не могут гарантировать его стабильную работу, так как есть поределённые нюансы. Но в основном подобные инверторы, применяющиеся в реальных автономных системах работают стабильно.

Выводы по третьему разделу

Сегодня именно автономные инверторы напряжения находят широкое применение в ветроэнергетических системах. Они хорошо себя проявляют тем, что сама форма напряжения задаётся в нагрузке, а форма тока самой нагрузкой. Также имеют возможность в широком диапазоне регулировать нагрузку. Так работая и в широких диапазонах изменения частоты (значит что не изменяет форму напряжения и его амплитуду на нагрузке), что заметно лучше чем другие подобные инверторы. В качестве примера был взят инвертор небольшой мощности, который можно применить в такой системе. В качестве среды моделирования была взята программа Tina TI, хотя изначально предполагалось взять матлаб. Она была выбрана из-за возможности выбора аналоговых особенностей у компонентов инвертора. Рассмотрели три основных режима работы преобразователя: номинальный режим, режим максимальной мощности и режим пиковой нагрузки. В первом режиме в моделировании была показана ситуация работы преобразователя где он должен работать неограниченно долго, а именно держать нагрузку, в данном случае получилось чуть выше 100 Вт. В следующем режиме было показано как инвертор может работать при превышении мощности чуть больше, чем на 30%. Здесь негативным фактором может оказаться выделяемая мощность в таком режиме, так как предполагается что прибор должен отработать более часа и дешёвые устройства не совсем могут держать такую нагрузку. В режиме пиковой мощности была показана диаграмма напряжения на нагрузке где и показано примерно двухкратное превышение номинала инвертора. Само устройство должно выдержать порядка пары секунд в таком режиме или в противном случае оно выйдет из строя или уйдёт в защиту. В основном чтобы получить большую выходную мощность необходимо добавить дополнительные пары силовых ключей или подобрать другие. От их выбора в основном и зависит работа устройства во всех режимах. Форма выходного напряжения - модифицированная

синусоида, которая может подойти для питания устройств не требовательных к выходной форме. Тем более что такое устройство относительно простое в устройстве и при должном умении можно его собрать самостоятельно.

Заключение

Понимание того, что традиционные источники энергии не вечны и рано или поздно полностью закончатся, заставило человечество стремиться искать новые источники. Ими стали возобновляемые источники энергии или например, атомная энергия. Нетрадиционные источники энергии нашли более широкое применение в основном в силу своей доступности и неисчерпаемости. К ним относят обычно энергию ветра, солнца, воды, геотермальную энергию. Энергия ветра и солнца получило наибольшее распространение среди остальных именно из-за своей доступности. Большой плюс использования таких источников это экологичность, которой нет у традиционных источников. Атомная энергия в целом тоже экологически безопасная считается при добыче, однако у АЭС есть свои крупные минусы – это в случае аварии может возникнуть серьёзная экологическая катастрофа и ещё проблема утилизацией ядерных отходов. Поэтому серьёзное развитие идёт именно альтернативных источников энергии, в разработки в этом направлении вкладываются значительные средства государством и частными компаниями. И в итоге в некоторых странах выработка электроэнергии например солнечными станциями или ветрогенераторами составляет больше половины. Также большой популярностью пользуются частные автономные энергетические системы. Это связано с тем что электроэнергия дорожает и платить больше не всегда хочется. На базе солнечных панелей и ветрогенераторов или по отдельности и собираются подобные энергосистемы. Более подробно рассматривается энергосистема на базе ветрогенератора. Сам ветрогенератор представляет из себя электромеханическое устройство, которое преобразует механическую энергию в электрическую. Есть два основных типа ветрогенераторов – горизонтально осевые и вертикально осевые. Ветрогенераторы горизонтально осевого типа наиболее распространённые в мире в силу своих основных качеств – высокого КПД, эффективности работы,

ремонтпригодности, простоты устройства. Есть однолопастные, двухлопастные, трёхлопастные и многолопастные ветрогенераторы. Широко используются именно трёхлопастные из-за оптимального коэффициента быстроходности и КПД. Многолопастные имеют широкую площадь использования ветра, но у них высокая инерция и стоимость. Двух и однолопастные имеют неоптимальный коэффициент быстроходности и высокую скорость вращения ротора, что приводит к преждевременному изнашиванию деталей механической части. Вертикально осевые ветрогенераторы в основном не находят широкого применения из-за своего низкого КПД. Есть ветрогенераторы с ротором типа Дарье, ротором Савониуса, ротором Н-типа, геликоидным ротором и многолопастным ротором. Такие устройства в силу своего устройства имеют невысокую мощность, что сильно ограничивает их использование в промышленности. Ветрогенераторы с геликоидным ротором более широко применяются, однако в силу своей сложности устройства имеют высокую стоимость самого ротора и его ремонт. Многолопастные тоже имеют высокую площадь использования ветра и КПД, однако их стоимость довольно большая. Другие вертикально-осевые ветрогенераторы тоже не имеют особо широкого применения. В целом, вся ветроэнергетическая отрасль является в последние годы бурно развивающейся в силу целесообразности использования подобных устройств в плане экологии и выработки дешёвой энергии, поэтому во многих странах ветроэнергетические электростанции обеспечивают электроэнергией целые большие города и процент этот только увеличивается. Любой ветрогенератор классифицируется по мощности, а именно большой мощности, средней мощности, малой мощности и очень малой мощности. Всё это регламентируется действующим ГОСТ Р 51990-2002. Ветрогенераторы большой и средней мощности используются для подключения большой нагрузки, из них создаются большие ветряные электростанции, которые могут обеспечить такую нагрузку. Малой и очень малой мощности ветрогенераторы в основном служат для обеспечения

небольшой нагрузки для отдельных потребителей или для снабжения электроэнергией в автономной системе, что довольно популярно. В двойне популярны гибридные решения по типу ветрогенератор и солнечная панель из-за надёжности подобной системы, когда например ветрогенератор остановится по причине отсутствия ветра, то энергию поможет вырабатывать именно солнечная панель или наоборот (есть также вариант использовать не солнечную панель, а дизель генератор). Это хорошо ещё и тем, что подобные системы не зависимы от общей сети и когда происходит сбой на электростанции, то потребителя это не затрагивает в отличие от других подключённых к общей сети. Так любой ветрогенератор управляется или по-другому имеет систему управления. На сегодня есть три наиболее распространённые – с контролируемой скоростью вращения ротора, с неконтролируемой скоростью вращения ротора и с машиной двойного питания в цепи ротора. Из них наиболее применяемые это с машиной двойного питания и с контролируемой скоростью вращения. Главным преимуществом системы управления на базе машины двойного питания является то, что ротор может поддерживать только 25-30% от номинальной мощности, следственно это снижает массо-габаритные показатели ветрогенератора, потери на преключение силовых ключей, тепловые потери из-за снижения общей его мощности. Одним из ключевых элементов в управлении является именно полупроводниковый преобразователь (инвертор), так как может менять напряжение и частоту на обмотках генератора. Поэтому от выбора инвертора и зависит КПД устройства в целом.

Моделирование на данный момент является основным инструментом для изучения различных процессов или объектов. Само моделирование используется в тех случаях когда изучение или исследования исходного объекта невозможно по тем или иным причинам. Также моделирование позволяет экономить большое количество времени и средств. Например в

областях точных наук, таких как астрономия, ядерная физика или химия. В той же астрономии описывать течение термоядерных реакций внутри звёзд или что образование новых «солнечных систем» по заданным параметрам, чтобы наблюдать процесс их зарождения в других частях космоса, что естественно реально опытным путём неосуществимо. В той же ядерной физике – это моделирование ядерных процессов протекающих в реакторах АЭС или взрыва атомной бомбы, что при штатных испытаниях очень дорогое и опасное предприятие. Также моделирование широко применяется в механике, физике, электроснабжении, радиотехнике и т.д. В некоторых случаях оно применяется казалось бы на первый взгляд не нужных случаях, например моделирование соединения труб, однако подобная операция в будущем положительно скажется на качестве продукта и поможет снизить затраты на разработку. Любая модель должна быть создана из расчёта простоты, равноценности и информативности, так как слишком большая модель может привести к ошибкам. Бывают как физические так и математические модели, но в основном используются математические модели, например для моделирования вольт-амперных характеристик биполярного транзистора. В MATLAB двумя основными библиотеками для моделирования является пакет Simulink и SimPowerSystem. Так в SimPowerSystem построение моделей и их моделирование почти тоже что и в симулинке, также между собой соединяются блоки линиями. Но есть и отличие, которое состоит в том, что те линии что используются в Simulink служат передатчиками сигнала между блоками, а в SimPowerSystem это виртуальные линии по которым протекает ток по аналогии с реальными. В целом и то и другое расширение является очень удобным при моделировании систем или устройств, а результаты получаются весьма информативными. Но стоит отметить, что именно в SimPowerSystem блоки более близки по результату моделирования к реальным устройствам, приборам или системам в энергетике и электротехнике, что можно положительно охарактеризовать, как огромный плюс. Если выделять эффективность MATLAB в плане

наличия функционала библиотек, то их работа, качество, количество и возможность создания самим различных блоков не должно вызывать сомнений при моделировании.

Инвертор в ветроэнергетической системе нужен, чтобы сделать постоянное напряжение, переменным сетевым 220В 50Гц. Есть два основных типа инверторов – автономные и ведомые. Ведомые инверторы обычно работают в сети переменного напряжения, где именно сама сеть определяет его форму, частоту и величину. Автономные же работают вне зависимости от сети переменного тока в собственной замкнутой системе. В работе рассматривается именно автономный инвертор. Есть автономные инверторы напряжения, тока и частоты. Среди них наиболее применимым является именно АИН, хороши тем, что форма напряжения задаётся в нагрузке, а форма тока самой нагрузкой и могут регулироваться в широком диапазоне частот. В рассмотренной схеме преобразователя использовался именно инвертор напряжения. Он работает в трёх ключевых режимах – номинальном, максимальном и перегрузки. В первом происходит работа на номинальную мощность, которую преобразователь может поддерживать в течение неограниченного времени. В номинальном режиме преобразователь работает на превышение номинала на 30% и более и должен проработать в таком режиме более часа. В пусковом режиме устройство должно в течение пары секунд выдержать превышение номинальной мощности в 2 раза. Для того чтобы наглядно показать была взята оригинальная схема и максимально упрощена для простоты моделирования. Была выполнена модель в программе Tina TI, так как матлаб не учитывает аналоговых возможностей компонентов. В результате моделирования были показаны графики напряжения на нагрузке в каждом режиме и рассчитана мощность. Выходная мощность зависит в основном от правильности подбора силовых ключей и может быть увеличена их дополнительным добавлением. Нагрузка при моделировании использовалась активная для наглядности полученных

результатов. Форма напряжения модифицированная синусоида, полученная использованием сглаживающего конденсатора. Генератор 555 генерирует импульсы прямоугольной формы, частотой 100Гц, где она в последствии делится делителем пополам. Смоделированное устройство может использоваться в автономной системе, однако придётся добавить защиту по току и напряжению так как для моделирования устройства была использована упрощённая версия.

Список используемой литературы и источников

1. Автономные инверторы : учебное пособие / Д.Н. Томашевский.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.— 120 с.
2. Алексеевский Д.Г., Прокопеня О.Н., Панкова О.О., Манаев К.В. Математическая модель экспериментальной ветроэнергетической установки // Вестн. брестского гос. техн. ун-та. Машиностроение. 2017. № 4 (106). С. 40 – 43.
3. Безруких П. П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России // СПб.: Наука.2015. 314с.
4. Вертикальный ветрогенератор – особенности конструкций разного типа и самостоятельное изготовление. URL: <https://elektrik-a.su/elektrooborudovanie/generatory/vertikalnyj-vetrogenerator-1796>. (дата обращения 10.08. 2020).
5. Ветроэнергетика: в России, в мире, перспективы, плюсы, минусы. URL: <https://alter220.ru/veter/vetroenergetika.html>. (дата обращения 11.03.2021).
6. Владимир Сидорович Ветроэнергетика Европы в 2019 году. Итоги URL: <https://renen.ru/vetroenergetika-evropy-v-2019-godu-itogi/>. (дата обращения 08.09.2020).
7. Гордиевский Е.М., Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Соломин Е.В. Разработка имитационной модели мобильного энергокомплекса на базе ВИЭ в программе MATLAB // Вестн. ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 31. С. 51 – 71.
8. Горизонтальные ветрогенераторы разных типов. URL: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/338-gorizontalnye-vetrogeneratory.html>. (дата обращения 11. 07. 2020).

9. Дьяконов, В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала / В.П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 576 с.
10. Елистратов В. В. Ветроэнергоустановки. Автономные ветроустановки и комплексы : учеб. пособие. СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. 101 с.
11. Жолудева Ю. К., Мальцев М. В. Математическая модель ветрогенератора // Научный альманах. 2017. №4-3(30). С. 63 – 67.
12. Ирина Бесхлебная Ветрогенератор с горизонтально осью вращения: преимущества и недостатки. URL: <https://imerica.ru/sekrety-i-fakty/gorizontalnyj-vetrogenerator-2.html>. (дата обращения 07.09.2020).
13. Как устроены мощные промышленные ветрогенераторы. URL: <https://oooevna.ru/kak-ustroeny-mosnye-promyslennye-vetrogeneratory/>. (дата обращения 16.07.2020).
14. Коробатов Д.В., Козлов С.В., Сироткин Е.А. Историко-экономический анализ ветроэнергетических установок и систем управления: междунар. науч. журн. «Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15-18. С. 54-66.
15. Крамской Ю. Г. Применение силовой электроники при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ и особенности их интеграции в электрические сети. URL: http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b4_rus/events/08Крамской Доклад%20081216+.pdf. (дата обращения 24.07.2020).
16. Крыльцов С.Б., Пудкова Т.В. Обзор современных топологий силовой части ветрогенераторов большой мощности // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/12/75301>. (дата обращения 02.04. 2020).

17. Куклин В.Д. Сравнительный анализ данных, полученных в результате моделирования ВЭУ с применением СМЗ // Молодежь и системная модернизация страны. 2019. С. 57 – 59.
18. Лукутин Б. В., Сипайлов Г. А. Использование механической энергии возобновляемых природных источников для электроснабжения автономных потребителей. – Фрунзе : Илим, 1987. – 135 с.
19. Лукутин Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Томский политехнический университет, 2015.— 120 с.
20. Малышев Н. А. Ветроэлектрические станции / Н.А. Малышев, В.М. Лятхер. — М. Энергоатомиздат, 1988. — 165с.
21. Медведев, В.А. Конструирование преобразователей : электронное учеб. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 оптический диск.
22. Могиленко А. В. Ветроэнергетическая отрасль Европы: итоги 2019 года URL: <https://www.eprussia.ru/epr/386/4513980.htm>. (дата обращения 16.06. 2020).
23. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: нац. аэрокосм. ин-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. тех. ун-т, 2004. – 519с.
24. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: нац. аэрокосм. ин-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. тех. ун-т, 2003. – 400с.
25. Обухов С. Г. Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор// Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. №3. 88 с.

26. Основные виды ветрогенераторов: вертикальные, горизонтальные. URL: <https://tcip.ru/blog/wind/osnovnye-vidy-vetrogeneratorov-vertikalnye-gorizontalnye.html>. (дата обращения 15.02. 2020).
27. Плюсы и минусы вертикальных ветрогенераторов, их виды и особенности. URL: <http://electricadom.com/plyusy-i-minusy-vertikalnykh-vetrogeneratorov-ikh-vidy-i-osobennosti.html>. (дата обращения 04.07.2020).
28. Построение системы управления и диагностики генераторами ветровой электростанции URL: <http://masters.donntu.org/2006/eltf/bosov/diss/index.htm>. (дата обращения 04. 01.2021).
29. Развитые страны лидеры по установленной мощности ветровых электростанций. —URL: <https://energo.house/veter/strana-lider-ves.html>. (дата обращения 18.02. 2021).
30. Сироткин Е.А. Особенности технологии управления ветроэнергетическими установками // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й науч. конф. 2016. С. 849 – 858.
31. Соломенкова О. Б. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МОДУЛЯ МУЛЬТИМОДУЛЬНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5976>. (дата обращения 14. 02. 2020).
32. Солоницын, А.А. Второе пришествие ветроэнергетики. /А. А. Солоницын // Сайт «Изобретатели».— М.2007.—18 с.
33. Структурные особенности построения прецизионной системы управления ветрогенератором / А. М. Айтулина, В. П. Ивель, Ю. В. Герасимова, Н. Б. Калиаскаров. — Текст : непосредственный // Технические науки в России и за рубежом : материалы VIII Междунар.

- науч. конф. (г. Краснодар, июнь 2019 г.). — Краснодар : Новация, 2019. — С. 17-19.
34. Технические науки в России и за рубежом / VIII Междунар. науч. конф. (г. Краснодар, июнь 2019 г.) / [под ред. И. Г. Ахметова и др.]. — Краснодар : Новация, 2019. — iv, 34 с.
 35. Томашевский Д. Н. Автономные инверторы : учебное пособие / Д.Н. Томашевский.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.— 120 с.
 36. Черных, И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. / Под общ.ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.
 37. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
 38. Что такое инвертор напряжения, как он работает, применение инвертора. URL: <http://electricalschool.info/electronica/1889-что-такое-invertor-napriazhenija-kak.html>. (дата обращения 09.05. 2020).
 39. Янсон, Р. А. Ветроустановки: учеб. пособие. М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2017. 37 с.
 40. A. Bouscayrol, B. Francois, P. Delarue, and J. Niiranen, “Control implementation of a five-leg ac–ac converter to supply a three-phase induction machine,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 1, pp. 107–115, Jan. 2005.
 41. D. Zhou, J. Zhao, and Y. Li, “Model-predictive control scheme of five-leg ac–dc–ac converter-fed induction motor drive,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 7, pp. 4517–4526, Jul. 2016.
 42. F. Spinato, P. J. Tavner, G. J. W. V. Bussel, and E. Koutoulakos, “Reliability of wind turbine subassemblies,” IET Renewable Power Gener., vol. 3, no. 4, pp. 387–401, Dec. 2009.

43. G. S. Buja and M. P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter-fed ac motors—A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 744–757, Aug. 2004.
44. U. M. Choi, F. Blaabjerg, and K. B. Lee, "Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 2517–2533, May 2015.

Приложение А

Особенности аэродинамики, регулирования и систем передачи мощности ветродвигателей классифицируемых ВЭУ

Особенности аэродинамики, регулирования и систем передачи мощности ветродвигателей классифицируемых ВЭУ

А.1 Механические ВЭУ

Ветронасосные ВЭУ в зависимости от быстроходности ВД и типа насоса характеризуются большим разнообразием применяемых систем передачи мощностей (СПМ).

При пневматической СПМ ВК приводит во вращение компрессор, а сжатый им воздух используют для привода насосов или непосредственно для подъема воды. В первом случае между компрессором и насосом устанавливают пневматический двигатель (турбину), во втором — сам воздух используют в качестве рабочего тела, осуществляющего подъем воды путем ее вытеснения (насосы замещения) или эжектирования.

Электрическая СПМ обычно состоит из генератора, приводимого во вращение ВК, электрического двигателя насоса, питающих проводов, устройства регулирования напряжения, защиты генератора и двигателя от перегрева и токов короткого замыкания. Чаще всего используют трехфазные асинхронные генераторы переменного тока с самовозбуждением от конденсаторов короткозамкнутого асинхронного двигателя центробежного насоса и быстроходные (двух- и трехлопастные) ВД. Запуск электродвигателя насоса осуществляют одним из трех способов: подключением двигателя к возбужденному генератору, работающему на холостом ходу; замыканием цепи возбуждения генератора, к зажиму которого заранее присоединен двигатель; частотным пуском двигателя. При этом перед пуском двигатель должен быть присоединен к зажимам генератора, а генератор должен начинать работать при замкнутой цепи возбуждения.

Механические СПМ применяют чаще всего для привода поршневых, штанговых насосов, а также ковшовых и ленточных водоподъемников от ВД малой быстроходности, обладающих большим моментом страгивания. Для привода водоструйных насосов и водоподъемников инерционного типа используют ВД большой быстроходности.

Ветросиловые ВЭУ агрегируют с рабочими машинами только посредством механических СПМ с отбором мощности от нижнего редуктора. Применяют ВД разной быстроходности с различными способами регулирования частоты вращения ВК. Основное требование к системе регулирования — надежное ограничение

частоты вращения ВК во всем рабочем диапазоне скоростей ветра на уровне, определяемом прочностью конструкции ВК. Суммарная нагрузка регламентируется на уровне номинальной путем подключения в работу части рабочих машин.

А.2 Электрические ВЭУ постоянного тока (ветрозарядные, гарантированного и негарантированного питания)

Ветрозарядные ВЭУ работают только на заряд аккумуляторных батарей (АБ) и могут иметь несколько систем АБ, каждая из которых поочередно работает в режиме заряда и разряда (когда одна система АБ питает нагрузку, другая заряжается). Выполняют установки обычно по безредукторной схеме с применением быстроходных ВД и генераторов переменного тока. Такие установки снабжают простейшей автоматикой, обеспечивающей автоматическое переключение АБ с одного режима работы на другой и их защиту от перезаряда и глубокого разряда.

ВЭУ гарантированного питания работают параллельно с АБ. Исходя из этого, они снабжаются специальными системами автоматического управления, обеспечивающими работу ВЭУ в зависимости от изменения скорости ветра и внешней нагрузки в каждом из следующих режимов:

- 1) ветроагрегат (ВА) питает внешнюю нагрузку без АБ;
- 2) ВА заряжает АБ без внешней нагрузки;
- 3) ВА заряжает АБ и одновременно питает внешнюю нагрузку;
- 4) ВА и АБ работают параллельно на внешнюю нагрузку;
- 5) АБ питает внешнюю нагрузку без ВА.

Таким образом, АБ работает в смешанном режиме, переходящем с режима заряд—разряд в периоды отсутствия внешней нагрузки или ветра на режим постоянного подзаряда (буферный режим) при наличии достаточного ветра и внешней нагрузки.

ВЭУ негарантированного питания работают без АБ вместе с блоком управления, обеспечивающим стабильное напряжение на выходе. Такие ВЭУ имеют мощность от нескольких десятков до нескольких сотен ватт. ВК устанавливаются непосредственно на вал генератора.

Во всех случаях установки этого типа должны иметь системы регулирования частоты вращения ВК. Никаких специфических требований к аэродинамике ВК не предъявляют. Мощность внешней нагрузки регламентируется — она не должна превышать номинальную мощность ВЭУ.

А.3 Электрические ВЭУ переменного тока (автономные, гибридные и сетевые)

Принципы их использования и способы управления отличаются друг от друга. В первом случае ВЭУ рассчитывают для работы изолированно на собственную электрическую сеть с целью снабжения энергией заданного потребителя; во втором — для работы параллельно с другими энергетическими установками соизмеримой мощности (дизель-генераторы, малые ГЭС и др.) на общую, ими образованную, сеть; в третьем — для работы непосредственно на электрическую сеть несоизмеримо большей мощности. Эффект несоизмеримо большей мощности здесь реализуется при отношении $N_c/N_{ВЭУ}$ свыше 8—10, независимо от их абсолютных значений.

Особенностью всех установок ВЭУ этой группы при применении соответствующего регулирования ВК и определенной системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ), обеспечивающей преобразование механической энергии вращающегося ВК в электрическую энергию промышленной частоты и напряжения, является то, что они могут эксплуатироваться в двух режимах: при переменной частоте вращения ВК, что позволяет получить максимально возможную выработку энергии, и при постоянной частоте вращения ВК, что позволяет упростить СГЭЭ при некотором уменьшении выработки энергии. Режим переменной частоты вращения ВК используют при скоростях ветра меньших расчетного значения ($v < v_p$), а режим постоянной частоты вращения ВК — либо во всем диапазоне рабочих скоростей ветра, либо только при $v \geq v_p$.

В установках автономного типа мощность нагрузки потребителя строго регламентируют. Она не должна превышать номинальную мощность ВЭУ. Поэтому статической перегрузки трансмиссии по моменту вращения при $v > v_p$ не будет.

Никаких специальных требований к аэродинамике ВЭУ не предъявляют. Режим постоянной частоты вращения ВК обеспечивается регулятором частоты вращения ВК, а режим переменной частоты вращения ВК — системой СГЭЭ с использованием балластного сопротивления. Системные и сетевые установки на режимах постоянной частоты вращения ВК при скоростях ветра $v > v_p$ могут развивать мощность, превышающую их номинальные значения, но чтобы избежать возможные перегрузки, они, кроме системы регулирования частоты вращения ВК, должны иметь еще и системы ограничения мощности.