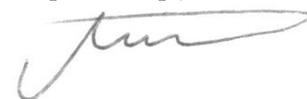


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)

*На правах рукописи*



Мартьянов Андрей Сергеевич

**Исследование алгоритмов управления и  
разработка контроллера ветроэнергетической  
установки с вертикальной осью вращения**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические  
комплексы и системы»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., доцент Соломин Е. В.

Челябинск – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Состояние вопроса и задачи исследования .....</b>	<b>12</b>
1.1 Актуальность работы .....	12
1.1.1 История развития ветроэнергетики .....	12
1.1.2 Направление развития малой энергетики .....	18
1.2 Управление мощностью ветроэнергетических установок .....	19
1.2.1 Управление мощностью при постоянной частоте вращения .....	22
1.2.2 Управление мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ветроколеса переключением обмоток генератора.....	23
1.2.3 Управление мощностью ВЭУ изменением передаточного отношения редуктора-мультипликатора ветродвигателя .....	24
1.2.4 Управление мощностью ВЭУ изменением установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса.....	26
1.2.5 Работа ВЭУ при переменной частоте вращения ветроколеса .....	27
1.3 Выводы по главе .....	28
<b>2 Разработка компьютерной модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования .....</b>	<b>30</b>
2.1 Модель ветра как источника энергии для ветроэнергетической установки .....	34
2.2 Математическое описание ветроколеса ВЭУ .....	36
2.3 Описание модели электрического генератора ветроэнергетической установки.....	38
2.4 Разработка модели управляющего контроллера .....	45
2.5 Моделирование накопителя электрической энергии .....	51

2.6	Синтез универсальной компьютерной модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования .....	59
2.7	Выводы по главе .....	60
<b>3</b>	<b>Исследование компьютерной модели и выбор оптимального способа управления мощностью ветроэнергетической установки.....</b>	<b>62</b>
3.1	Разработка методики измерения эффективности ВЭУ.....	62
3.2	Исследование различных способов регулирования.....	77
3.2.1	Работа при постоянной частоте вращения .....	81
3.2.2	Работа при нескольких частотах вращения переключением обмоток генератора .....	89
3.2.3	Работа при нескольких частотах вращения переключением передаточного отношения мультипликатора ..	95
3.2.4	Работа при переменной частоте вращения ветроколеса ВЭУ .....	101
3.2.5	Результаты сводного тестирования .....	107
3.3	Разработка алгоритма управления .....	112
3.4	Выводы по главе .....	116
<b>4</b>	<b>Разработка и испытания универсального контроллера ВЭУ ..</b>	<b>117</b>
4.1	Разработка универсального контроллера ВЭУ .....	117
4.2	Разработка программы сбора данных .....	132
4.3	Анализ результатов испытаний ветроэнергетической установки с универсальным контроллером .....	134
4.4	Выводы по главе .....	142
	<b>Заключение .....</b>	<b>143</b>
	<b>Список сокращений .....</b>	<b>145</b>
	<b>Список рисунков .....</b>	<b>146</b>
	<b>Список таблиц .....</b>	<b>151</b>

**Список литературы .....152**

**Приложение А Схемы электрические принципиальные кон-  
троллера ВЭУ .....170**

## Введение

**Актуальность темы.** Ветроэнергетика за последние несколько десятилетий выделилась в ряде стран в отдельные отрасли энергетических хозяйств, успешно конкурирующих с традиционной энергетикой. Основное внимание уделяется ветроэнергетическим установкам (ВЭУ) средней и большой мощности в составе сетей распределения и передачи электроэнергии. Однако в настоящее время мировой рынок малых ВЭУ также динамично развивается за счет массовых потребителей, к которым относятся объекты малоэтажного строительства, фермерские хозяйства, рыболовные артели и охотничьи угодья, системы удаленного мониторинга, дорожные осветительные системы, телекоммуникационное оборудование и другие автономные потребители электрической энергии. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является эффективное использование ветрового потенциала, которая заключается не только в улучшении аэродинамических характеристик ВЭУ, но и в увеличении производительности ВЭУ в целом.

Основной характеристикой, от которой зависит производительность ветроэнергетической установки, является коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) – отношение механической мощности ветроколеса к полной мощности набегающего потока ветра, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ. Таким образом, повышение КИЭВ во всех режимах эксплуатации ВЭУ путем совершенствования различных способов управления мощностью является актуальным, и этому вопросу посвящена предлагаемая работа.

**Степень проработанности вопроса.** Повышению производительности конструкций ВЭУ посвящено множество исследований известных ученых. Н.Е. Жуковский, Ю. Прандтль и А. Бетц создали теоретические основы, объясняющие основные принципы и закономерности работы ВЭУ. Предел Жуковского-Бетца обосновывает максимально возможный коэффициент использования энергии ветра в ВЭУ, что представляет собой цель разработчиков ветроэнергетических систем. Исследованиями различных путей достижения этой цели занимались Н.В. Красовский,

Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев, В.Н. Андриянов, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, О.С. Попель, В.М. Лятхер и другие. Задачей увеличения производительности ВЭУ за счет совершенствования способов и алгоритмов управления занимались Ю.Г. Шакарян, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, из зарубежных ученых следует выделить работы ученых Н. Bindner, А. Rebsdorf, W. Byberg, R. Hoffmann, O. Carlson, J. Nylander, H. Beyer, которыми исследованы различные способы управления. Таким образом, синтез и исследование алгоритмов управления мощностью ВЭУ являются актуальным направлением научной проблемы повышения производительности и снижения затрат на генерирование энергии, решение которой имеет научное и практическое значение.

**Объект исследования** — электротехнический комплекс на основе ветроэнергетической установки, состоящий из ветродвигателя, электрического генератора, накопителя электрической энергии и контроллера ветроэнергетической установки, использующийся в качестве изолированной системы электроснабжения.

**Предмет исследования** — влияние способов и алгоритмов управления ветроэнергетической установкой, работающей в условиях переменной скорости ветра, на ее производительность.

**Цель диссертационной работы** — разработка алгоритма управления и контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения с подтверждением результатов теоретических исследований натурными экспериментами.

Основываясь на цели исследования, сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать имитационную компьютерную модель ВЭУ с возможностью задания произвольных алгоритмов управления для исследования производительности ВЭУ в зависимости от различных способов управления и проверить ее адекватность численными экспериментами.

2. С помощью численных экспериментов над разработанной моделью ВЭУ исследовать производительность ВЭУ при применении различных способов и алгоритмов управления ветроэнергетической уста-

новкой. На основе результатов численных экспериментов разработать алгоритм управления мощностью ветроэнергетической установки, обеспечивающий высокую производительность ВЭУ при работе в широком диапазоне скоростей ветра.

3. Для проведения натуральных экспериментов разработать методику определения КИЭВ ветроэнергетической установки в условиях переменной скорости ветра.

4. Разработать и испытать контроллер ветроэнергетической установки с возможностью задания алгоритма управления мощностью ВЭУ на языке высокого уровня. Сравнить результаты натуральных испытаний контроллера ветроэнергетической установки с результатами модельных экспериментов.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использованы математический аппарат теории автоматического управления, методы математического моделирования, программный пакет MATLAB/Simulink, а также языки программирования высокого уровня C++ и Object Pascal.

**Научные положения, выносимые на защиту и их научная новизна:**

1. Предложена имитационная компьютерная модель ветроэнергетической установки, отличающаяся наличием модуля управляющего контроллера изменяемой конфигурации, задаваемой на языке высокого уровня, и предназначенная для исследования особенностей алгоритмов и способов управления ВЭУ при различных внешних воздействиях.

2. Предложена методика определения производительности ветроэнергетических установок, отличающаяся применением редуцированного наблюдателя и обеспечивающая определение КИЭВ при непрерывно изменяющейся скорости ветра.

3. Предложен алгоритм управления ветроэнергетической установкой, отличающийся использованием редуцированного наблюдателя для определения аэродинамического момента ветроколеса и предназначен-

ный для максимизации генерируемой мощности ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов** базируется на использовании известных положений механики, аэродинамики, электромеханики, теории автоматизированного управления, методов моделирования с применением ЭВМ, и подтверждается результатами экспериментальных исследований опытных образцов.

**Практическая значимость** диссертационной работы:

– представлены результаты исследований влияния способов управления мощностью ВЭУ на производительность, полученные модельными экспериментами и продемонстрировавшие особенности работы каждого способа;

– разработана программа для дистанционного мониторинга и регистрации информации о производительности ветроэнергетической установки, обеспечивающая передачу данных на удаленный сервер для последующей обработки;

– разработан контроллер ветроэнергетической установки, обеспечивающий эффективное использование ветрового потенциала при работе в широком диапазоне скоростей ветра, который успешно прошел испытания и используется в Центре Коллективного Пользования ЮУрГУ «Ветроэнергетический комплекс»;

– результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе ФГБОУ ВПО «Южно–Уральский государственный университет» (НИУ) (г. Челябинск), ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург), Государственном университете Северной Калифорнии (г. Беркли, США), в исследованиях Национальной Лаборатории Лоуренс Беркли (США) через МНТЦ (РФ), Соглашение 2568р (LBNL-T2-0203 (2003 – 2006) и через АФГИР (РФ), Соглашение RUE-2-010620-CN-06 (2006 – 2009). На основе предложенных схем, алгоритмов управления и программного обеспечения разработана и внедрена система управления ветроэнергетической установкой, которая успешно прошла полевые испытания на предпри-

иях ООО «Промэнерго», г. Челябинск; ООО «Краст», г. Челябинск; фермерское хозяйство «Марково-1», Троицкий район Челябинской области; «Ташьян Тауэрс», Фресно, США 2011 г.; «Грин Вэйв», Акита, Япония, 2013 г.

Исследования и разработки были поддержаны грантами Министерства образования и науки РФ ГК 02.516.11.6188 (2009 – 2010 гг.), ГК 02.516.11.6186 (2010 – 2011 гг.), соглашениями 14.В37.21.1226 и 14.516.12.0007 (2012 – 2013 гг.), грантами РФФИ (2011 – 2013 гг.), грантами МНТЦ (соглашение RUE-2-010620-СН-06 2009 – 2012 гг.), гос. субсидиями RFMEFI57714X0069 (2014–2015 гг.) и RFMEFI57714X0154 (2014–2015 гг.).

**Апробация работы.** Основные результаты исследования были представлены и обсуждены на:

- ежегодных научно-технических конференциях кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии ЮУрГУ в 2009 – 2015 гг.;

- научно-технических конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ в 2009 – 2015 гг.;

- научно-технических советах ООО «ГРЦ-Вертикаль» и ООО «Промэнерго»;

- международном совещании Фонда им. Г.Бёлля и круглом столе «Возобновляемая энергетика: Время перемен. Возможности для региона», г. Екатеринбург, 2013 г.;

- VIII международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки», с. Непряхино, Челябинская область, 2013 г.;

- во время стажировки в Университете Калифорнии, г. Фресно (США), 2011 г.;

- во время стажировки в Лаппеенрантском технологическом университете (Финляндия), 2012 г.;

- на международной конференции «Грин Вэйв», Акита (Япония), 2013 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа [12; 40; 42; 65—68; 86; 88; 89; 92; 94—98; 106; 109; 110; 122; 127], в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК [12; 40; 42; 65; 67; 68; 92; 95—98]. Получено 2 патента РФ на полезную модель [106; 110], 1 патент на изобретение [109], 1 ноу-хау [122].

**Личный вклад автора.** Автором определено направление исследования, сформулированы цель и задачи исследования, проведен анализ достижений в области исследования. Выбраны методы и средства проведения исследования, разработаны математические модели, использованные в исследовании. Разработка конструкции экспериментального образца системы управления и проведение испытаний выполнялись при непосредственном участии автора.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **174** страниц текста с **82** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **144** наименования.

**Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы:**

в части формулы специальности — «...исследования по общим закономерностям преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии и электротехнической информации, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем... В рамках научной специальности объектами изучения являются электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии... Электротехнические комплексы и системы ... могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы и должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование этих систем в широком диапазоне внешних воздействий.»

в части области исследования — п.1. «...математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.» п.2. «Обоснование совокупности технических,

технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем.» п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.» п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.»

## ГЛАВА 1

### Состояние вопроса и задачи исследования

В первой главе проведен исторический обзор развития ветроэнергетики, обозначены основные направления развития, определены ключевые вопросы и задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации ветроэнергетических установок.

#### 1.1 Актуальность работы

##### 1.1.1 История развития ветроэнергетики

История использования человеком энергии ветра относится к глубокой древности, и первые упоминания об этом появляются уже примерно за тысячу лет до нашей эры. 2500 лет назад в Египте уже применялись паруса и ветряные мельницы[141]. Вплоть до XIX века нашей эры ветряная мельница и парус, наряду с водяным колесом, были единственными двигателями, используемыми человеком в его жизнедеятельности.

Страны, прилегающие к морям, развивали плавучие средства, увеличивали их размеры, грузоподъемность, плавучесть, от весла перешли к парусу, который стал основным двигателем морских плавучих средств. Парус настолько был усовершенствован, что все военно-морские флоты морских держав были оснащены парусами, с помощью их совершались морские походы, сражения и дальние плавания, которые нередко заканчивались открытием неведомых Европе стран и материков. С появлением первого парового двигателя и применения его на морских и речных судах, парус быстро утратил свое значение в военно-морском и коммерческом флотах.

Аналогичным образом развивалась ветряная мельница, которая появилась в Европе в начале XII века, сначала в Испании, потом в Германии[25]. Неподалеку от Потсдама сохранился остов деревянной ветряной мельницы, которой насчитывается 600 лет. Его хранят как историче-

скую ценность и свидетеля той эпохи, когда ветер впервые в Европе вращал громадные деревянные крылья, чтобы жернова растирали пшеничное зерно в муку. Особенно быстро внедрялась ветряная мельница в степных зонах, где мало рек, на которых в ту пору работали водяные мельницы с деревянными колесами.

У ветряных мельниц Египта ветряное колесо устанавливалось с одной стороны, откуда чаще дует ветер, остов мельницы был неподвижен[140]. В Европе ветряная мельница получила усовершенствование, начали поворачивать весь остов мельницы, чтобы поставить ветряное колесо на ветер[26; 31].

С ростом мощности росли размеры ветряного колеса и жерновов, сооружение мельницы стало громоздким и настолько тяжелым, что приспособление, которым поворачивалась козловая мельница, затрудняло поворот всего корпуса мельницы одним человеком, который управлял работой. Примерно в начале XVII века ветряная мельница в Европе получила новое усовершенствование: стали поворачивать только верхнюю часть конструкции — шатер, в котором размещалась зубчато-цепная передача, главный вал с ветроколесом, поворотным кругом и водилом, опущенным на землю для поворота шатра[26]. Такая мельница была названа шатровой. Конструкция шатровой мельницы быстро завоевала монополию среди других конструкций ветряных мельниц благодаря большому диаметру ветряного колеса и увеличению мощности.

По всей Европе и в России широко была распространена шатровая ветряная мельница[27]. В конце XIX века в России сооружались шатровые мельницы с диаметром колеса 24 м, которые обеспечивали качественный помол зерна двумя жерновами с высокой производительностью.

Конструкции современных ветродвигателей по своему внешнему виду совершенно не похожи на своего деревянного собрата, но принцип шатра у них сохранился, только шатер превратился в гондолу ветродвигателя[24; 134].

Конструкция ветродвигателя в различных его модификациях совершенствовалась длительное время в различные эпохи [78; 117]. В России при Петре I начала развиваться металлургия. Эта отрасль потребовала механизации трудоемких производственных процессов, с которыми человек не мог справиться физически, например, при подаче воздуха в плавильные печи и в кузнечные меха, где ковались якоря и другие тяжелые детали для оснастки вновь строящихся кораблей русского военно-морского флота. Огромные меха и тяжелые кузнечные молоты приводились в действие водяными колесами и ветряными двигателями. Эти двигатели использовались и в лесопильном деле.

В XVIII веке были построены: в Англии паровая машина Джеймса Уатта, а в Нижнем Тагиле — паровая машина конструкции Ивана Ивановича Ползунова. Эти машины быстро совершенствовались и распространялись во всех областях человеческой деятельности. Паровой двигатель начал давать большие мощности в любое время по желанию потребителя. Такими свойствами ветряной двигатель не обладал, т.к. его работа зависела от наличия ветра, и мощность более 15 кВт он дать не мог. Поэтому ветродвигатель отошел на задний план и стал использоваться в основном в сельском хозяйстве — в мукомолье и водоподъеме, для водопоя животных и полива овощных культур.

В конце XIX века у парового двигателя появился очень сильный соперник — двигатель внутреннего сгорания. Двигатель внутреннего сгорания по своей компактности, мобильности, высокой скорости вращения и большому удобству в обслуживании отеснил на второй план паровую машину, на третий — водяную турбину и на четвертый - ветряной двигатель [139], который, по своей мощности и зависимого положения от наличия энергии ветра, не мог быть конкурентоспособным в области энергетики.

Но ветродвигатель длительное время руками энтузиастов постепенно совершенствовался, и в начале XX века вошел в промышленное производство. В Германии металлический многолопастный ветродвигатель начала выпускать фирма «Аэромотор», в Америке также начался

серийный выпуск многолопастного металлического ветродвигателя фирмой «Геркулес»[141]. Эти ветродвигатели использовались для водоснабжения на крупных фермах и в усадьбах.

В России многолопастный ветродвигатель заводского изготовления впервые был сконструирован инженером Василием Петровичем Давыдовым и демонстрировался на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде в 1896 году[25]. Конструкция В.П. Давыдова дала толчок к развитию промышленного производства многолопастных ветродвигателей в России.

Наряду с ростом количества кустарных деревянных мельниц, появились ветродвигатели заводского изготовления. В начале XX века в США до 1930 года для сельского хозяйства и других отраслей ветродвигатели мощностью до 8 кВт выпускались серийно на 200 заводах в количестве от 40 до 60 тыс. штук ежегодно[26]. Некоторые крупные сельскохозяйственные фермеры США в своих хозяйствах использовали до 70 ветродвигателей различного назначения.

В Европе серийным выпуском ветродвигателей мощностью до 10 кВт занимались: Германия, Дания, Голландия[31; 116]. До 1934 года в США и в Германии начали разрабатывать мощные ветроэлектрические установки в несколько тысяч киловатт. Но крупные топливно-энергетические монополии вытеснили производителей ветродвигателей с рынка, принудив фермеров присоединяться к электросетям мощных энергосистем. В Германии наблюдалось аналогичное явление. В этот период к власти пришел фашизм, и все заводы были переключены на производство военной техники.

У нас в стране в 1925 году профессором Н.Е. Жуковским в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) был организован отдел ветряных двигателей (ОВД), которым руководили ученики Н.Е. Жуковского: В.П. Ветчинкин, Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, В.С. Шаманин, В.В. Уткин-Егоров и позднее А.И. Макаревский, который руководил разработкой ветроэлектрического агрегата мощностью 1000 кВт с диаметром ветроколеса 50 м[116; 125; 133].

В период с 1920 года по 1925 год профессор Н.Е. Жуковский создал теорию ветряного двигателя [78; 133], которую его ученики расширили и отработали до практического использования. В этот же период в Германии по теории и экспериментальным исследованиям ветродвигателя вели работы такие ученые, как Людвиг Прандтль и Альберт Бетц [133; 134]. Для этих целей в Науэне была организована специальная лаборатория, которую возглавлял А. Бетц. В своих исследованиях немецкие ученые использовали и теорию Н.Е. Жуковского. В США в области аэродинамики ветродвигателя проводил работы крупный ученый профессор Карман.

В СССР с 1925 года начали разрабатываться конструкции отечественных ветродвигателей заводского производства [118]. Было организовано производство ветродвигателей малой мощности для обеспечения водой животноводческих ферм, центральных усадеб, степных пастбищ и водоподъема на железнодорожных станциях. Эти ветродвигатели выпускались в г. Херсоне в количестве 7000 шт. в год. К 1940-му году в СССР в работе находилось этих ветродвигателей 45 тыс. шт., в основном в южных областях [49; 139].

С 1929 года по 1936 год были разработаны ветроэлектрические установки мощностью 1000 кВт и 10 тыс. кВт [45]. Эти установки планировались для работы на энергосеть. В 1933 году в Крыму, вблизи Севастополя, была сооружена ветроэлектрическая установка мощностью 100 кВт с диаметром ветроколеса 30 м. По тому времени это была самая мощная в мире ветроэлектрическая станция, работающая на Крымскую энергосеть.

Вторая Мировая война нанесла огромный ущерб развитию ветроэнергетики во многих странах. В Советском Союзе война сорвала план создания параллельной гидро-ветроэнергетической системы Кольского полуострова мощностью в 1,5 млн. кВт, в том числе 500 тыс. кВт ветровой мощности, состоящей из 500 ветроэлектрических установок по 1000 кВт каждая [31].

После войны основное внимание во всех странах мира начали уделять развитию тепловых электростанций, работающих на традиционных

принципах, расходуя огромное количество минерального топлива, прекратив работы по развитию использования возобновляемого источника энергии - ветра, который по своей величине превосходит в несколько раз все топливные запасы недр[116].

У нас в стране во второй половине сороковых годов прошлого века группа специалистов - ветротехников и ветроэнергетиков под руководством академика А.В. Винтера приступила к научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам по созданию автономной ветроводородной системы (ВВЭС)[45; 78], вырабатывающей электроэнергию по твердому графику для бесперебойного снабжения потребителя электроэнергией, независимо от ветрового режима. В исследованиях этого комплекса принимали участие крупнейшие институты страны: Энергетический институт АН СССР, Московское высшее техническое училище и Московский авиационный институт[139].

Совместные комплексные исследования, конструкторские разработки и эксперименты закончились положительными результатами: были получены экспериментальные данные, которые можно использовать при разработке мощных ветроводородных электростанций[141].

С 1956 года по 1958 год Центральная научно-исследовательская лаборатория по ветроэнергетике разработала и соорудила в Целиноградской области многоагрегатную ветроэлектростанцию (ВЭС) мощностью в 400 кВт[32], в состав которой входило 12 ветродвигателей мощностью по 42 кВт каждый с диаметром ветроколес по 18 м. Ветроэлектростанция имела дизельный резерв равной мощности.

Многоагрегатная ВЭС в мировой практике была создана впервые, а результаты семилетней опытной эксплуатации убедительно доказали, что такого типа ВЭС можно строить на большие мощности, которые в зонах со среднегодовой скоростью ветра от 5 м/с и более смогут обеспечить электроэнергией целые районы.

С 1965 года по 1976 год проводились работы по созданию унифицированного ряда горизонтально-осевых ветроэнергетических агрегатов мощностью от 1 до 100 кВт для производства электроэнергии в зонах,

удаленных от промышленных энергосистем и в труднодоступных районах, с диаметром ветроколес 6, 12, 18 и 24 метра[31].

За последние десятилетия во многих странах велась поисковая работа в направлении создания ветроэнергетических установок мощностью в несколько мегаватт для использования их в мощных ветроэнергетических системах, подсоединяемых к государственным энергосистемам, особенно успешно — в ФРГ, Дании, США, Англии, Франции и Японии. В этих странах в разработках ветроэнергетического оборудования принимают участие крупные фирмы энергетической, авиационной и машиностроительной промышленности. Из года в год увеличивается объем работ по ветроэнергетике и возрастает их финансирование[32; 34; 102; 137].

Современный уровень промышленности позволяет создавать мощные ветроэнергетические агрегаты, а на их основе — ветроэнергетические системы мощностью в несколько десятков миллионов киловатт.

Современный уровень техники, технологии и машиностроения вполне могут обеспечить создание ветроэнергетических систем, которые смогут обеспечить энергоснабжение равномерно по всем странам основных континентов. Установившийся на планете геофизический процесс подтверждает возможность создания межконтинентальной ветроэнергетической системы. Опыт использования энергии ветра всеми странами убеждает в том, что эту энергию можно использовать для получения электроэнергии в таком количестве, которое может обеспечить все отрасли промышленности, транспорта и сельского хозяйства.

### **1.1.2 Направление развития малой энергетики**

С учетом требований рынка к низкой стоимости ВЭУ малой мощности, система управления мощностью обычно является максимально простой[46; 47]. Для этого обычно ветроколесо ВЭУ рассчитывают на заданную скорость ветра, при этом частота вращения генератора выбирается постоянной. Это позволяет использовать простой асинхронный

генератор, подключенный к электрической сети[39], или синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов для зарядки аккумуляторной батареи в автономных ВЭУ[30; 124]. Лопастей ветроколеса обычно неподвижные, что не позволяет регулировать угол установки и подстраивать частоту вращения под скорость ветра[36]. В случае ветров, отличающихся от расчетных, ограничение мощности производится уводом ветроколеса из-под ветра[33]. Это не позволяет в полной мере использовать весь диапазон скоростей ветра и обеспечить работоспособность ВЭУ в любую погоду.

С развитием ветроэнергетических установок и увеличением их мощности также происходит и совершенствование их конструкции[57]. В то время, как совершенствуются механические части конструкции ВЭУ, улучшаются и усложняются электрические системы управления и контроля[48; 58; 62]. Появляется управление углом установки лопастей[70], что позволяет обезопасить работу ВЭУ в штормовых условиях ограничением частоты вращения ротора. Также это позволяет в некоторой степени увеличить выработку электрической энергии при малых ветрах[137]. Другим способом улучшить потребительские свойства ветроэнергетических установок является обеспечение работоспособности турбин при разной скорости ветра применением различных редукторов и коробок передач[7]. В ветроэнергетических установках стали применяться разные типы генераторов[39; 136; 138], где с помощью электрических преобразователей достигалось необходимое качество генерируемой энергии.

## **1.2 Управление мощностью ветроэнергетических установок**

На современном этапе развития науки и техники электротехнические системы, основанные на возобновляемых источниках энергии, состоят из большого числа взаимосвязанных элементов и подсистем[52; 55; 130]. Для исследования таких систем обычно требуется применение достаточно мощного математического аппарата, основанного на исполь-

зовании вычислительных ресурсов электронных вычислительных машин и его реализации соответствующим программным обеспечением[22].

По мере развития программного обеспечения для научных расчетов и увеличения мощности средств вычислительной техники для научных исследований на компьютерах все чаще и чаще используются специальные программы для математических расчетов, например Mathcad[44; 50; 51]. Такие программы позволяют быстро реализовать математические модели используя приемы модельно-ориентированного программирования.

Переходя к исследованию систем электроснабжения, основанных на возобновляемых источниках энергии, следует выделить некоторые особенности функционирования таких систем[105]. В возобновляемой энергетике источники энергии не могут обеспечить постоянство генерируемой мощности, поэтому в таких системах требуется накопление выработанной энергии для последующей ее отдачи потребителю, когда это необходимо[47; 144].

В связи с тем, что на сегодняшний день существует множество различных конструкций ветродвигателей, возникает ряд вопросов:

- насколько эффективны эти конструкции?;
- насколько полно используется потенциал, заложенный в конкретную конструкцию?;
- есть ли возможность увеличить эффективность такой ВЭУ, не внося существенных изменений в конструкцию?

Отвечая на эти вопросы было определено, что все конструкции ветроэнергетических установок можно разделить следующим образом[78]:

- с горизонтальной осью вращения;
- с вертикальной осью вращения.

ВЭУ с горизонтальной осью вращения можно разделить на[38]:

- с постоянным установочным углом лопастей;
- с изменяемым установочным углом лопастей;

ВЭУ с вертикальной осью вращения можно разделить на[38]:

- с постоянной геометрией ветроколеса;

- с изменяемой геометрией ветроколеса[142];

При этом можно выделить следующие основные способы управления мощностью ветроэнергетической установки:

- ВЭУ, работающая при постоянной частоте вращения ветроколеса[47; 129];

- ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения обмоток генератора[20];

- ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения передаточного отношения мультипликатора[23];

- ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения с изменением установочного угла лопастей ветроколеса или изменением геометрических размеров ветроколеса[11];

- ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения и использующая электрический преобразователь с регулятором мощности[8].

Необходимость регулирования мощности в ветроэнергетической установке можно объяснить особенностью аэродинамической характеристики ветроколеса. На рисунке 1.1 показана типичная зависимость аэродинамической мощности ветроколеса от частоты вращения для разных скоростей ветра. При этом видно, что для каждой скорости ветра существует определенная частота вращения, при которой мощность ветроколеса максимальна.

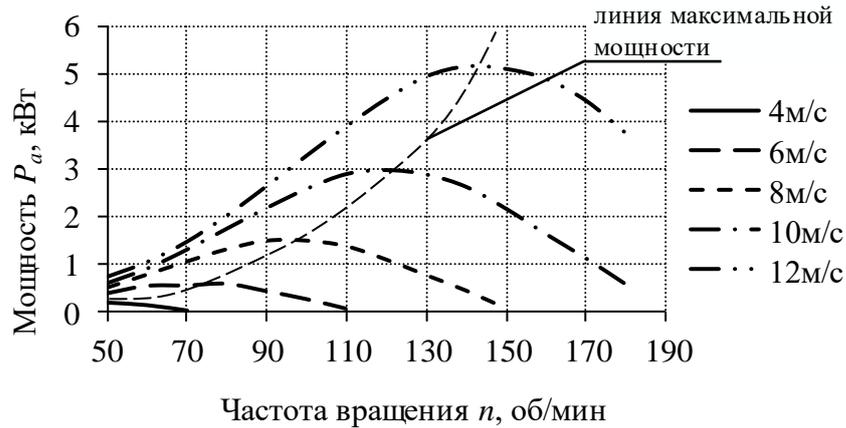


Рисунок 1.1 — Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветра

### 1.2.1 Управление мощностью при постоянной частоте вращения

Наиболее простым в реализации является способ управления мощностью при постоянной частоте вращения [135]. В качестве примера использования такого способа можно привести конструкцию ветроэнергетической установки, в которой ротор ветроколеса напрямую или через мультипликатор соединен с ротором синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов [107; 108]. Обмотки генератора подключены ко входу диодного выпрямительного моста, выход которого подключен к аккумуляторной батарее [136].

При работе такой ВЭУ при изменении скорости ветра изменяется напряжение на выходе генератора и выпрямителя соответственно [124]. Таким образом, при малых ветрах частота вращения и выходное напряжение становится ниже напряжения на аккумуляторной батарее, ток в АКБ перестает течь, что приводит к уменьшению снижения электромагнитного момента генератора на валу ветроколеса. При увеличении скорости ветра частота вращения генератора стремится увеличиться, что приводит к увеличению выходного напряжения генератора и росту тока в аккумуляторную батарею. Увеличение тока приводит к увеличению

электромагнитного момента генератора на валу ветроколеса, что не позволяет ему разгоняться выше определенной частоты вращения, чем и достигается стабилизация[47].

Преимущества способа управления мощностью при постоянной частоте вращения:

- этот способ не требует таких агрегатов, как коробка передач или механизм изменения установочного угла лопастей, что позволяет упростить конструкцию ветроколеса, при этом увеличив ее надежность[46];

- способ обеспечивает возможность применения генератора с возбуждением от постоянных магнитов, что позволяет повысить КПД генератора и всей ветроэнергетической установки в целом, т.к. такой генератор не требует электрической энергии на возбуждение магнитного поля;

- возможность применения простой схемы преобразования переменного электрического тока генератора в постоянный ток заряда аккумуляторной батареи с помощью диодного выпрямительного моста позволяет упростить электрооборудование ветроэнергетической установки и уменьшить стоимость конечного изделия.

Недостатки этого способа:

- эффективная работа ВЭУ обеспечивается только в узком диапазоне скоростей ветра;

- необходимо применять специальные меры для защиты от превышения мощности при скорости ветра, превышающей номинальную.

### **1.2.2 Управление мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ветроколеса переключением обмоток генератора**

Следующим по сложности реализации является способ управления мощностью ступенчатым изменением частоты вращения ротора путем переключения обмоток генератора[136]. Этот способ подобен способу управления мощностью при постоянной частоте вращения ветроколе-

са, отличаясь тем, что в зависимости от скорости ветра конструкция ветроэнергетической установки позволяет изменять выходное напряжение генератора, что позволяет обеспечить работу ветроколеса с частотой вращения, изменяемой в зависимости от скорости ветра, что позволяет обеспечить эффективную работу при нескольких скоростях ветра.

Преимущества способа:

- способ позволяет существенно расширить диапазон скоростей ветра, при которых возможно эффективное функционирование ВЭУ;
- использование такого способа позволяет сохранить простоту электрического преобразователя ветроэнергетической установки, переложив функции исполнительного устройства системы управления ВЭУ на электромеханический коммутатор обмоток генератора.

Недостатки способа:

- для обеспечения функционирования такого способа в системе управления ветроэнергетической установки требуется измерение скорости ветра с помощью анемометра, либо определение этой величины по косвенным признакам, например по величине углового ускорения скорости ветра;
- применение устройства коммутации обмоток генератора приводит к снижению надежности электрооборудования ветроэнергетической установки;
- в сравнении со способом управления мощностью ветроэнергетической установки при постоянной частоте вращения ветроколеса сохраняется необходимость применения специальных защитных средств для ограничения мощности генератора при скоростях ветра, превышающих номинальную.

### **1.2.3 Управление мощностью ВЭУ изменением передаточного отношения редуктора-мультипликатора ветродвигателя**

Еще одним способом регулирования частоты вращения ротора ветроколеса под изменяющуюся скорость ветра является применение ме-

ханической передачи между валом ветроколеса и валом электрического генератора с переменным либо ступенчато изменяемым передаточным отношением[69]. В качестве примера таких устройств можно привести редуктор/мультипликатор с несколькими передачами (коробка перемены передач), либо клиноременный вариатор[136].

Этот способ аналогично предыдущему способу позволяет существенно расширить диапазон скоростей ветра, позволяя при этом использовать достаточно простые синхронные генераторы, рассчитанные на фиксированную частоту вращения.

Преимущества способа:

- применение механической передачи с переменным передаточным отношением позволяет существенно расширить диапазон скоростей ветра, при которых возможно эффективное функционирование ВЭУ;
- использование такого способа позволяет сохранить простоту электрического преобразователя ветроэнергетической установки, переложив функции исполнительного устройства системы управления ВЭУ на управляемую коробку передач.

Недостатки способа:

- для обеспечения функционирования такого способа в системе управления ветроэнергетической установки требуется применение анемометра, либо другого устройства определения текущей скорости ветра;
- применение устройства перемены передач приводит к снижению надежности механической передачи от ветроколеса к генератору ветроэнергетической установки;
- применение устройства перемены передач приводит к увеличению механических потерь в тракте «ветроколесо — генератор», снижая общую эффективность ветроэнергетической установки;
- сохраняется необходимость применения специальных защитных средств для ограничения мощности генератора при скоростях ветра, превышающих номинальную.

#### **1.2.4 Управление мощностью ВЭУ изменением установочного угла лопастей или геометрических размеров ветроколеса**

Одним из способов адаптации свойств ветроколеса к изменяющимся ветровым условиям можно назвать способ управления мощностью ВЭУ путем изменения установочного угла лопастей[64] или геометрических размеров ветроколеса[104]. Применение этого способа предполагает применение такой конструкции ветроколеса, в которой возможно автоматическое изменение аэродинамических поверхностей, приводящее к изменению аэродинамических характеристик ветроколеса в соответствии с изменяющейся скоростью ветра[9; 61]. Такая конструкция обычно требует оснащение ветроколеса различными агрегатами для осуществления функции управления[59].

Преимущества способа:

- применение механизированной конструкции ветроколеса позволяет наиболее полно использовать энергию ветра в широком диапазоне рабочих скоростей;
- использование такого способа позволяет обеспечить аэродинамическое регулирование мощности ВЭУ, обеспечивая наиболее благоприятные режимы эксплуатации, включая обеспечение защиты генератора ВЭУ от избыточной мощности в условия сильных ветров.

Недостатки способа:

- для обеспечения функционирования такого способа в системе управления ветроэнергетической установки требуется применение сложной системы управления механическими устройствами и агрегатами для изменения геометрии аэродинамических поверхностей ветроколеса[17];
- применение механических устройствами или агрегатов для изменения геометрии аэродинамических поверхностей ветроколеса приводит к снижению надежности конструкции ветроэнергетической установки, приводит к необходимости обеспечения технического обслуживания в процессе эксплуатации ВЭУ;

– усложнение конструкции ВЭУ приводит к увеличению стоимости как ветроэнергетической установки, так и эксплуатационных расходов что неблагоприятно сказывается на экономической эффективности.

### **1.2.5 Работа ВЭУ при переменной частоте вращения ветроколеса**

В условиях постоянно изменяющейся скорости ветра и неизменных геометрических размерах аэродинамических поверхностей ветроколеса можно обнаружить, что наибольшая эффективность ветроколеса достигается при изменении частоты вращения ротора ветроколеса согласно определенной закономерности[60]. Обычно такая закономерность задается с помощью термина «быстроходность» — отношения линейной скорости конца лопасти к скорости ветра. Для каждой конструкции ветроколеса со своими геометрическими размерами существует определенное значение быстроходности, при которой ветроколесо обеспечивает наибольшую эффективность. И для обеспечения эффективной работы ВЭУ требуется постоянно поддерживать эту быстроходность на требуемом уровне, изменяя частоту вращения ротора ветроколеса вслед за изменяющейся скоростью ветра[58].

При этом следует отметить, что при изменяющейся частоте вращения вала ветроколеса и генератора соответственно (при прямом соединении вала ветроколеса и вала электрического генератора), синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов будет вырабатывать электрический ток, изменяющийся по частоте и по амплитуде[48]. Соответственно, для обеспечения корректного функционирования ветроэнергетической установки требуется применение преобразователя электрической энергии[138]. Такой преобразователь должен обеспечивать преобразование переменного электрического тока генератора в постоянный ток заданной величины для обеспечения такого режима работы ВЭУ, чтобы мощность нагрузки генератора обеспечивала требуемую частоту вращения ветроколеса при заданной скорости ветра.

Преимущества способа:

- применение электрического регулирования скорости вращения ветроколеса позволяет обеспечить эффективную работу ветроэнергетической установки в широком диапазоне скоростей ветра[7];

- использование этого способа позволяет сохранить простоту конструкции ветроэнергетической установки, переложив функции исполнительного устройства системы управления ВЭУ на электрический преобразователь;

- применение управляемого электрического преобразователя позволяет обеспечить защиту электрического генератора от перегрузки в условиях чрезмерно высоких скоростей ветра, например при возникновении буревых ветров или штормов.

Недостатки способа:

- для обеспечения функционирования такого способа в системе управления ветроэнергетической установки требуется применение анемометра, либо другого устройства определения текущей скорости ветра;

- применение регулируемого электрического преобразователя приводит к усложнению электрической части конструкции ветроэнергетической установки, предъявляя высокие требования к надежности электрооборудования, однако в связи с тем, что электронная промышленность непрерывно развивается, предлагая все более эффективные и высоконадежные решения, можно прогнозировать, что в ближайшем будущем возможно появление эффективных конструкций, успешно решающих поставленную задачу.

### **1.3 Выводы по главе**

Анализируя описанные выше способы управления мощностью ВЭУ можно сделать вывод, что наиболее простым и распространенным способом управления является работа при постоянной частоте вращения ветроколеса. В то же время ветроэнергетические установки, работающие при таком управлении, не могут обеспечить эффективное функциони-

рование в широком диапазоне скоростей ветра и требуют дополнительных механизмов для защиты конструкции ВЭУ при избытке ветровой мощности. Наиболее эффективным способом, обеспечивающим работу ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра, является работа при переменной частоте вращения ветроколеса по заданному алгоритму, когда, при изменении скорости ветра изменяется частота вращения ветроколеса, обеспечивая работу ветроколеса с наибольшей эффективностью. Для разработки такого алгоритма эффективного управления мощностью ВЭУ было принято решение о разработке универсальной компьютерной модели ветроэнергетической установки, которая имитирует работу ВЭУ под управлением алгоритма, заданного на языке высокого уровня.

Рассмотренные способы управления применимы к различным конструкциям ветродвигателя ветроэнергетической установки, что позволяет, сконцентрировавшись на изучении способов управления, применить полученный опыт на все многообразие ветроэнергетических установок.

Предлагаемая работа посвящена исследованию различных способов управления мощностью ветроэнергетической установки путем математического моделирования работы ветроэнергетической установки при различных способах управления, разработке эффективного алгоритма управления мощностью вертикально-осевой ВЭУ и проверке результатов теоретических исследований проведением натурных экспериментов с ветроэнергетической установкой, оснащенной универсальной системой управления.

## ГЛАВА 2

**Разработка компьютерной модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования**

В современном мире все большее распространение получают цифровые системы управления[100]. В то же время совершенствуются и развиваются такие средства разработки и анализа, как программное обеспечение для математического моделирования и численного анализа, языки высокого уровня и средства разработки программного обеспечения, а также аппаратные возможности средств вычислительной техники.

Использование методов имитационного моделирования на этапе проектирования сложных систем управления позволяет не только существенно сократить затраты на исследование, разработку и испытания, но и существенно уменьшить время разработки изделия[70].

Добиться повышения эффективности процесса разработки и проектирования систем управления сложными объектами можно за счет применения имитационного моделирования[75], что будет показано на примере разработки универсального контроллера. При этом модель системы управления должна поддерживать программирование на языке высокого уровня, чтобы обеспечить переносимость программы управления на целевую систему. В качестве среды разработки и исследования выбран пакет программ для математических расчетов MATLAB/Simulink от компании Mathworks Inc, широко распространенный как в научной среде, так и в различных проектных организациях[80].

В основе пакета MATLAB/Simulink лежит решатель MATLAB со своей оболочкой[77]. Этот решатель позволяет производить сложные математические вычисления с различными объектами: числами, векторами, матрицами, а так же решать системы уравнений различной сложности. Для облегчения процесса моделирования различных систем в дополнение к решателю компанией Mathworks Inc была разработана надстройка Simulink, содержащая большую библиотеку моделей различных устройств. При этом предлагаемые модели содержат математическое опи-

сание, приведенное в документации к библиотеке. Однако при разработке систем управления требуются не только модели объектов управления, но модель управляющего устройства, а его сложность обычно изменяется от задачи к задаче, что создает запрос на применение универсального подхода к разработке модели управляющего устройства.

В настоящей главе приводится описание математических моделей элементов ветроэнергетической установки для исследования различных способов регулирования мощности ВЭУ.

Целью имитационного моделирования вычислительного эксперимента над компьютерными моделями является исследование эффективности ВЭУ при использовании различных стратегий и алгоритмов управления.

Ветроэнергетическая установка обычно состоит из следующих компонентов:

Ветродвигатель — преобразователь энергии ветра в механическую энергию вращения. Ветродвигатель включает в себя ветроколесо — элемент конструкции ВЭУ, состоящий из лопастей, крыльев или других частей, который воспринимает набегающий поток воздуха и преобразует энергию этого потока во вращательное движение, передаваемое на вал генератора либо другого устройства использования механической энергии.

Электрический генератор — электрическая машина, преобразующая механическую энергию вращения вала в электрическую энергию. Генераторы ветроэнергетических установок бывают разных типов, например генераторы постоянного тока, асинхронные генераторы, вентильные (синхронные) и другие. Тип генератора определяется разработчиком ветроэнергетической установки и выбирается из условий эксплуатации, требований к мощности и качеству генерируемой электрической энергии.

Контроллер заряда аккумуляторной батареи — устройство, предназначенное для поддержания тока и напряжения, необходимого для заряда аккумуляторных батарей. Контроллер заряда аккумуляторной батареи

регулирует значения тока и напряжения на входе и на выходе, обеспечивая оптимальный режим заряда аккумуляторов.

Инвертор — устройство, преобразующее напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока. Аккумуляторные батареи являются источником напряжения постоянного тока, а большинство потребителей электроэнергии напротив рассчитаны на переменное напряжение 220 или 380В при частоте 50Гц. Часто инверторы объединяют несколько функций: преобразуют постоянный ток в переменный, являются контроллерами заряда; обеспечивают защиту аккумуляторной батареи от перезаряда и переразряда; выполняют роль балластной нагрузки для генератора. Существуют 2 типа инверторов, отличающихся по качеству переменного тока: с синусоидальным выходным напряжением и, так называемой, «модифицированной синусоидой». Первые отличаются более высокой стоимостью, но позволяют питать любые нагрузки, чувствительные к качеству электроэнергии. Вторые отличаются меньшей стоимостью, но не предназначены для питания индуктивной нагрузки: устройства с электродвигателями и трансформаторами.

Аккумуляторные батареи — устройства, предназначенные для накопления электроэнергии. В системах, основанных на возобновляемых источниках энергии, как правило, применяются свинцово-кислотные необслуживаемые аккумуляторные батареи типа AGM – с абсорбированным электролитом. Такие батареи способны к достаточно глубокому разряду без потери качества и рассчитаны на большое количество циклов заряда/разряда.

Для формирования требований к универсальной компьютерной модели ветроэнергетической установки требуется определить граничные условия применимости модели[99].

Основной характеристикой, влияющей на эффективность ветроэнергетической установки, является коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ, далее в формулах и на рисунках обозначенный как  $C_p$ ) – отношение механической мощности ветроколеса к полной мощно-

сти энергии ветра, проходящей через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ[76].

Компьютерная модель ветроэнергетической установки была разработана с заранее заданным КИЭВ ветродвигателя и универсальным контроллером для обеспечения возможности изменения алгоритма управления, функциональная схема модели приведена на рисунке 2.1.

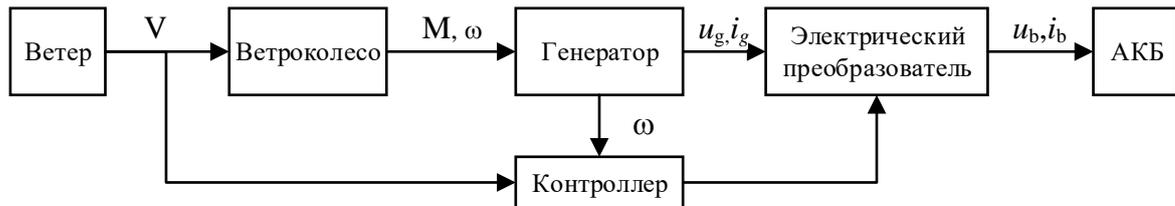


Рисунок 2.1 — Функциональная схема имитационной модели ветроэнергетической установки

Особенностью предлагаемой модели является модуль контроллера ветроэнергетической установки, работающий по задаваемому пользователем алгоритму[55; 77]. При этом можно выделить следующие способы управления, применяющиеся в различных типах ВЭУ, которые поддерживаются компьютерной моделью:

- ВЭУ, работающая при постоянной частоте вращения ветроколеса;
- ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения обмоток генератора;
- ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения передаточного отношения мультипликатора;
- ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения и использующая электрический преобразователь с регулятором мощности.

Целью моделирования различных алгоритмов управления ВЭУ является определение производительности ВЭУ при работе под управлением этих алгоритмов при различных внешних воздействиях, а так же разработки и оптимизации новых алгоритмов в ходе дальнейших ис-

следований и разработок, в том числе натуральных испытаний реальных объектов[44].

## 2.1 Модель ветра как источника энергии для ветроэнергетической установки

При имитационном моделировании воздействия ветра на различные объекты часто приходится задавать изменение скорости ветра от времени. Такая необходимость возникает, например, при исследовании работы ветроэнергетической установки в условиях воздействия переменного ветра[103]. Характер зависимости скорости ветра от времени существенно влияет на выбор способа управления скоростью вращения ветроколеса и определяет требования к системе управления ветроэнергетической установки.

При имитационном моделировании энергетической системы на основе ветроэнергетической установки в качестве задающего воздействия на объект управления используется горизонтальная составляющая скорости ветра. Таким образом, эта часть исследования посвящена разработке универсальной модели горизонтальной составляющей скорости ветра, требующей невысокие вычислительные ресурсы и пригодной для реализации в среде MATLAB/SIMULINK.

В нормативных и рекомендательных документах обычно скорость ветра  $V(t)$  представлена в виде суммы двух составляющих:

$$V(t) = \bar{V} + \Delta V(t)$$

где:

$\bar{V}$  — среднее значение скорости ветра;

$\Delta V(t)$  — девиация скорости ветра, так называемая динамическая составляющая скорости[103].

Нормативные документы содержат требования к средней скорости ветра  $\bar{V}$  и ее динамической составляющей  $\Delta V(t)$ , которые являются случайными процессами. Средняя скорость ветра обычно задается как

функция времени. Статистические характеристики динамической составляющей  $\Delta V(t)$  задаются с помощью функции спектральной плотности  $S(f)$ .

Для описания динамической составляющей скорости ветра обычно применяют эмпирические модели спектральной плотности  $S(f)$ , такие как функции Давенпорта, Кармана и Каймала[103].

Для расчета динамической составляющей скорости ветра была выбрана модель спектральной плотности Каймала. Спектральные плотности динамических составляющих для модели Каймала описываются уравнением[103]:

$$\frac{f \cdot S(f)}{\sigma^2} = \frac{4 \cdot f \cdot L/\bar{V}}{(1 + 6 \cdot f \cdot L/\bar{V})^{5/3}},$$

где  $f$  — частота гармонической составляющей сигнала скорости ветра, Гц;  $S(f)$  — односторонний спектр горизонтальной составляющей скорости ветра;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение горизонтальной составляющей скорости ветра;  $L$  — коэффициент турбулентности.

Используя теорему Фурье функцию горизонтальной составляющей скорости ветра можно представить в виде ряда:

$$V(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

где  $A_k$  — амплитуда  $k$ -й гармоники скорости ветра;  $\omega_k$  — круговая частота соответствующей гармоники;  $\varphi_k$  — фазовый сдвиг  $k$ -го колебания;  $A_0$  — вероятность. Тогда амплитуда  $k$ -й гармоники равна ее среднеквадратическому отклонению:

$$A_k = \sqrt{S(f_k)\Delta f},$$

где  $\Delta f$  — интервал между соседними частотами.

Подставив соответствующие значения, получаем, что горизонтальная скорость ветра на временном интервале  $T$  равна:

$$V(t) = \bar{V} + \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

где  $\bar{V}$  — скорость ветра, усредненная на заданном интервале времени.

Таким образом, горизонтальная скорость ветра может быть рассчитана как сумма соответствующих гармонических составляющих и средней скорости ветра, что позволяет реализовать ее стандартными средствами Matlab/Simulink.

## 2.2 Математическое описание ветроколеса ВЭУ

Модель ветроколеса представлена следующими уравнениями. Дифференциальное уравнение для описания вращательного движения ветроколеса:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{\text{эм}} - M_c, \quad (2.1)$$

где  $J$  — момент инерции системы;  $\omega$  — угловая скорость;  $M_a$  — аэродинамический момент ветроколеса;  $M_{\text{эм}}$  — электромагнитный момент генератора;  $M_c$  — момент сопротивления потерь, учитывающий трение и другие потери.

Аэродинамический момент ротора равен [143]:

$$M_a = C_P(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega}, \quad (2.2)$$

где:

$C_P(Z)$  — КИЭВ (зависит от быстроходности  $Z$ );

$\rho$  — плотность воздуха;

$V$  — скорость ветра;

$S$  — ометаемая площадь;

$\omega$  — угловая скорость ветроколеса.

Тогда аэродинамическая мощность равна

$$P_a = C_P(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}. \quad (2.3)$$

Зависимость  $C_P$  от быстроходности  $Z$  достаточно хорошо аппроксимируется функцией вида [5; 143]:

$$C_P(Z) = \left( \frac{c_1}{Z} - c_2 \right) \cdot e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4, \quad (2.4)$$

где  $c_1 \dots c_4$  — коэффициенты, подбираемые для заданной конструкции ветроколеса по известной аэродинамической характеристике [2]; быстроходность  $Z$  определяется уравнением  $Z = \frac{\omega \cdot r}{V}$  [132]. График зависимости безразмерного коэффициента  $C_P$  от быстроходности  $Z$  (безразм.) представлен на рисунке 2.2.

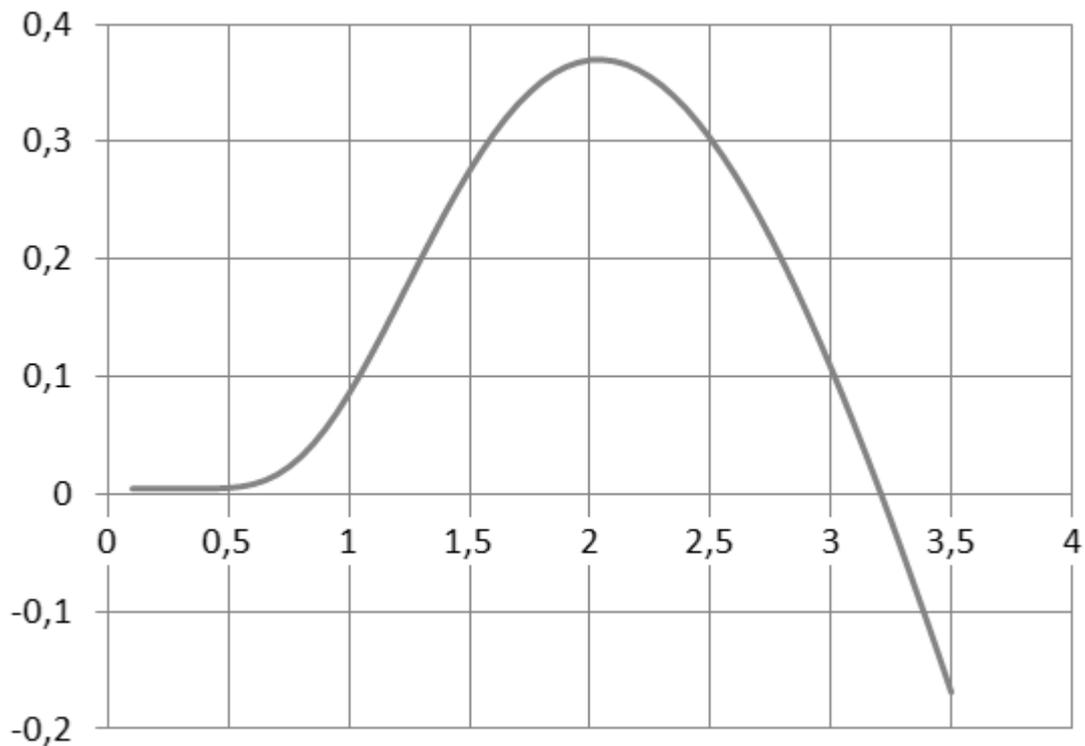


Рисунок 2.2 — Зависимость КИЭВ  $C_P$  от быстроходности  $Z$

Момент сопротивления на валу равен  $M_c = \frac{P_M}{\omega}$ , где  $P_M$  — механическая мощность на валу генератора.

Основываясь на заданной зависимости коэффициента использования энергии ветра от быстроходности ветроколеса, была определена зависимость аэродинамической мощности от скорости ветра и частоты вращения ротора.

График распределения аэродинамической мощности ротора в зависимости от скорости ветра и частоты вращения представлен на рисунке 2.3. По этому графику можно сделать вывод о том, что для любой заданной скорости ветра существует частота вращения ротора, при которой мощность ветроэнергетической установки будет максимальной [93].

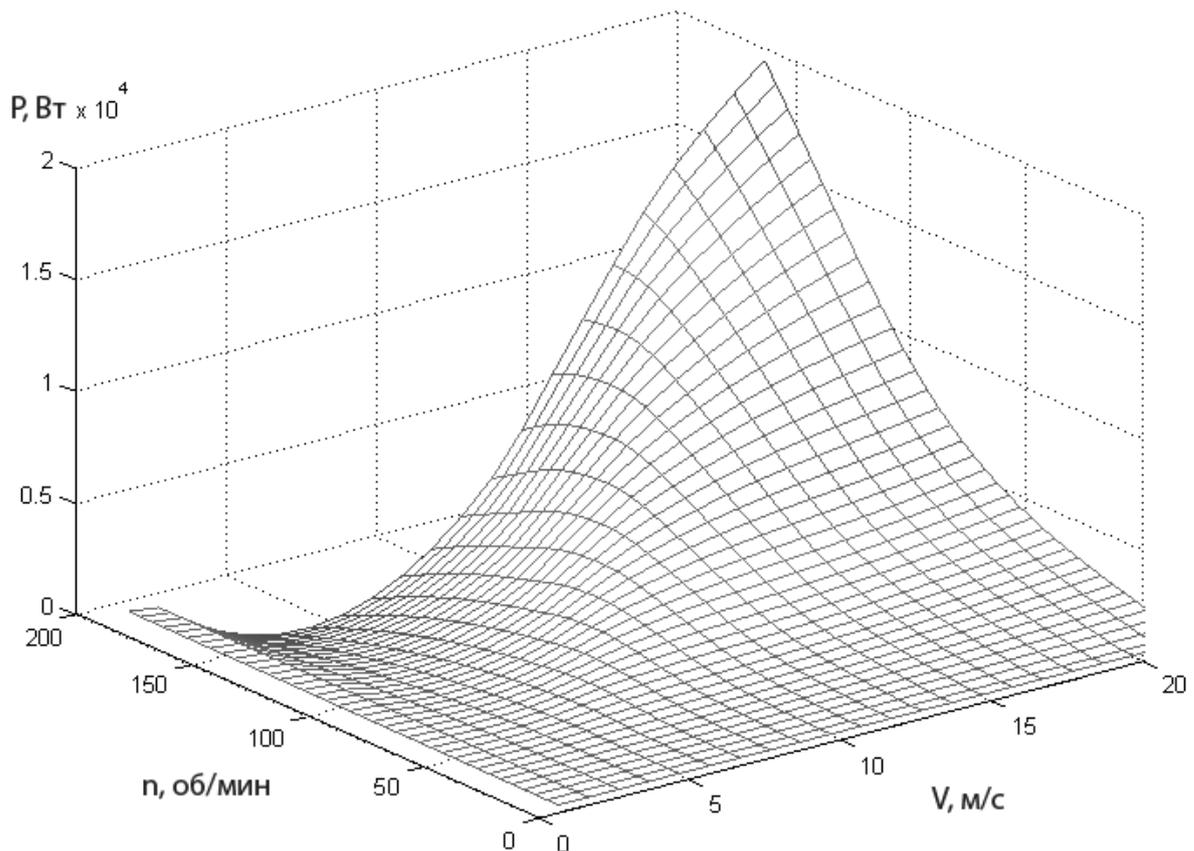


Рисунок 2.3 — График распределения мощности ротора в зависимости от скорости ветра и частоты вращения

### 2.3 Описание модели электрического генератора ветроэнергетической установки

Для преобразования механической энергии вращения вала ветродвигателя в электрическую в ветроэнергетических установках используются электрические генераторы [126; 128]. К электрическим генераторам, применяемым в ветроэнергетических установках, предъявляются особые требования, учитывающие особенность их работы. Одной из

важнейших особенностей является то, что генератор приводится во вращение ветроколесом, скоростной режим которого зависит от скорости ветра и является непостоянным[129].

В условиях изменяющейся скорости ветра необходимо обеспечение требуемых характеристик генератора в широком диапазоне скоростей вращения, что приводит к увеличению размеров и массы электрической машины в сравнении с генераторами, рассчитанными на установившийся режим работы. Нагрузка генератора тоже изменяется в процессе работы. Она зависит от мощности и числа подключенных потребителей[35].

При изменении скорости вращения ротора генератора и переменной нагрузке необходимо стабилизировать напряжение на выходе генератора[43], что создает необходимость применения устройства регулирования напряжения. Такое регулирование обычно осуществляется за счет изменения тока в специальной обмотке возбуждения, задаваемого регулятором напряжения[39]. Применение обмотки возбуждения приводит к необходимости увеличения габаритных размеров, т.к. требуется дополнительное место в конструкции генератора для размещения обмоток[72]. Также ток в обмотке возбуждения приводит к дополнительным электрическим потерям в генераторе, иногда достигающим величины в 10..20% от полезной мощности [41].

Анализ различных типов электрических машин, пригодных для применения в ветроэнергетических установках показывает, что вопрос выбора типа и конструкции генератора не однозначен[37; 39; 81]. Например, при использовании синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов преимуществом является отсутствие необходимости обеспечения питания обмоток возбуждения, и, как следствие, отсутствие электрических потерь в обмотке возбуждения[113]. При использовании электромагнитного возбуждения появляется возможность регулировки выходного напряжения по цепи возбуждения, но появляются электрические потери на возбуждение. Это происходит потому, что при низкой скорости вращения ток в обмотке возбуждения должен увеличить магнитный поток для компенсации снижения скорости вращения,

при этом все большая часть генерируемой мощности будет тратиться на возбуждение вместо того, чтобы быть отданной в нагрузку[87]. Дополнительным недостатком такой конструкции является необходимость передачи электрической энергии на вращающуюся обмотку возбуждения, что усложняет конструкцию и снижает ее надежность[114; 115].

Другим недостатком конструкции электрической машины с электромагнитным возбуждением является необходимость обеспечения качественного теплоотвода для обмотки возбуждения из-за тепла, выделяемого током, протекающим через эту обмотку[53; 54; 90].

Таким образом, для применения в ветроэнергетических установках малой мощности наиболее целесообразно применять синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, иначе называемые «вентильные электрические машины». Такие машины бывают с радиальным и осевым магнитным потоком [30; 90], при этом возможны конструкции без использования магнитомягких материалов в сердечнике якоря, что позволяет еще больше снизить потери. Дополнительным преимуществом является снижение реактивного момента генератора, что является важным при применении в таких электрических машин в ветроэнергетических установках, т.к. пульсации реактивного момента обычно приводят к нежелательной вибрации конструкции ВЭУ и возникновению шума[91].

Разработка генератора, работающего совместно с системой регулирования ветроэнергетической установки имеет свои особенности[124]. Существенно ускорить процесс разработки электрической машины для ветроэнергетической установки помогают современные средства вычислительной техники и соответствующее программное обеспечение. На этапе расчета электромагнитных параметров и тепловых расчетов возможно применение как инженерных методик для ускоренного расчета[41; 42], так и программные пакеты, основанные на методе конечных элементов, например Ansys EMAG или Maxwell [71; 87; 90; 91]. На этапе проектирования конструкции облегчает труд разработчика твердо-

тельное моделирование в системах автоматизированного проектирования подобно SolidWorks.

Моделирование генератора ветроэнергетической установки проводится на основе изучения ряда особенностей электрической машины [119]. Примененный генератор является синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов и с осевым направлением магнитного потока и безжелезным якорем, содержащим статорные обмотки [40]. Особенностью проектирования генератора с аксиальным зазором является отсутствие потерь на перемагничивание из-за отсутствия стального магнитопровода и низкая индуктивность обмоток, влиянием которой в имитационном моделировании ВЭУ можно пренебречь [67].

Для имитационного моделирования алгоритмов управления мощностью ВЭУ в целях оптимизации требований к вычислительным ресурсам в рамках поставленной задачи предложена следующая модель электрического генератора. Исходя из схемы замещения, напряжение фазной обмотки генератора равно

$$u = e - r \cdot i - L \frac{di}{dt}, \quad (2.5)$$

где  $e$  — электродвижущая сила (ЭДС);

$r$  — активное сопротивление фазной обмотки;

$i$  — ток в фазной обмотке;

$L$  — индуктивность фазной обмотки.

Для уменьшения влияния параметров электрической машины на результаты исследования алгоритмов управления ВЭУ было принято, что  $r$  и  $L$  равны нулю, а ЭДС в обмотках генератора задается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t), \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}), \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}). \end{cases}$$

В системе уравнений приняты следующие обозначения:

$e_A, e_B, e_C$  — ЭДС соответствующих обмоток генератора;

$k$  — коэффициент конструкции генератора;

$2p$  — число пар полюсов;

$\omega$  — угловая скорость ротора генератора;

$t$  — время.

Рисунок 2.4 показывает блок-схему модели генератора в пакете MATLAB/Simulink.

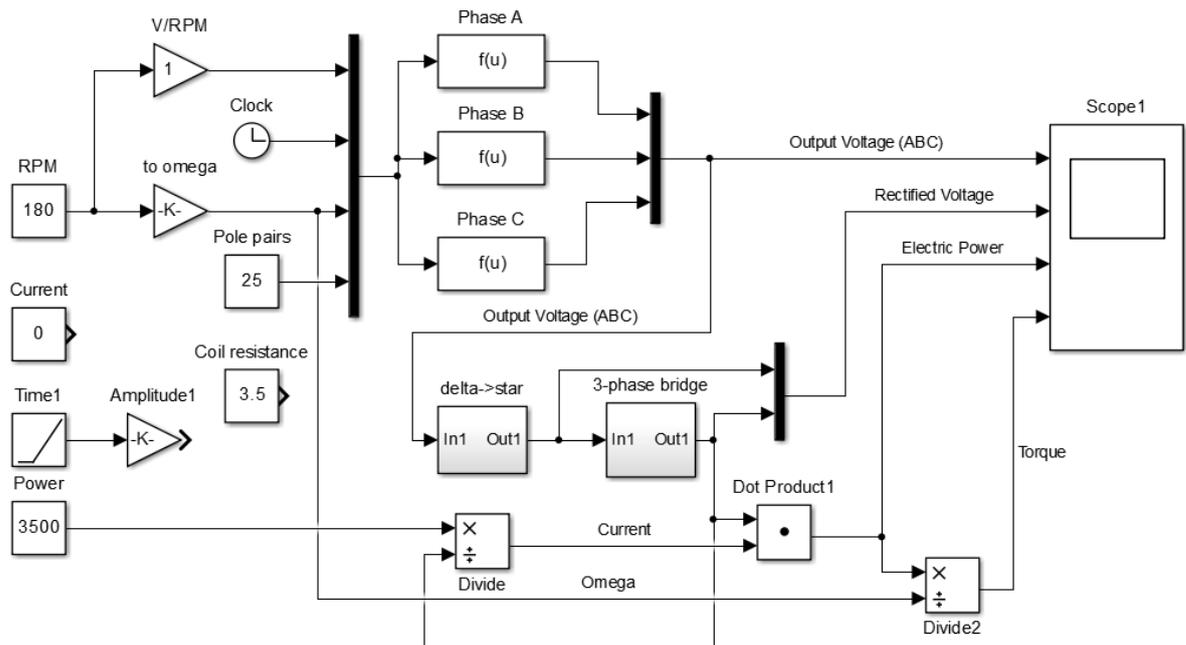


Рисунок 2.4 — Блок-схема модели генератора

На рисунке 2.5 приведена блок-схема модели расчета соединения обмоток генератора по схеме «звезда».

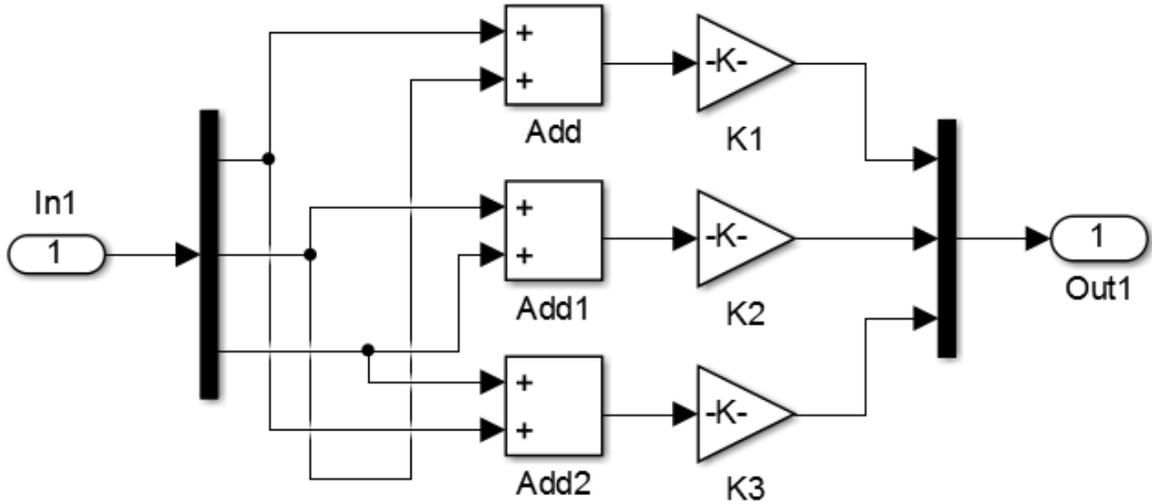


Рисунок 2.5 — Блок-схема модели соединения обмоток «звездой»

На рисунке 2.6 приведена блок-схема модели расчета работы трехфазного выпрямительного моста для имитации работы генератора переменного тока на нагрузку постоянного тока.

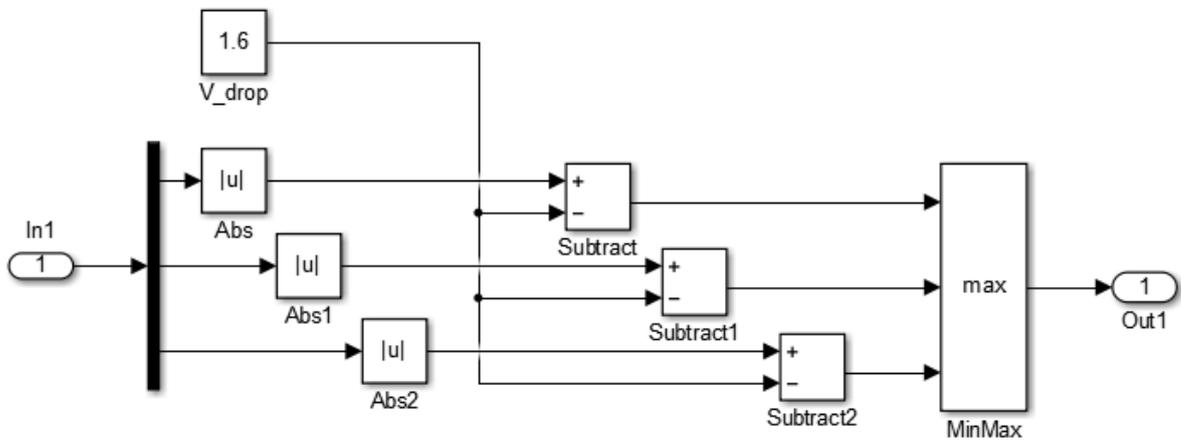


Рисунок 2.6 — Блок-схема модели трехфазного выпрямительного моста

На рисунке 2.7 приведен результат моделирования работы генератора при частоте вращения вала 180 об/мин на холостом ходу. Верхний график демонстрирует ЭДС в фазных обмотках генератора, а нижний график — напряжения на входе и выходе выпрямителя.

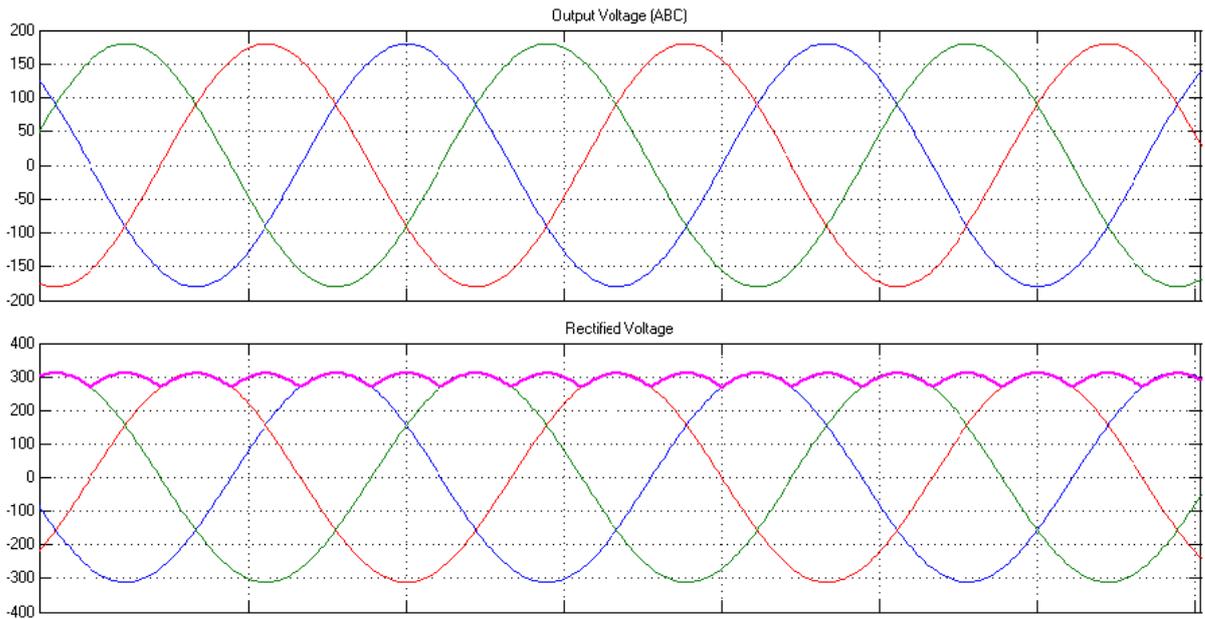


Рисунок 2.7 — Напряжения на фазных обмотках и выходе выпрямителя

На рисунке 2.8 приведен результат моделирования работы генератора при частоте вращения вала 180 об/мин и работе на нагрузку в 10А. Верхний график показывает электрическую мощность генератора, а нижний график — пульсации электромагнитного момента.

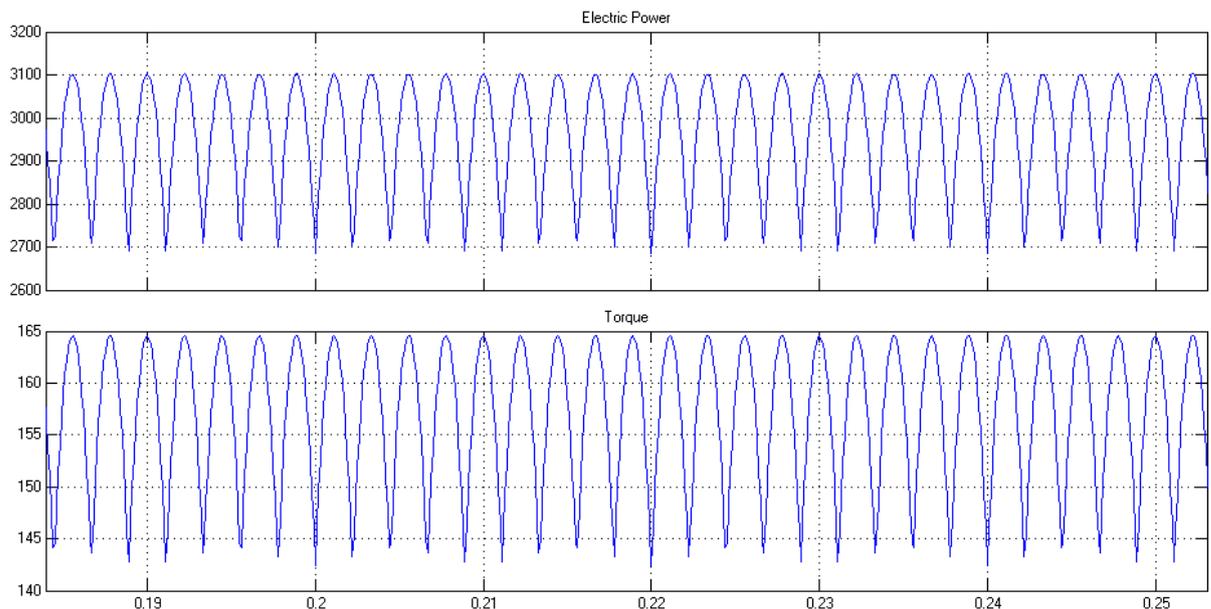


Рисунок 2.8 — Результат моделирования работы генератора с трехфазным выпрямительным мостом на нагрузку

Результат численного эксперимента показал, что использование трехфазного неуправляемого выпрямительного моста приводит к значительным пульсациям электромагнитного момента генератора из-за несинусоидального характера тока фазных обмоток генератора. Для того, чтобы устранить указанный недостаток выпрямителя, в качестве нагрузки генератора ВЭУ предложено использование активного выпрямителя напряжения, который позволяет считать, что фазные обмотки генератора нагружены активными сопротивлениями. Тогда ток в обмотке генератора синусоидален и соответственно синфазен напряжению в соответствующей обмотке, а электромагнитный момент генератора  $M_{эл} = 3 \cdot k \cdot I_{\Phi}$ , где  $I_{\Phi}$  — амплитуда фазного тока генератора.

## 2.4 Разработка модели управляющего контроллера

Для обеспечения качественной зарядки аккумуляторной батареи в составе ветроэнергетической установки и обеспечения функционирования ветроэнергетической установки согласно заданным алгоритмам требуется контроллер ветроэнергетической установки [123]. Основные функции, накладываемые на контроллер:

- регулирование тока генератора в условиях постоянно изменяющейся скорости ветра для обеспечения необходимой частоты вращения, определяемой равенством (2.1);
- ограничение тока заряда аккумуляторной батареи;
- обеспечение условий безопасной работы оборудования ветроэнергетической установки в рабочих и аварийных режимах.

На данный момент существует ряд различных способов и режимов зарядки аккумуляторных батарей. Все зарядные устройства (ЗУ) должны обеспечивать наиболее оптимальный режим заряда от начала до конца процесса зарядки. Таким образом, ЗУ обеспечивают и автоматически изменяют величины напряжения и тока в зависимости от стадии самого процесса зарядки. При зарядке аккумуляторной батареи постоянным током на протяжении всего времени заряда величина зарядного тока

остаётся постоянной. Преимуществом такого способа зарядки является относительно малая продолжительность заряда, однако в данном случае происходит ускоренное «старение» АКБ из-за высоких токовых нагрузок на последней стадии зарядки и, следовательно, снижается срок службы АКБ. Если же процесс зарядки производить при постоянном напряжении, то на последней стадии процесс существенно замедляется и растёт время зарядки АКБ. Третий способ – комбинированный или же совмещённый режим, сочетающий два ранее описанных способа. В начальной стадии процесса идет заряд постоянным током, а на завершающем этапе происходит стабилизация напряжения.

Можно утверждать, что большинство всех современных ЗУ работает по комбинированному методу, что позволяет оптимизировать такие параметры зарядки АКБ, как длительность процесса и температура аккумуляторной батареи. Дополнительным преимуществом такого подхода является возможность оптимизации параметров зарядки для увеличения ресурса аккумуляторной батареи. Влияние параметров заряда аккумуляторной батареи на ее ресурс можно объяснить тем, что ток заряда аккумуляторной батареи приводит к ее нагреву, а температура электролита влияет на скорость протекания химической реакции в АКБ. С одной стороны, это ускоряет процессы запасания и отдачи электрической энергии, что позволяет увеличить электрические токи разряда/заряда и сократить время заряда АКБ, с другой стороны это приводит к ускорению процессов деградации свойств аккумуляторной батареи.

Данное противоречие может быть разрешено решением задачи создания оптимального алгоритма зарядки.

Simulink позволяет пользователю создавать собственные блоки и объединять их в библиотеки для дальнейшего использования. Для этого существуют два способа: графический и программный. Графический способ представляет собой создание модели из стандартных блоков Simulink для реализации функций системы управления. Этот способ не является универсальным в силу того, что для перенесения результатов разработки на целевую систему управления требуются трудоемкие операции по

адаптации свойств разрабатываемого управляющего устройства к результатам полученной компьютерной модели. Программный способ является более универсальным в силу того, что позволяет создать компьютерную модель управляющего устройства, в основе которой будут положены свойства и алгоритмы работы управляющего устройства. При этом работа этого устройства будет осуществляться под управлением программного обеспечения, написанного на языке высокого уровня, и пригодного для управления компьютерной моделью и целевым устройством.

При этом задача состоит в том, чтобы создать пользовательский блок, моделирующий работу управляющей системы в соответствии с заданным алгоритмом, который мог бы использовать программный код целевой системы с микропроцессорным управлением [16].

Для реализации возможности создания пользовательских блоков с различными свойствами, задаваемыми с помощью программы, в Simulink существует блок S-Function. Это блок должен быть связан с программой, написанной на языке высокого уровня и описывающей работу этого блока. В этой программе обычно задаются такие параметры, как число входов и выходов этого устройства, параметры инициализации блока, а также взаимосвязь между входами и выходами. При этом описание работы этого блока может быть выполнено на языке C, что позволяет потом с легкостью перенести эту программу на целевое устройство [13].

Для проверки работоспособности математической модели она была реализована с помощью блока S-Function в пакете для математических расчетов MATLAB/Simulink, общий вид модели представлен на рисунке 2.9.

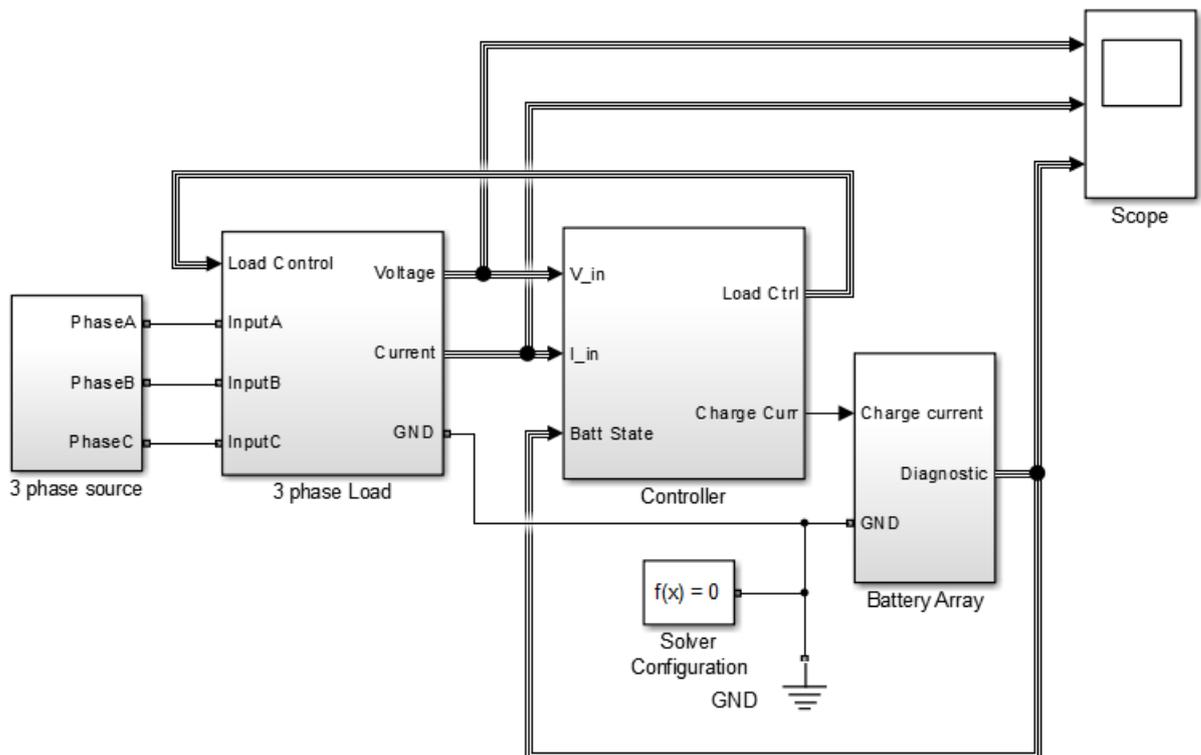


Рисунок 2.9 — Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink

Модель содержит следующие основные блоки:

**3 phase source** – трехфазный источник электрической энергии для зарядного устройства;

**3 phase load** – блок, имитирующий нагрузку электрической сети и содержащий датчики токов и напряжений для каждой фазы, а так же управляемые резисторы для имитации нагрузки;

**Controller** – блок, выполняющий функции управляющего контроллера зарядного устройства, содержит в себе блок S-Function, осуществляющий связь с управляющей программой на языке высокого уровня;

**Battery array** – массив ячеек аккумуляторной батареи, имитирующий поведение реальной аккумуляторной батареи и формирующий сигналы, несущие информацию о состоянии батареи для контроллера заряда;

**Scope** – программный осциллограф, позволяющий проконтролировать различные сигналы в процессе проведения численного эксперимента;

**Solver Configuration** – блок настроек параметров численного эксперимента, необходимый для корректной работы моделей.

Таким образом, основу управляющего устройства составляет блок «Controller», принимающий измеренные параметры системы от датчиков и формирующий управляющие сигналы. Структурная схема этого блока приведена на 2.10.

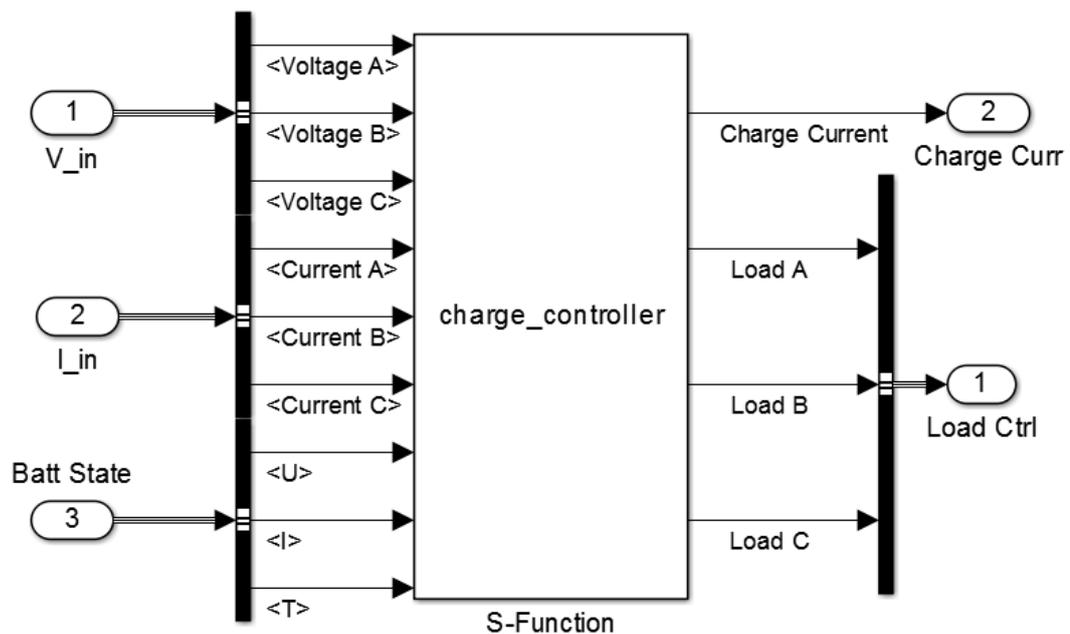


Рисунок 2.10 — Структурная схема управляющего устройства

Из структурной схемы видно, что управляющее устройство построено на блоке S-Function, который реализован с помощью программы, написанной на языке высокого уровня[29].

Программная среда MATLAB/Simulink имеет собственный редактор файлов[85], позволяющий производить работу над исходным текстом программного обеспечения без использования сторонних программ. Окно редактора представлено на 2.11.

```

Editor - D:\Projects\Matlab\controller\charge_controller.c*
EDITOR VIEW
charge_controller.c* x +
7 #define NINPUTS 9
8 #define NOOUTPUTS 4
9
10 /* Function: mdlInitializeSizes =====
11 static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
12 {
13     int_T i;
14
15     ssSetNumSFcnParams(S, 0);
16     if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
17         return; /* Parameter mismatch will be reported by Simu
18     }
19
20     if (!ssSetNumInputPorts(S, NINPUTS)) return;
21     for (i = 0; i < NINPUTS; i++) {
22         ssSetInputPortWidth(S, i, 1);
23         ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, i, 1);
24         ssSetInputPortOffsetTime(S, i, 0.0);
25         ssSetInputPortOverWritable(S, i, 0);
26     }

```

C / CPP source or header file Ln 13 Col 14

Рисунок 2.11 — Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink

Текст программы представляет собой С-код, в котором могут быть как операторы и функции языка С, так и callback-функции с макрокомандами, позволяющие этому блоку взаимодействовать с типами данных Simulink, выполняя команды и функции этого пакета. Данные callback-функции вызываются не самим С-файлом, а средой Simulink. Макрокоманды, входящие в callback-функции, имеют префикс `ss` – они направлены на работу со структурой `SimStruct`, содержащую всю информацию, которая используется при моделировании. Эти макрокоманды позволяют организовать взаимодействие программы с компьютерной моделью в процессе проведения численного эксперимента. Помимо callback-функций и макрокоманд, С-файл может содержать инструкции, вызывающие интер-

фейсные функции, которые имеются в пакете Matlab. Для этих операций предназначены функции с префиксом mex.

Callback-функции и макрокоманды являются собой необходимый минимум для написания файла на языке C для создания собственного SFunction блока для Simulink.

С помощью такого файла пользователь пакета Simulink может создать любой необходимый ему блок, который будет работать по заданному алгоритму. Данный способ создания S-Function блока является наиболее универсальным, поскольку не ограничен выбором библиотечных элементов и не требует изучения пользователем различных новых инструментов, таких как S-Function Builder.

Таким образом, использование блока S-Function позволяет создать любой необходимый блок, логика и алгоритм работы которого могут быть описаны на языке высокого уровня. При этом часть кода, описывающая работу этого блока, может быть легко перенесена на целевую систему, что облегчает разработку программного обеспечения системы управления, работающей под управлением микропроцессора.

Также стоит отметить, что данный способ использования блока S-Function блока является универсальным, что позволяет создавать любые блоки для компьютерной модели, не ограничивая исследователя или разработчика конечным набором библиотеки Simulink. Все это приводит к повышению эффективности процесса разработки и проектирования систем управления сложными объектами за счет применения математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

## **2.5 Моделирование накопителя электрической энергии**

Математическая модель позволяет проводить исследование процессов преобразования и передачи энергии в аккумуляторной батарее с системой управления ускоренной зарядкой, определять технические требования к таким элементам модели, и определять характеристики энергосбережения и энергоэффективности моделируемых процессов[83].

Для проведения качественного моделирования электрической системы необходимы такие элементы системы, как источники, преобразователи и потребители электрической энергии. При этом для каждого режима работы состав этих элементов будет различен. Поэтому проведем анализ режимов и сформулируем требования к моделям элементов системы.

Исходя из требований к компьютерной модели ветроэнергетической установки, можно выделить два основных режима эксплуатации системы: режим заряда АКБ и режим разряда АКБ.

Режим заряда АКБ должен обеспечивать зарядку аккумуляторной батареи от источника переменного тока. Таким образом, для осуществления этой функции потребуются:

- модель источника электрической энергии в виде генератора переменного тока;
- модель преобразователя переменного тока в постоянный, рассчитанный на полную мощность заряда АКБ (выпрямитель);
- модель преобразователя постоянного тока в ток заряда АКБ, рассчитанный на полную мощность заряда, который должен осуществлять регулирование тока заряда аккумуляторной батареи;
- модель аккумуляторной батареи, выполняющей функции потребителя электрической энергии.

Режим разряда АКБ должен обеспечивать питание нагрузки от аккумуляторной батареи. Таким образом, для осуществления этой функции потребуются:

- модель аккумуляторной батареи, выполняющей функции источника электрической энергии.
- модель инвертора переменного тока, рассчитанного на полную мощность нагрузки с учетом возможной перегрузки в момент включения, который должен осуществлять формирование выходного напряжения синусоидальной формы;
- модель потребителя электрической энергии в виде электродвигателя переменного тока.

Разрабатываемая модель электрохимических элементов должна учитывать следующие особенности эксплуатации аккумуляторных батарей[28]:

- влияние тока подзаряда на характеристики электрохимического элемента;
- влияние температуры на характеристики электрохимического элемента;
- учет режима разряда аккумулятора.

Эквивалентная электрическая схема модели электрохимической ячейки аккумулятора представлена на рисунке 2.12. Эта модель состоит из главной ветви ( $E_m$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $R_0$ ) и паразитной ветви ( $E_p$ ,  $R_p$ ,  $VD_1$ ). Напряжение  $V$  будет меняться в зависимости от условий работы. Концентрация электролита будет изменяться во время заряда и разряда.

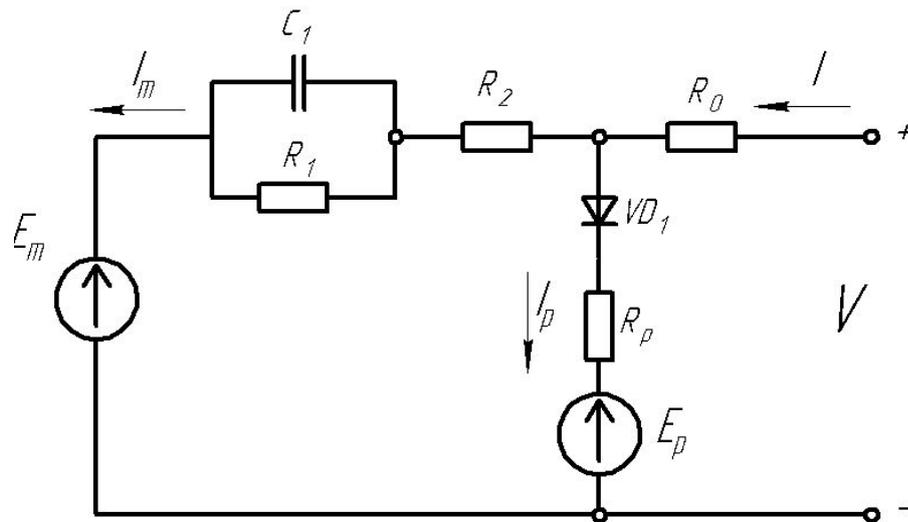


Рисунок 2.12 — Эквивалентная электрическая схема модели электрохимической ячейки аккумулятора

Математическая модель процессов в аккумуляторе разработана в MatLab[120]. Модель емкости дает состояние заряда (SOC) и глубины заряда батареи, модель напряжения дает сопротивление как функция состояния заряда и глубины заряда, тепловая модель дает внутреннюю температуру.

Входными сигналами математической модели являются ток и температура окружающей среды, а выходными – напряжение, температура электролита и т.д., как показано на рисунке 2.13.

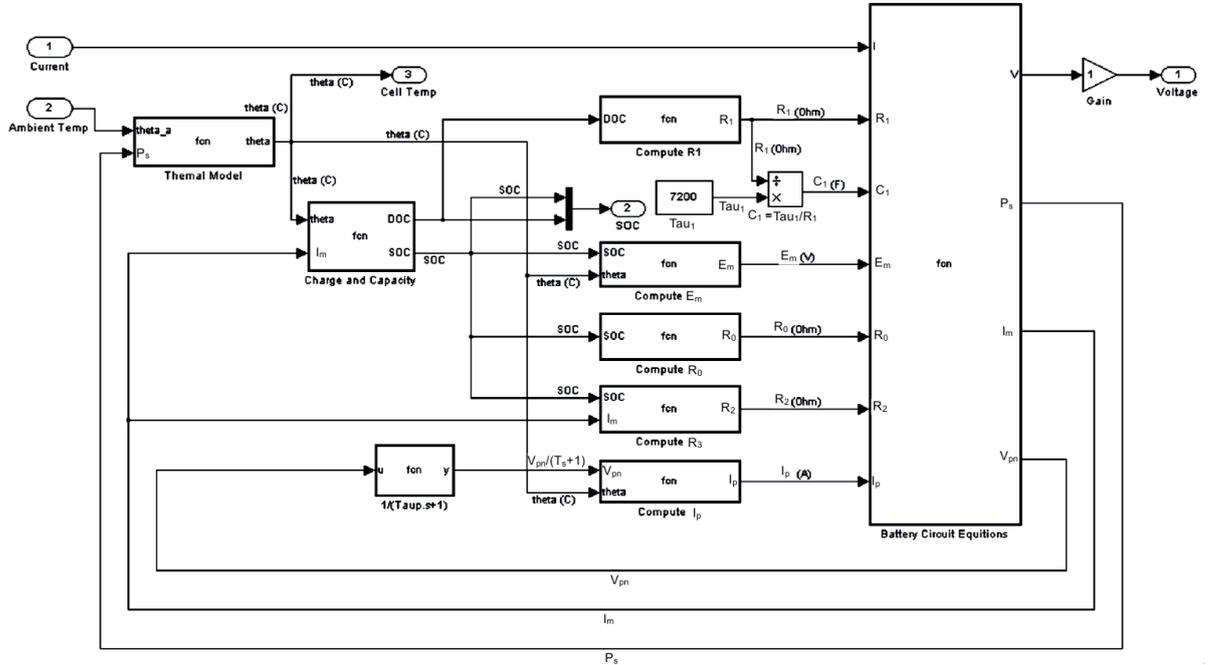


Рисунок 2.13 — Блок-схема компьютерной модели ячейки АКБ

Уравнения батареи для математической модели будут использоваться для имитации параметров, включая основную ветвь, паразитарную ветвь, емкость и температуру электролита.

Главная ветвь (рисунок 2.12).

Напряжение холостого хода  $E_m$  определяется следующим образом:

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + \Theta) (1 - SOC) \quad (2.6)$$

где:

$E_{m0}$  — напряжение холостого хода при полном заряде, В;

$K_E$  — температурный коэффициент,  $B/^{\circ}C$ ;

$\Theta$  — температура электролита,  $^{\circ}C$ ;

$SOC$  — состояние заряда батареи, о.е.

Основное сопротивление главной ветви  $R_1$  (рисунок 2.12):

$$R_1 = -R_{10} \cdot \ln(DOC) \quad (2.7)$$

где:

$R_{10}$  — постоянная, Ом;

$DOC$  — глубина заряда батареи, о.е.

Емкость главной ветви  $C_1$  (рисунок 2.12):

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (2.8)$$

где:

$\tau_1$  — постоянная времени главной ветви, с.

Сопротивление  $R_2$  (рисунок 2.12) определяется по формуле:

$$R_2 = R_{20} \frac{e^{A_{21} \cdot (1-SOC)}}{1 + e^{\left( A_{22} \frac{I_m}{I^*} \right)}} \quad (2.9)$$

где:

$R_{20}$  — сопротивление в нормальных условиях, Ом

$A_{21}, A_{22}$  — постоянные, о.е.;

$I_m$  — ток главной ветви, А;

$I^*$  — текущий номинальный ток батареи, А.

Величина тока разряда в паразитной ветви  $I_p$  (рисунок 2.12)

$$I_p = V_{pn} G_{p0} \cdot e^{\left( \frac{\left( \frac{V_{pn}}{\tau_p \cdot s + 1} \right)}{V_{p0}} + A_p \left( 1 - \frac{\Theta}{\Theta_f} \right) \right)} \quad (2.10)$$

где:

$V_{pn}$  — напряжение на паразитной ветви, В;

$G_{p0}$  — постоянная, с;

$\tau_1$  — постоянная времени паразитной ветви, с;

$V_{p0}$  — постоянная, В;

$A_p$  — постоянная, о.е.;

$\Theta$  — температура электролита,  $^{\circ}C$ ;

$\Theta_f$  — температура замерзания электролита,  $^{\circ}C$ .

Уровень заряда батареи  $Q_e$ :

$$Q_e(t) = Q_{init} + \int_0^t -I_m(\tau) dr \quad (2.11)$$

где:

$Q_{init}$  — начальная величина заряда,  $A \cdot c$ ;

$I_m$  — ток в основной ветви,  $A$ ;

$\tau$  — переменная времени интегрирования,  $c$ ;

$t$  — время моделирования,  $c$ .

Уровень емкости батареи  $C$ :

$$C(I, \Theta) = \frac{K_c \cdot C_{0*} \cdot K_t}{1 + (K_c - 1) \cdot \left(\frac{I}{I^*}\right)^{\delta}} \quad (2.12)$$

где:

$K_c$  — постоянная;

$C_{0*}$  — емкость батареи без нагрузки при  $\Theta^{\circ}C$ ,  $A \cdot c$

$K_t$  — температурный коэффициент см. табл. 1;

$\Theta$  — температура электролита в  $^{\circ}C$ ;

$I$  — ток разряда в амперах;

$I^*$  — текущий номинальный ток батареи,  $A$ ;

$\delta$  — постоянная

Состояние заряда SOC и глубина заряда DOC батареи определяются следующими выражениями:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \Theta)} \quad (2.13)$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \Theta)}$$

где:

$Q_e$  — заряд батареи,  $A \cdot c$ ;

$C$  — емкость аккумулятора,  $A \cdot c$ ;

$\Theta$  — температура электролита,  $^{\circ}C$ ;

$I_{avg}$  — текущий средний ток разряда, А.

Текущий средний ток разряда  $I_{avg}$  определяется по формуле

$$I_{avg} = \frac{I_m}{\tau_1 s + 1} \quad (2.14)$$

где:

$I_{avg}$  — текущая средняя разряда, А;

$I_m$  — ток основной ветви, А;

$\tau_1$  — постоянная времени основной ветви, с.

Температура электролита в батарее  $\Theta$ :

$$\Theta(t) = \Theta_{init} + \int_0^t \frac{\left( P_S - \frac{\Theta - \Theta_a}{R_{\Theta}} \right)}{C_{\Theta}} d\tau \quad (2.15)$$

где:

$\Theta_a$  — температура воздуха окружающей среды,  $^{\circ}C$ ;

$\Theta_{init}$  — начальная температура батареи (принимается равной температуре воздуха окружающей среды),  $^{\circ}C$ .

$C_{\Theta}$  — тепловая емкость, Дж/ $^{\circ}C$ ;

$\tau$  — переменная времени интегрирования, с;

$R_{\Theta}$  — тепловое сопротивление,  $^{\circ}C/Вт$ ;

$t$  — время моделирования, с;

$P_S$  — потеря мощности на активных сопротивлениях  $R$  из  $R_0$  и  $R_2$ ,

Вт.

Потеря мощности  $P_S$ :

$$P_S = \frac{V_{R_1}^2}{R_1} + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_2, \quad (2.16)$$

$$R_0 = R_{00} \cdot [1 + A_0(1 - SOC)],$$

где:

$R_{00}$  — сопротивление  $R_0$  при полностью заряженной батарее ( $SOC = 1$ ).

Постоянные  $E_{m0}$ ,  $R_{00}$ ,  $R_{10}$ ,  $R_{20}$ ,  $V_{PN}$  ( $V_{PN} = IR_1 + E_m$ ),  $G_{P0}$ ,  $A_p$ ,  $A_{21}$  являются фиксированными величинами для конкретного аккумулятора (в данном случае свинцово-кислотной АКБ). Эти константы или параметры могут быть разделены на три категории:

- параметры емкости;
- параметры напряжения;
- тепловые параметры.

Параметры, относящиеся к емкости аккумулятора.

Чтобы найти параметры четырех постоянных были выполнены тесты при различных токах и температурах (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Параметры емкости аккумуляторной батареи

Разрядный ток, А	Температура, °C	Емкость, А · ч
18	25	68.1
18	35	75
10	25	100
15	25	76.6

Температура замерзания электролита батареи задана как  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Эти четыре пары  $(I_1, \Theta_1)$ ,  $(I_1, \Theta_2)$ ,  $(I_2, \Theta_1)$  и  $(I_3, \Theta_1)$  используются в системе четырех уравнений найти константы  $C_{\Theta}^*$ ,  $K_c$ ,  $\epsilon$  и  $\delta$ .

Используя значение температуры коэффициент  $\alpha$  был найден  $C(I, \Theta)$ :

$$C(I, \Theta) = (1 + \alpha \Delta \Theta) C(I_0, \Theta). \quad (2.17)$$

Значение  $\epsilon$  находится из уравнения

$$\epsilon = \alpha(\Theta_n - \Theta_f). \quad (2.18)$$

Кроме того,  $C_{\Theta}^*$  определяется соотношением

$$C(I_n, \Theta_n) = C_0^* \left(1 + \frac{\Theta_n}{\Theta_f}\right)^\epsilon \quad (2.19)$$

Отсюда  $K_C$  и  $\delta$  были найдены соотношением (2.12).

В таблице 2.2 представлены значения параметров модели аккумуляторной батареи, определенных из эксперимента.

Таблица 2.2 — Конечные значения параметров для математической модели аккумуляторной батареи

Параметры	$C_0^*$	$K_C$	$\epsilon$	$\delta$	$\alpha$	$K_t$
Значения	72.37А · ч	1.2	0,75	2	0,011	0,47

## 2.6 Синтез универсальной компьютерной модели ветроэнергетической установки для имитационного моделирования

Согласно функциональной схеме имитационной модели ветроэнергетической установки, приведенной на рисунке 2.1 в пакете MATLAB/Simulink из разработанных модулей была синтезирована обобщенная модель ВЭУ, общий вид которой представлен на рисунке 2.14.

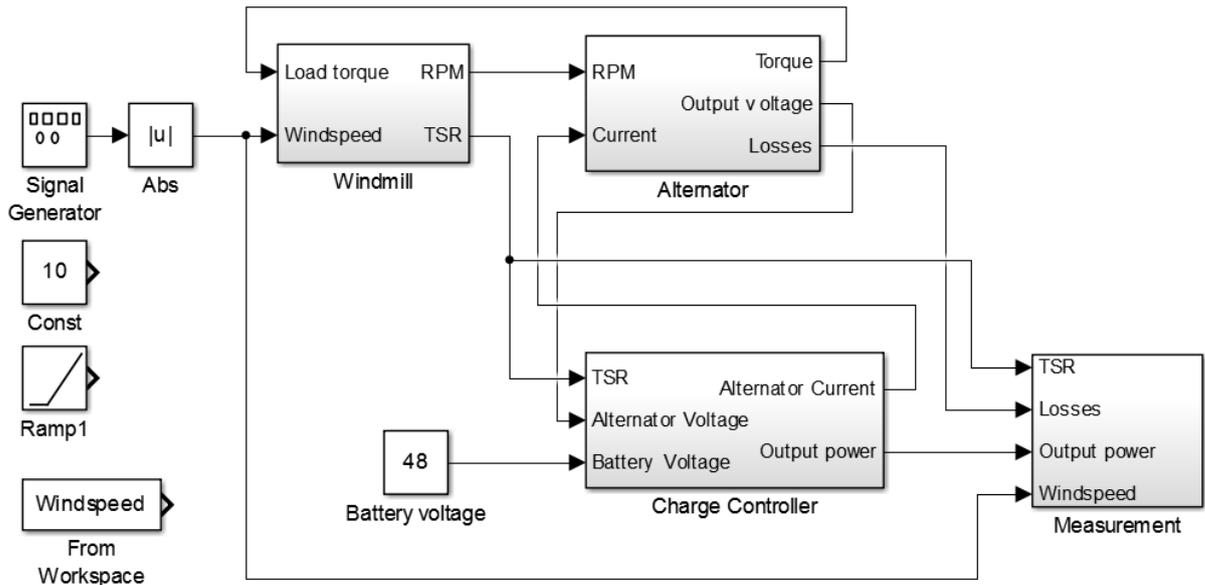


Рисунок 2.14 — Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink

Модель предназначена для проведения модельных экспериментов по исследованию различных алгоритмов управления ветроэнергетической установкой, возможность чего обеспечивается заданием различных алгоритмов на языке высокого уровня в модуле контроллера ВЭУ.

## 2.7 Выводы по главе

В результате работы по разработке компьютерных моделей для имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink была создана универсальная модель ветроэнергетической установки, состоящая из следующих модулей:

- модуль генерации ветрового воздействия, выполняющий функцию источника энергии для работы ветроэнергетической установки;
- модуль ветродвигателя ветроэнергетической установки, который преобразует энергию ветра в механическую энергию вращения вала ветроколеса;
- модуль электрического генератора, который преобразует механическую энергию вращения вала в электрическую энергию;

– модуль универсального контроллера ветроэнергетической установки, обеспечивающий работу ВЭУ по заданному алгоритму, и предназначенный для исследования различных алгоритмов и способов управления мощностью ветроэнергетической установки;

– модуль аккумуляторной батареи, выполняющий функцию буферного накопителя электрической энергии.

## ГЛАВА 3

**Исследование компьютерной модели и выбор оптимального способа управления мощностью ветроэнергетической установки**

Глава посвящена разработке методики измерения эффективности ВЭУ и исследованиям различных способов управления мощностью ВЭУ с вертикальной осью вращения, формулируются выводы о выборе оптимального способа управления ветроэнергетической установкой.

**3.1 Разработка методики измерения эффективности ВЭУ**

Для обеспечения возможности исследования различных алгоритмов управления ветроэнергетической установкой необходима методика определения производительности ВЭУ[1]. Основной мерой производительности ВЭУ является КИЭВ при заданной скорости ветра[4]. Известные методики определения КИЭВ не обеспечивают точные результаты в условиях постоянно меняющейся скорости ветра, т.к. предполагают использование данных, измеренных в установившемся режиме работы[18], поэтому было принято решение о разработке методики определения эффективности ВЭУ в реальных условиях эксплуатации, когда скорость ветра непрерывно меняется в широких пределах за достаточно короткий промежуток времени.

В качестве рабочей гипотезы было выдвинуто предположение, что непосредственное измерение мгновенных значений скорости ветра и генерируемой электрической мощности можно использовать для расчета КЭИВ[19; 84].

Было рассмотрено два способа осреднения КИЭВ. Первый способ — нахождение среднего арифметического значения за определенный промежуток времени:

$$C_{p\text{средн}} = \frac{\sum P_{эл_i}/P_{a_i}}{n}; \quad (3.1)$$

где  $C_{p_{\text{средн}}}$  — среднее значение КЭИВ;  $P_{эл_i}$  — мгновенное значение генерируемой электрической мощности;  $P_{a_i}$  — мгновенное значение аэродинамической мощности;  $n$  — количество выборок.

Вторым способом предложено осреднение с помощью численного интегрирования, тогда интегральный коэффициент использования энергии ветра:

$$C_{p_{\text{интегр}}} = \frac{\int P_{эл}(t)dt}{\int P_a(t)dt}; \quad (3.2)$$

где  $C_{p_{\text{интегр}}}$  — интегральное значение КЭИВ;  $P_{эл}(t)$  — зависимость генерируемой электрической мощности от времени;  $P_a(t)$  — зависимость аэродинамической мощности от времени.

Схема измерения в среде MATLAB/Simulink представлена на рисунке 3.1.

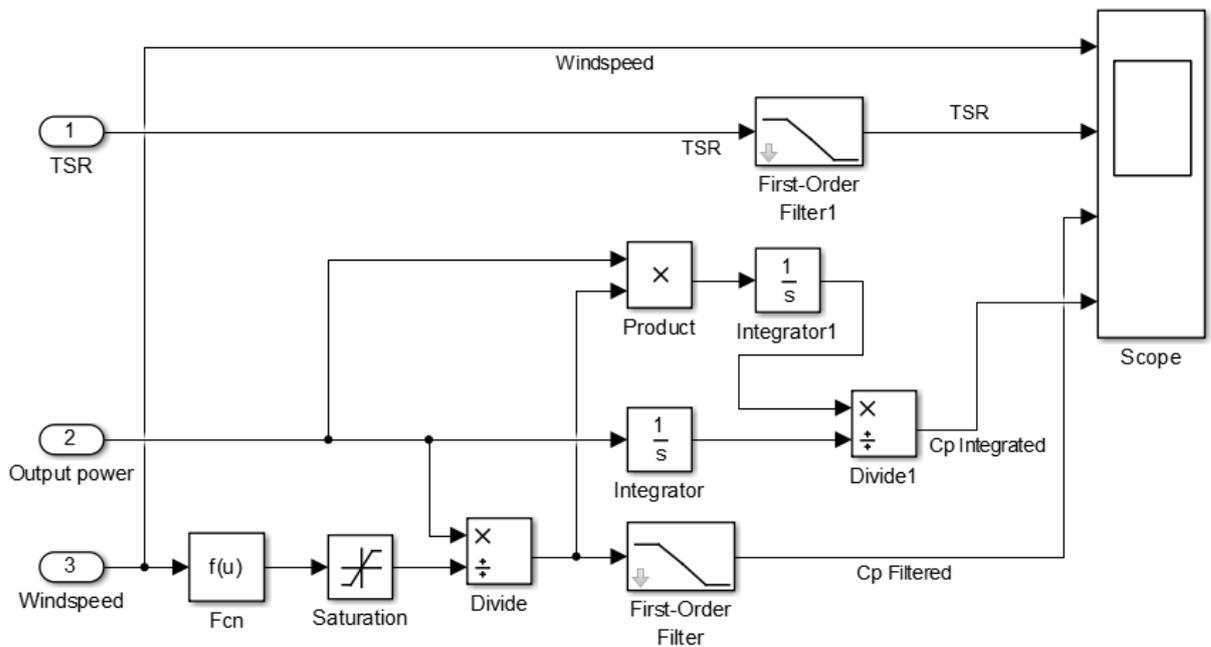


Рисунок 3.1 — Схема измерения КИЭВ в среде MATLAB/Simulink

Компьютерная модель ВЭУ была исследована при воздействии периодически изменяющейся скорости ветра, рисунок 3.2, а результаты измерения  $C_p$  при воздействии этой скорости ветра представлены на рисунке 3.3.

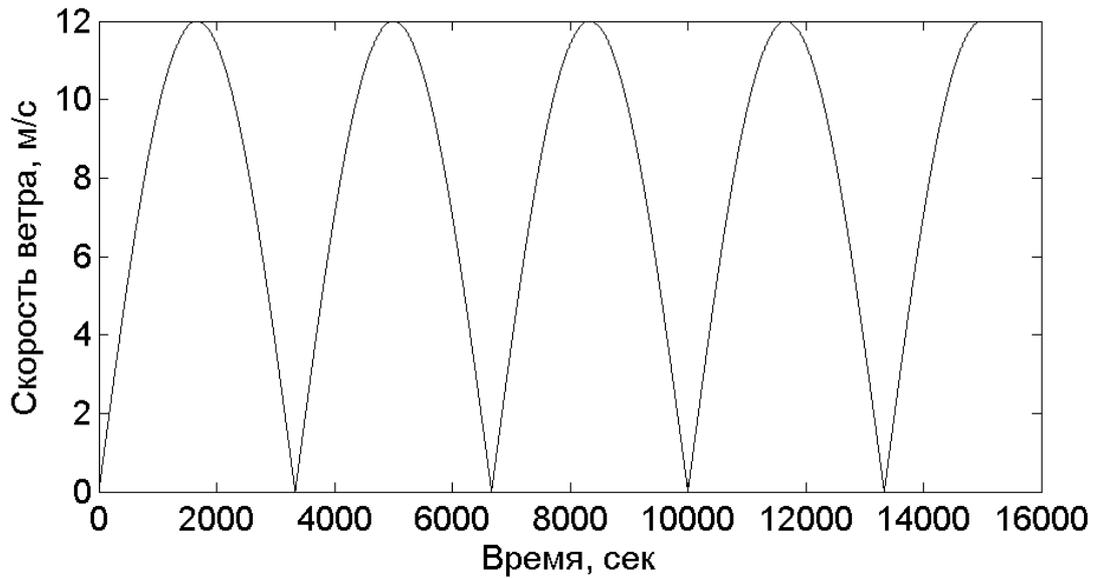


Рисунок 3.2 — Периодически изменяющаяся скорость ветра

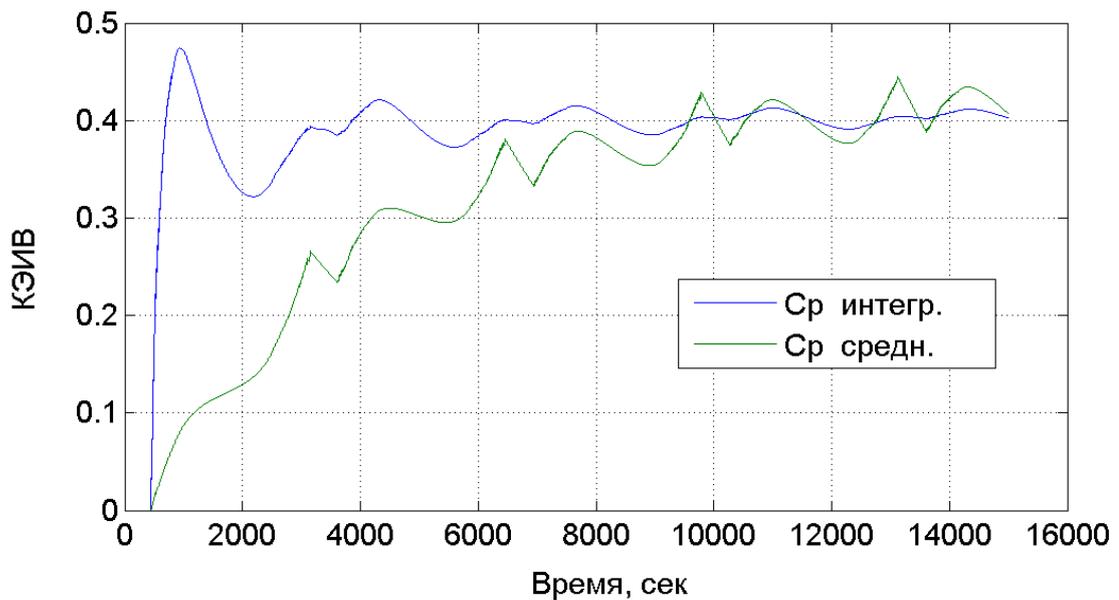


Рисунок 3.3 — Результаты измерения  $C_P$  при воздействии периодически изменяющейся скорости ветра

Из графиков на рисунке 3.3 видно, что оба способа демонстрируют возможность определения КИЭВ, который колеблется вокруг заданного в модели значения. При этом можно отметить, что метод среднего значения дает больший размах колебаний определенного значения КИЭВ, что может сказаться на точности измерения. Определение коэффициента с

использованием метода численного интегрирования позволяют получить более точный результат, однако, чтобы обеспечить хорошую точность, требуется большее время измерения[15].

При анализе измеренных мгновенных значений КИЭВ видно, что его величина не постоянна и изменяется во времени в широких пределах, что можно объяснить инерционными процессами, происходящими в системе управления ВЭУ в условиях постоянно меняющейся скорости ветра[63; 84]. Поэтому было выдвинуто предположение, что для получения корректных результатов необходимо необходимо определение аэродинамического момента, развиваемого ветроколесом.

Основываясь на определении КИЭВ как отношения механической мощности ветроколеса к полной мощности набегающего потока ветра, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса ВЭУ[6], можно определить, что:

$$C_P = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ветр}}}, \quad (3.3)$$

где:

$C_P$  — КИЭВ;

$P_{\text{мех}}$  — мощность механическая на валу ветроколеса;

$P_{\text{ветр}}$  — мощность ветра, проходящего через ометаемую площадь ветроколеса.

Мощность механическую можно выразить как произведение угловой скорости  $\omega$  на момент аэродинамический  $M_a$ :

$$P_{\text{мех}} = M_a \cdot \omega \quad (3.4)$$

Мощность набегающего потока определяется как:

$$P_{\text{ветр}} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}, \quad (3.5)$$

где:

$\rho$  — плотность воздуха;

$V$  — скорость ветра;

$S$  — ометаемая площадь.

Подставив (3.4) и (3.5) в (3.3), получаем, что:

$$C_P = \frac{2 \cdot M_a \cdot \omega}{\rho \cdot S \cdot V^3}, \quad (3.6)$$

Анализируя (3.6) видно, что параметры  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $V$  и  $S$  являются легко измеряемыми или константами. Определение  $M_a$  является более сложной задачей из-за влияния инерции ветроколеса.

Дифференциальное уравнение вращения ветроколеса записывается как:

$$J \cdot \dot{\omega} = M_a + M_{\text{эм}} \Rightarrow M_a = J \cdot \dot{\omega} - M_{\text{эм}}, \quad (3.7)$$

где:

$J$  — момент инерции системы;

$M_{\text{эм}}$  — электромагнитный момент генератора.

Электромагнитный момент генератора  $M_{\text{эм}}$  пропорционален току генератора и может быть измерен датчиком тока, момент инерции  $J$  является конструктивным параметром ветроколеса и может быть определен как аналитически, так и измерением динамических характеристик реального объекта. Определение аэродинамического момента  $M_a$  является более сложной задачей, решить которую можно с помощью известных методов теории автоматизированного управления [74; 101].

Предлагаемая методика определения КИЭВ основана на использовании наблюдателя пониженного порядка, иначе называемого редуцированным наблюдателем [101] для определения аэродинамического момента ветроколеса по электромагнитному моменту генератора с учетом момента инерции ветроколеса.

В случае, когда все переменные состояния объекта управления измеряемы и требуется оценить возмущение, которым в нашем случае является аэродинамический момент ветроколеса, для оценки такого возмущения возможно применение наблюдателя пониженного порядка, иначе называемого редуцированным наблюдателем. Редуцированный наблюда-

тель выбран по причине того, что для решения поставленной задачи требуется оценка только одной переменной состояния — аэродинамического момента ветроколеса.

В общем случае модель объекта управления можно можно представить в виде уравнений [101]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + D \cdot f, \\ y = C \cdot x. \end{cases} \quad (3.8)$$

где:

$x$  — вектор состояния;

$y$  — выходная переменная;

$u$  — управляющее воздействие;

$f$  — вектор возмущений;

$A, B, C, D$  — матрицы модели объекта управления.

Наблюдатель состояния формируется на базе модели объекта управления вида

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \cdot \hat{x} + B \cdot u + D \cdot f, \\ \hat{y} = C \cdot \hat{x}. \end{cases} \quad (3.9)$$

и формирует оценку  $\hat{y}(t)$  выходной переменной  $y(t)$  и оценку  $\hat{x}(t)$  вектора состояния  $x(t)$ . При этом величина оценки уточняется за счет обратных связей по ошибке выходной переменной (невязке)

$$\tilde{y} = y - \hat{y}$$

с помощью управляющего воздействия наблюдателя  $u_n$ .

Из уравнения равенства моментов ветроколеса (3.7) следует, что объект управления можно описать следующим уравнением:

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{J} \cdot M_{эм} + \frac{1}{J} \cdot M_a. \quad (3.10)$$

Сопоставив (3.8) и (3.10) определяем, что для случая синтеза наблюдателя аэродинамического момента будет:

$x$  — угловая скорость  $\omega$ ;

$y$  — угловая скорость  $\omega$ ;

$f$  — момент аэродинамический  $M_a$ ;

Матрицы модели соответственно определяются как  $A = 0$ ;  $B = -\frac{1}{J}$ ;  $C = 1$ ;  $D = \frac{1}{J}$ .

Модель внешней среды в каноническом виде задается как[101]:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \Gamma \cdot \xi \\ f = H \cdot \xi \end{cases} \quad (3.11)$$

где  $\xi$ —вектор состояния внешней среды;  $\Gamma$  и  $H$ —матрицы коэффициентов внешней среды;  $f$ —возмущающее воздействие.

Из соображений

$$\begin{cases} \widehat{M}_a = 0 + u_n \text{ при } \Gamma = 0 \\ M_a - \widehat{M}_a = \widetilde{M}_a \text{ при } \widetilde{M}_a \rightarrow 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

примем, что  $H = 1$ ,  $\xi = M_a$ , тогда объект управления совместно с влиянием внешней среды можно представить системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = -\frac{1}{J}M_{эм} + \frac{1}{J}M_a, \\ \dot{M}_a = 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

Для наблюдателя пониженного порядка примем, что  $u_n = K_n \cdot \widetilde{M}_a$ , где  $K_n$  — коэффициент усиления обратной связи наблюдателя.

Для преобразования модели внешней среды в реализуемую схему введем вспомогательную выходную переменную

$$y' = C' \cdot \omega, \quad (3.14)$$

представляющую собой линейную комбинацию измеряемых переменных состояния, причем  $C'$  выбирается из условия  $C' \cdot D = 1$ , тогда  $C' = J$ .

Вектор состояния наблюдателя пониженного порядка задается выражением

$$z = \widehat{\xi} - K_n \cdot y' = \widehat{M}_a - K_n \cdot J \cdot \omega, \quad (3.15)$$

а уравнение наблюдателя находится дифференцированием (3.15) по времени и после подстановок принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{z} = \Gamma_H \cdot z + (\Gamma_H \cdot K_H \cdot C' - K_H \cdot C' \cdot A) \cdot x - K_H \cdot C' \cdot B \cdot u_H \\ \Gamma_H = \Gamma - K_H \cdot H \end{cases} \quad (3.16)$$

После подстановок и преобразований получаем:

$$\dot{z} = -K_H \cdot H \cdot z + (-K_H^2 \cdot H \cdot C' - K_H \cdot C' \cdot A) \omega - K_H \cdot C' \cdot B \cdot M_{\text{эм}} \quad (3.17)$$

Раскрыв скобки и подставив необходимые значения получаем наблюдатель пониженного порядка для оценки аэродинамического момента ветроколеса по электромагнитному моменту генератора (измеряемая величина) и моменту инерции ветроколеса (конструктивный параметр):

$$\begin{cases} \dot{z} = K_H \cdot z - K_H^2 \cdot J \cdot \omega + K_H \cdot M_{\text{эм}} \\ \widehat{M}_a = z + K_H \cdot J \cdot \omega \end{cases} \quad (3.18)$$

Подставив уравнение наблюдателя (3.18) в формулу определения  $C_p$  (3.6), получаем финальные уравнения для определения КИЭВ:

$$\begin{cases} \dot{z} = K_H \cdot z - K_H^2 \cdot J \cdot \omega + K_H \cdot M_{\text{эм}} \\ \widehat{C}_P = \frac{2 \cdot \omega \cdot (z + K_H \cdot J \cdot \omega)}{\rho \cdot S \cdot V^3}, \end{cases} \quad (3.19)$$

Блок-схема редуцированного наблюдателя, реализованного в среде MATLAB/Simulink, показана на рисунке 3.4.

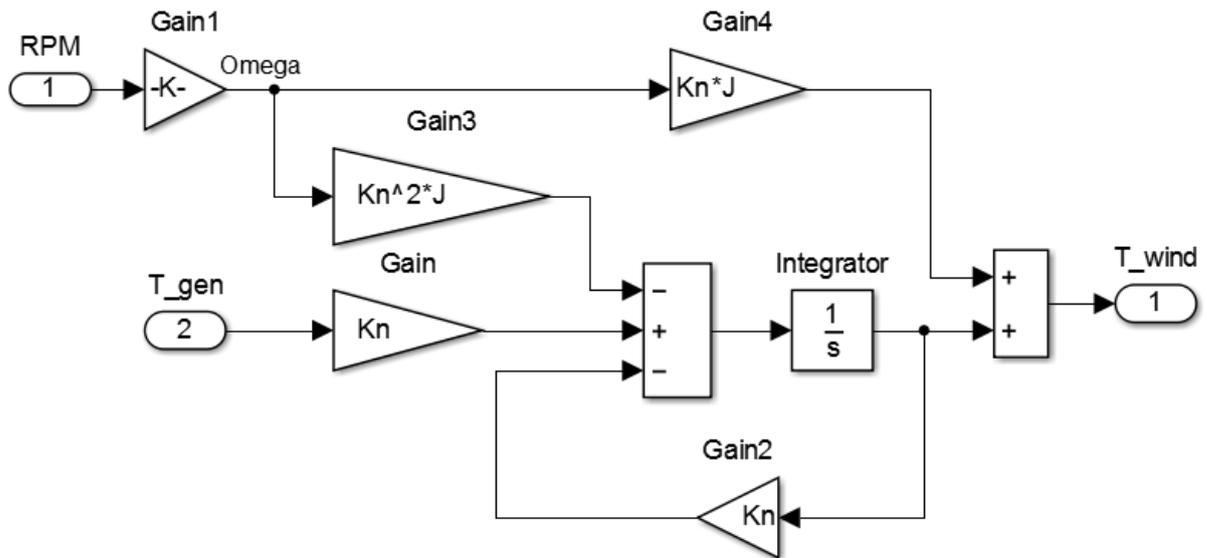


Рисунок 3.4 — Блок-схема редуцированного наблюдателя в среде MATLAB/Simulink

Для проверки качества функционирования разработанного наблюдателя аэродинамического момента его модель была подвергнута тестовым воздействиям, при этом производилось сравнение аэродинамического момента  $M_a$ , определяемого моделью ветроколеса и оценки аэродинамического момента  $\widehat{M}_a$ , полученной с помощью наблюдателя. Результаты испытаний модели наблюдателя приведены на рисунках 3.5 и 3.6

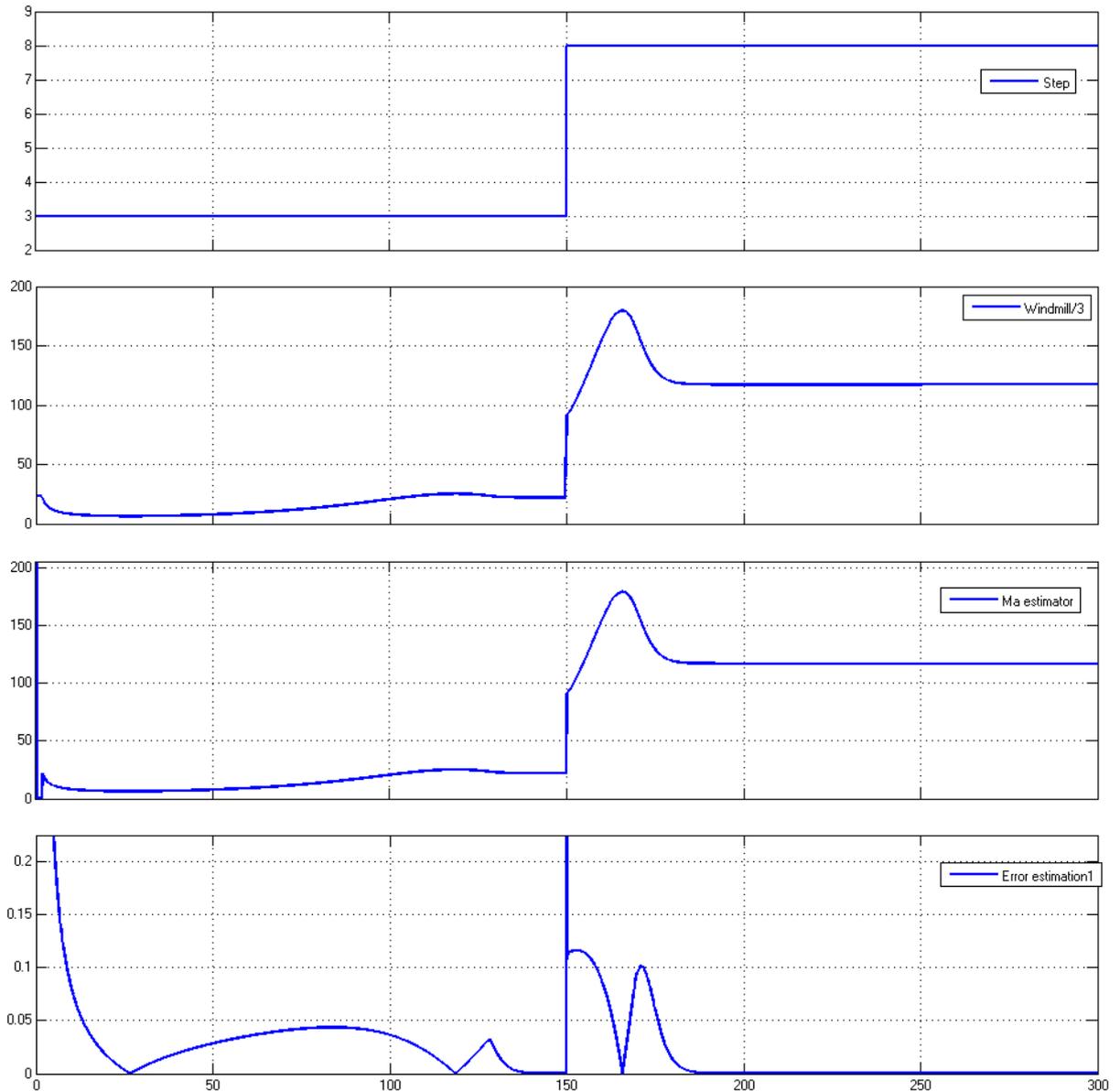


Рисунок 3.5 — Результаты вычислительного эксперимента при воздействии ступенчатого изменения скорости ветра

На графиках изображено:

- Верхний график показывает изменяющуюся скорость ветра.
- Второй сверху график показывает величину аэродинамического момента  $M_a$ , определяемого моделью по (2.2).
- Третий сверху график показывает оценку аэродинамического момента  $\widehat{M}_a$ , определенное с помощью разработанного редуцированного наблюдателя.

– Четвертый сверху график показывает ошибку (невязку) аэродинамического момента  $\widetilde{M}_a$ , определенного с помощью разработанного редуцированного наблюдателя относительно заданного теоретического значения.

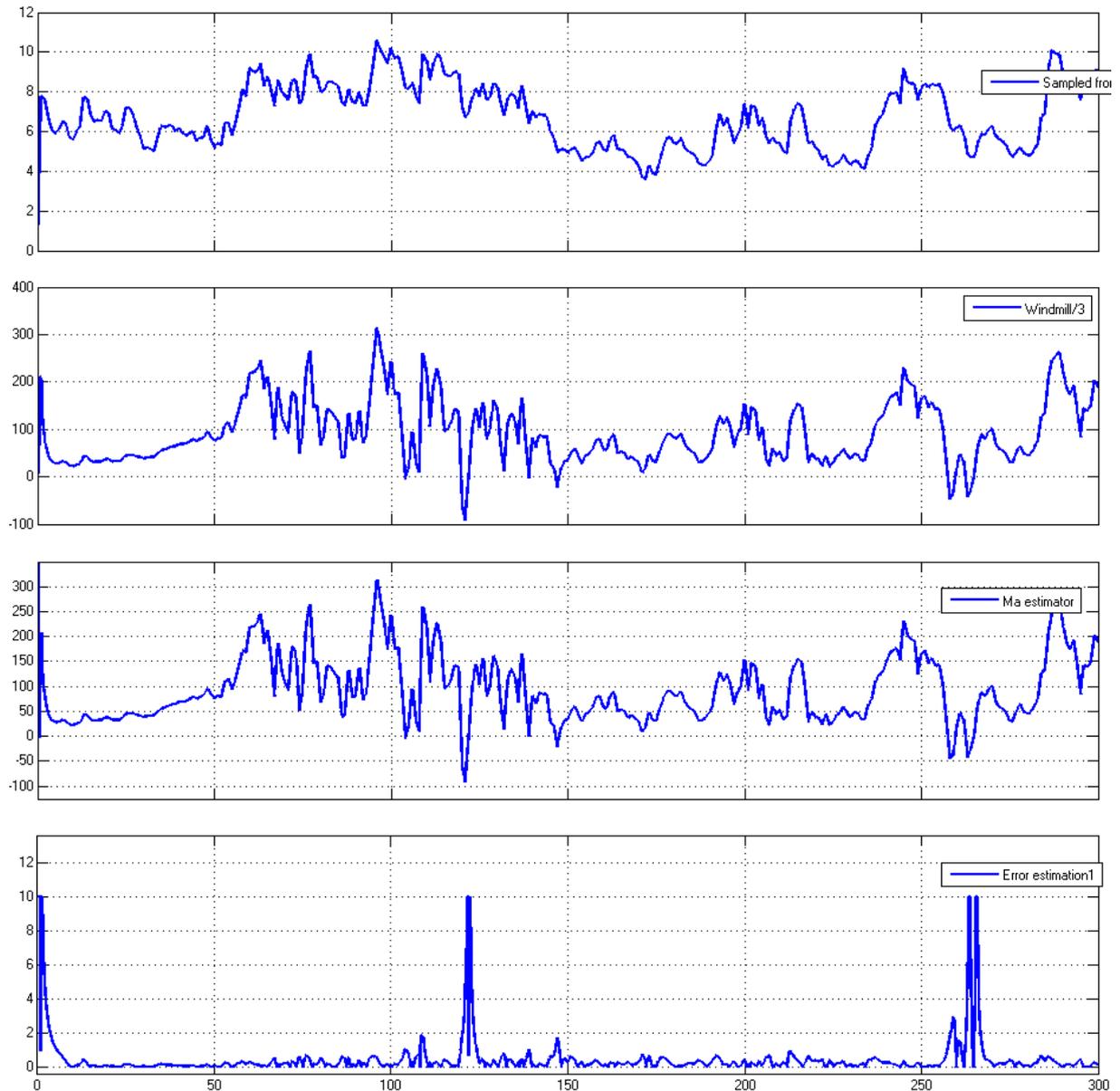


Рисунок 3.6 — Результаты вычислительного эксперимента при воздействии изменяющейся скорости ветра

Анализируя результаты видно, что ошибка определения аэродинамического момента не превышает 2%, что позволяет использовать редуцированный наблюдатель для определения КИЭВ ВЭУ в процессе работы при непрерывно изменяющейся скорости ветра.

Подставив оценку аэродинамического момента ветроколеса  $\widehat{M}_a$ , определяемую с помощью разработанного редуцированного наблюдателя, в (3.6) получаем возможность определять КИЭВ ВЭУ, однако при этом необходимым условием является необходимость измерения скорости ветра  $V$ , что несложно сделать, например, с помощью анемометра.

Для оценки качества определения КИЭВ ВЭУ была использована компьютерная модель ВЭУ, описание которой приведено во второй главе, и характеристики которой определялись с помощью трех способов:

1. Интегрирования мгновенных значений;
2. Осреднение мгновенных значений;
3. Применение наблюдателя.

Результаты вычислительного эксперимента по сравнению указанных способов определения КИЭВ приведены на рисунках 3.7 и 3.8.

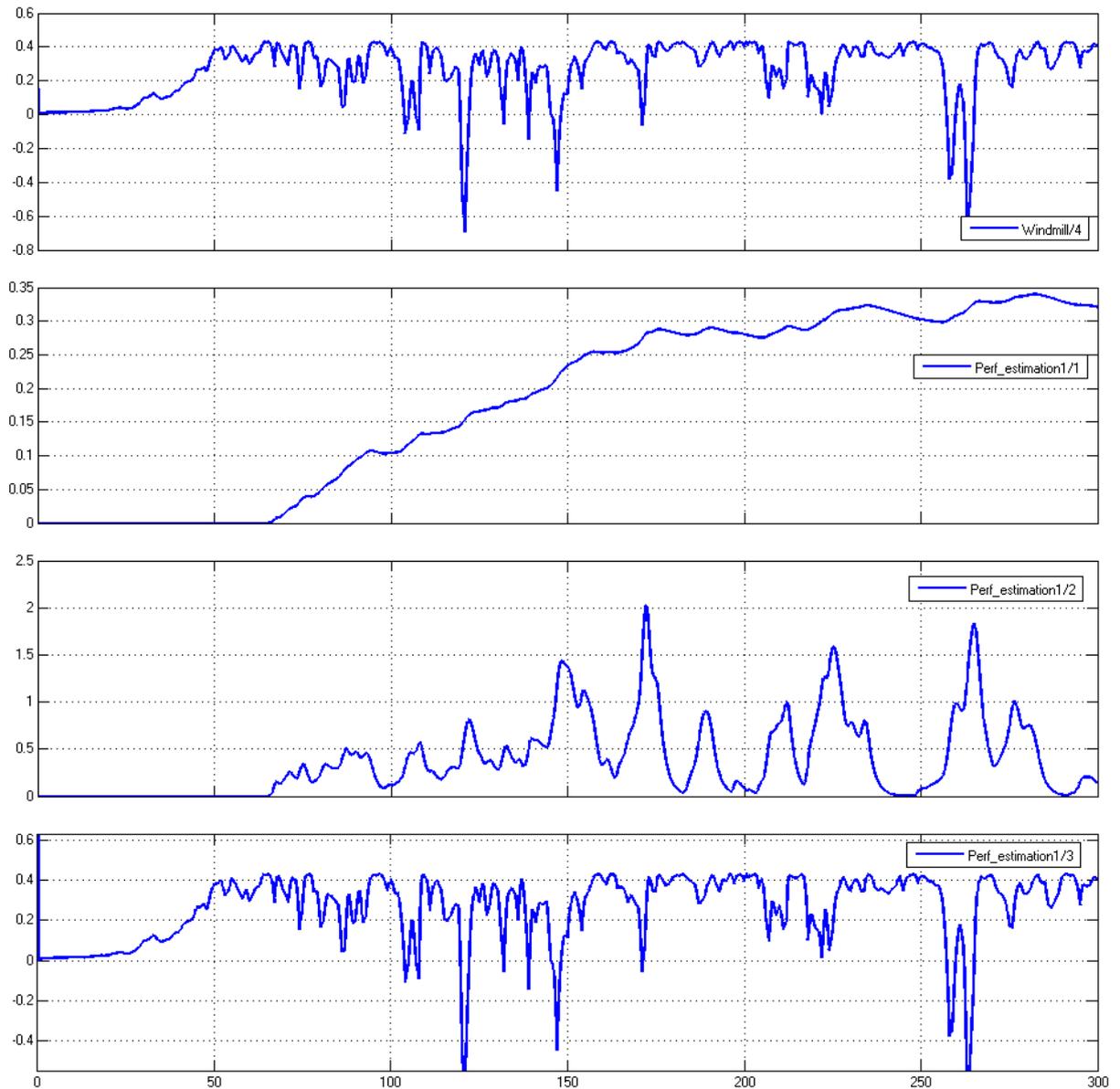


Рисунок 3.7 — Результаты вычислительного эксперимента по оценке качества определения КИЭВ ВЭУ

На графиках рисунка 3.7 изображены:

- Верхний график показывает значение КИЭВ, полученное из математической модели аналитическим путем.
- Второй сверху график показывает оценку КИЭВ, полученную с помощью интегрирования мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра.

– Третий сверху график показывает оценку КИЭВ, полученную с помощью осреднения мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра.

– Четвертый сверху график показывает оценку КИЭВ, полученную с помощью редуцированного наблюдателя аэродинамического момента и измеренных значений скорости ветра.

Анализируя графики видно, что все три способа определяют КИЭВ с разной степенью точности, для количественной оценки точности определения КИЭВ на рисунке 3.8 приводятся графики ошибки определения КИЭВ.

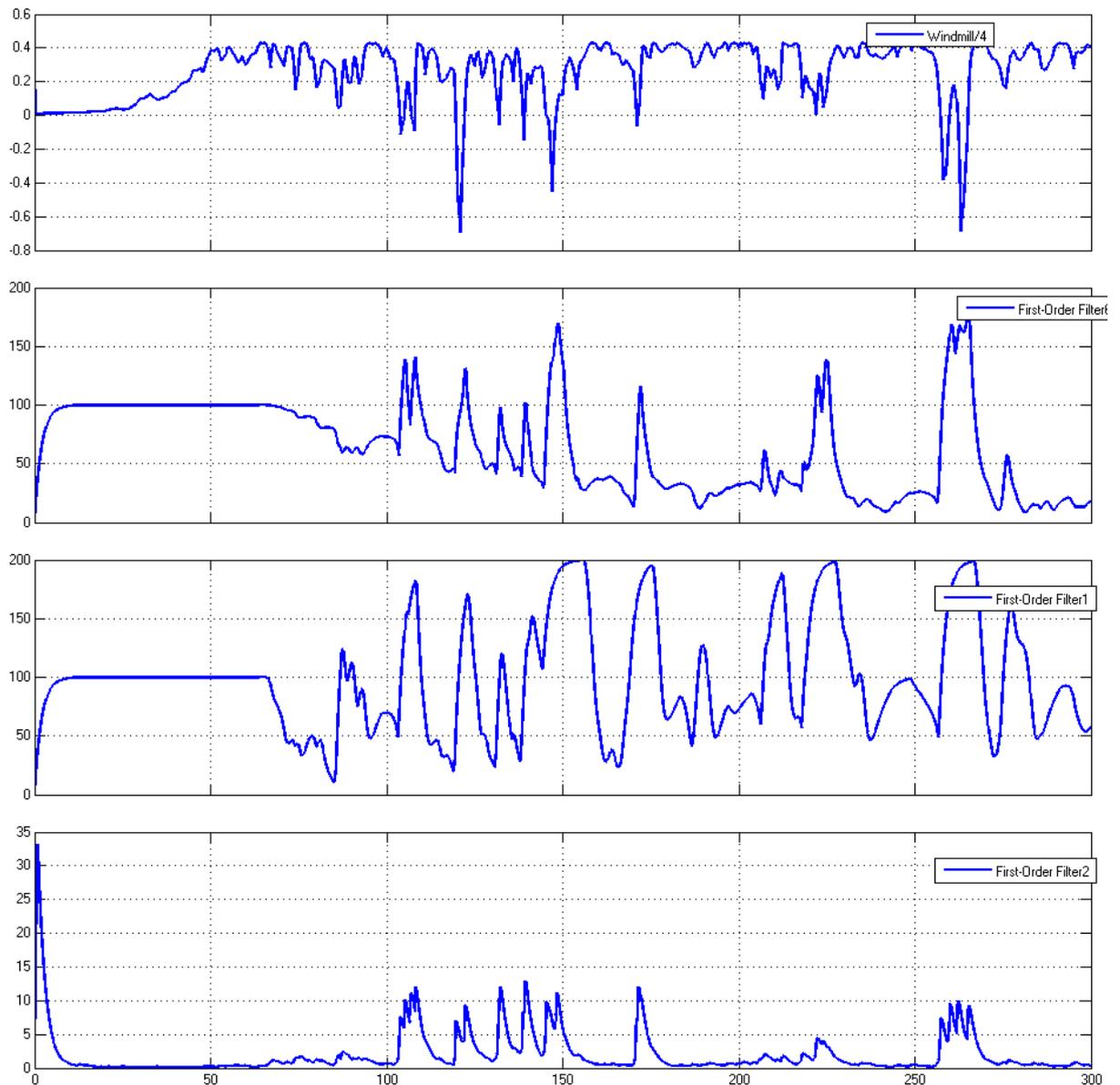


Рисунок 3.8 — Результаты вычислительного эксперимента по оценке качества определения КИЭВ ВЭУ

На графиках рисунка 3.8 изображены:

- Верхний график показывает значение КИЭВ, полученное из математической модели аналитическим путем.
- Второй сверху график показывает значение ошибки определения КИЭВ, полученного с помощью интегрирования мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра.

– Третий сверху график показывает значение ошибки определения КИЭВ, полученного с помощью осреднения мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра.

– Четвертый сверху график показывает значение ошибки определения КИЭВ, полученного с помощью редуцированного наблюдателя аэродинамического момента и измеренных значений скорости ветра.

Из графиков видно, что оценка КИЭВ с помощью интегрирования и осреднения мгновенных значений электрической мощности и скорости ветра приводит к недопустимой ошибке, величина которой превышает определяемое значение в несколько раз. Применение редуцированного наблюдателя аэродинамического момента позволяет определять КИЭВ с точностью до единиц процентов, при этом максимальная ошибка определения не превышает 15% и наблюдается лишь на кратковременных промежутках, что позволяет утверждать о допустимости применения редуцированного наблюдателя для определения КИЭВ ВЭУ.

### **3.2 Исследование различных способов регулирования**

Для определения наиболее эффективного способа управления мощностью ВЭУ было решено исследовать следующие способы управления мощностью ВЭУ [3]:

– ВЭУ, работающая при постоянной частоте вращения ветроколеса[47];

– ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения обмоток генератора[20];

– ВЭУ, работающая при нескольких фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения передаточного отношения мультипликатора[23];

– ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения и использующая электрический преобразователь с регулятором мощности[8; 138].

Способ управления ветроэнергетической установкой при переменной частоте вращения с изменением установочного угла лопастей вет-

роколеса или изменением геометрических размеров ветроколеса было решено исключить из рассмотрения ввиду очевидной сложности практической реализации конструкции, которая была недоступна в рамках проводимых исследований [73].

Блок-схема универсальной модели для анализа различных ветроэнергетических установок, включающая в себя четыре различные ВЭУ, приведена на рисунке 3.9.

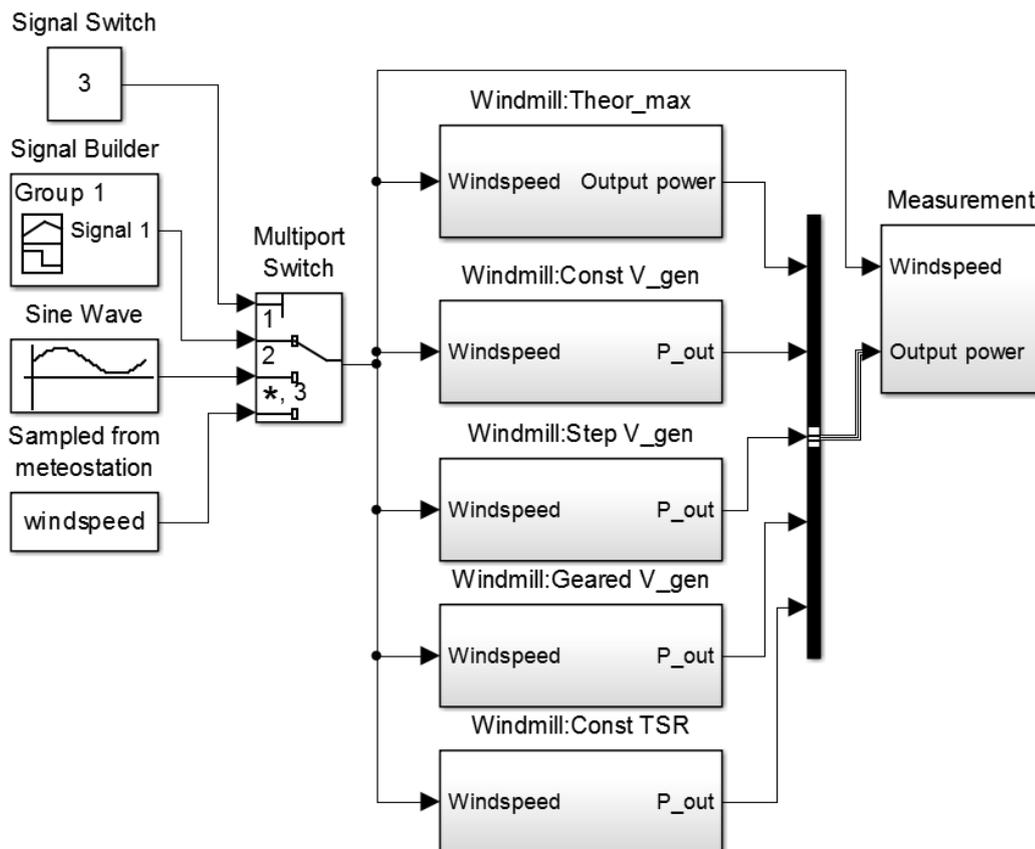


Рисунок 3.9 — Блок-схема универсальной модели для анализа различных ветроэнергетических установок

Каждая модель ВЭУ в процессе моделирования была подвергнута следующим воздействиям скорости ветра:

1. Нарастающе-затухающая скорость ветра, параметры источника воздействия приведены на рисунке 3.10.

2. Гармонически изменяющаяся скорость ветра, параметры источника воздействия приведены на рисунке 3.11.

3. Реальная скорость ветра, заданная с помощью файла данных, содержащего выборки скоростей ветра, полученные с помощью анемометра при проведении наблюдений.

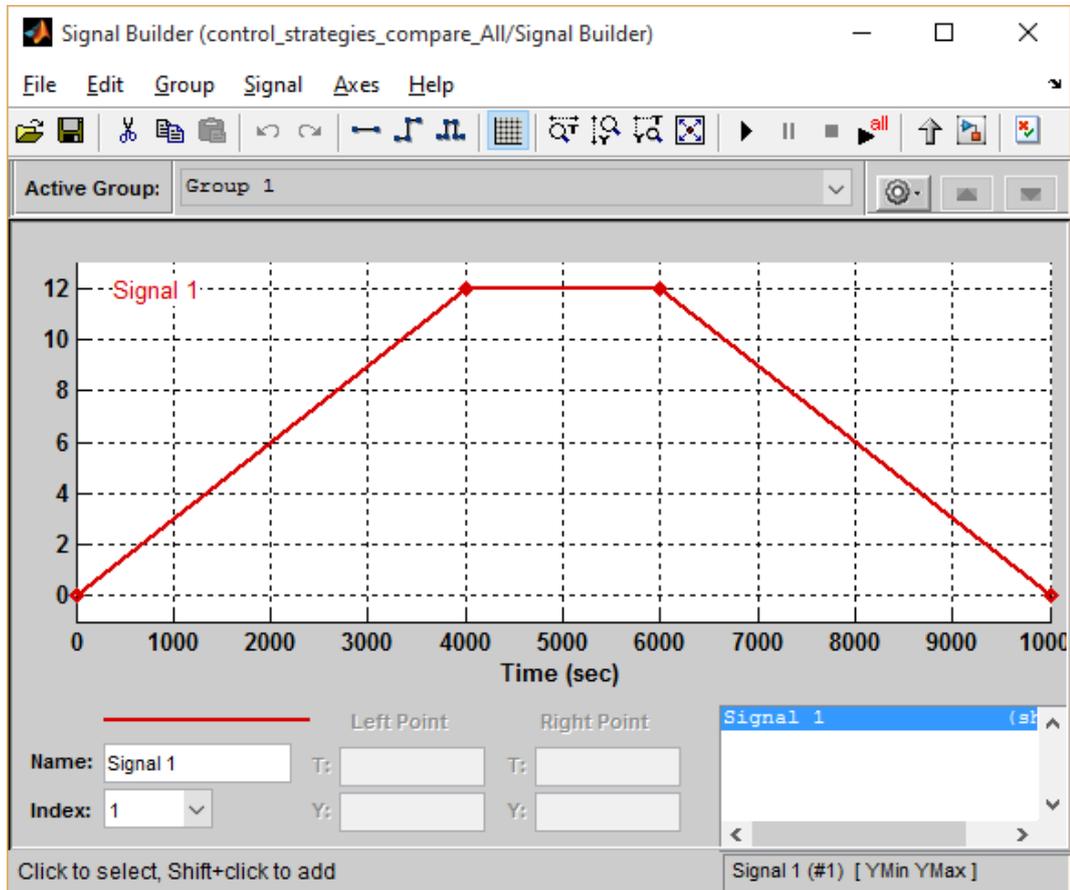


Рисунок 3.10 — Параметры блока модели нарастающе-затухающей скорости ветра

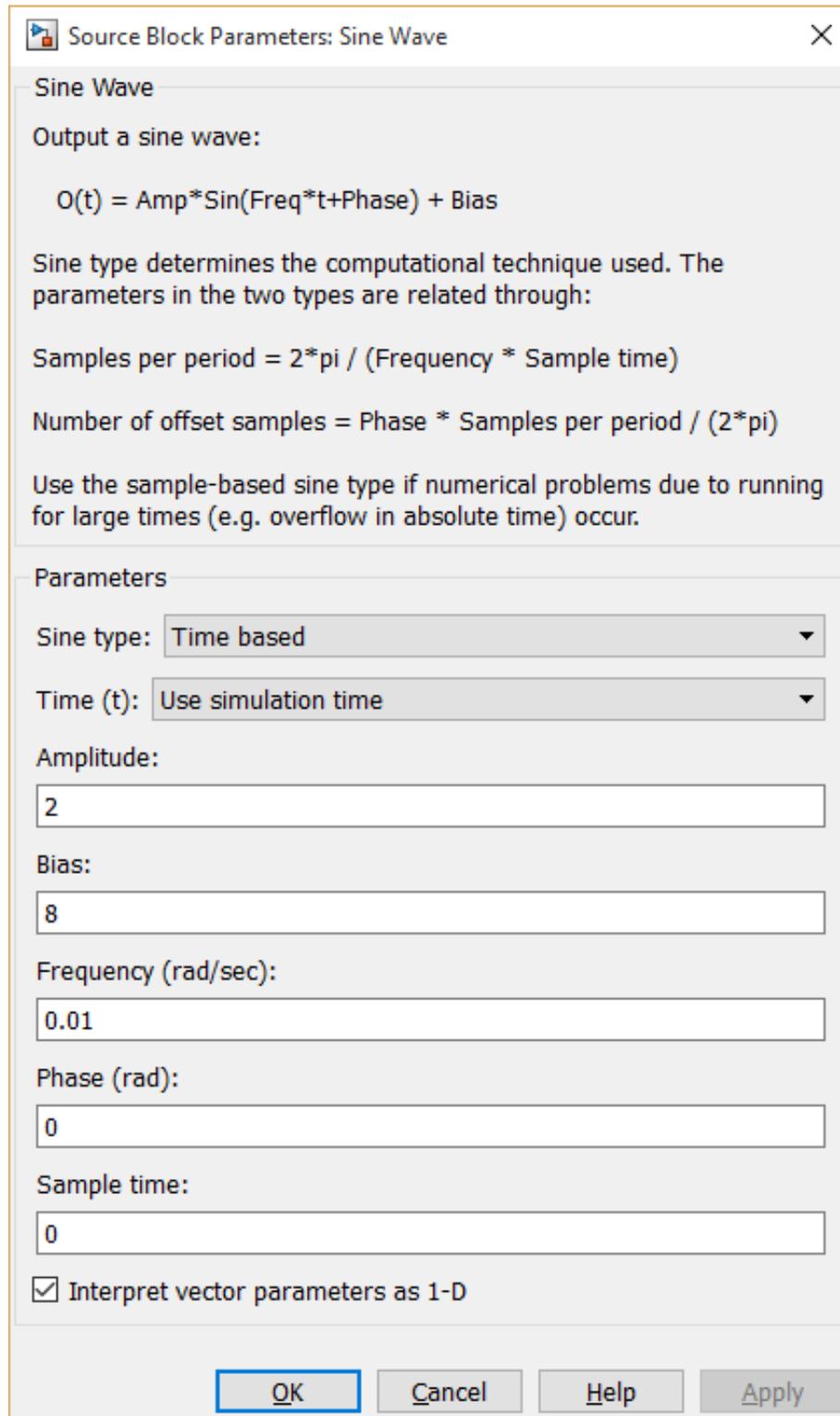


Рисунок 3.11 — Параметры блока модели гармонически изменяющейся скорости ветра

Для измерения эффективности работы ветроэнергетических установок в заданных условиях был разработан блок «Measurement», основанный на наблюдателе пониженного порядка по выражениям

(refestimator). Модуль содержит пять одинаковых модулей измерения характеристик ветроэнергетических установок. Также имеется модуль расчета генерируемой мощности идеальной ветроэнергетической установки по (3.5) и (2.3) с теми же аэродинамическими параметрами ветроколеса, как и исследуемых моделей.

### **3.2.1 Работа при постоянной частоте вращения**

Способ управления мощностью ветроэнергетической установки при постоянной частоте вращения ветроколеса представляется наиболее интересным с точки зрения простоты реализации конструкции ВЭУ. Так же можно отметить, что такая конструкция должна обеспечить наибольшую надежность при минимальной стоимости изделия.

Для исследования особенностей работы такой ветроэнергетической установки была использована универсальная компьютерная модель ВЭУ, представленная на рисунке 3.12. Модель состоит из следующих модулей:

- «Windmill» – модуль, имитирующий работу ветродвигателя по уравнениям (2.1) и (2.2).
- «Alternator» – модуль, имитирующий работу электрического генератора ВЭУ, описание которого приведено во второй главе.
- «Charge Controller» – модуль, имитирующий работу контроллера заряда аккумуляторной батареи и системы управления, обеспечивающей необходимые режимы работы ВЭУ, блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

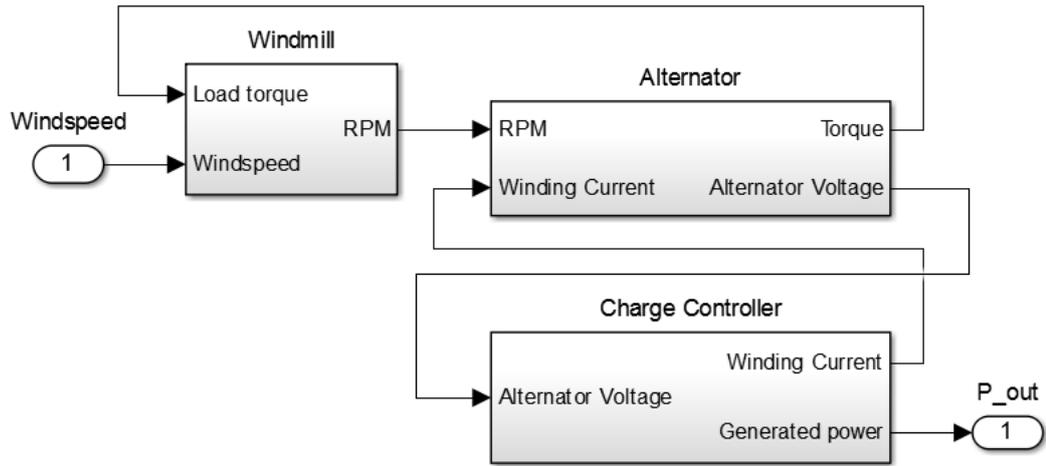


Рисунок 3.12 — Модель ветроэнергетической установки, работающей при постоянной частоте вращения вала ветродвигателя

Модель ветродвигателя, блок-схема которой представлена на рисунке 3.13, содержит модуль расчета крутящего момента в зависимости от скорости ветра «Windturbine», блок-схема которого изображена на рисунке 3.14.

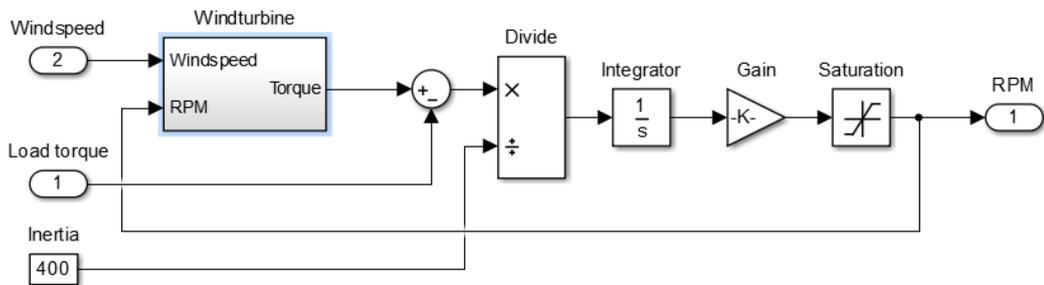


Рисунок 3.13 — Блок-схема модели ветродвигателя ВЭУ

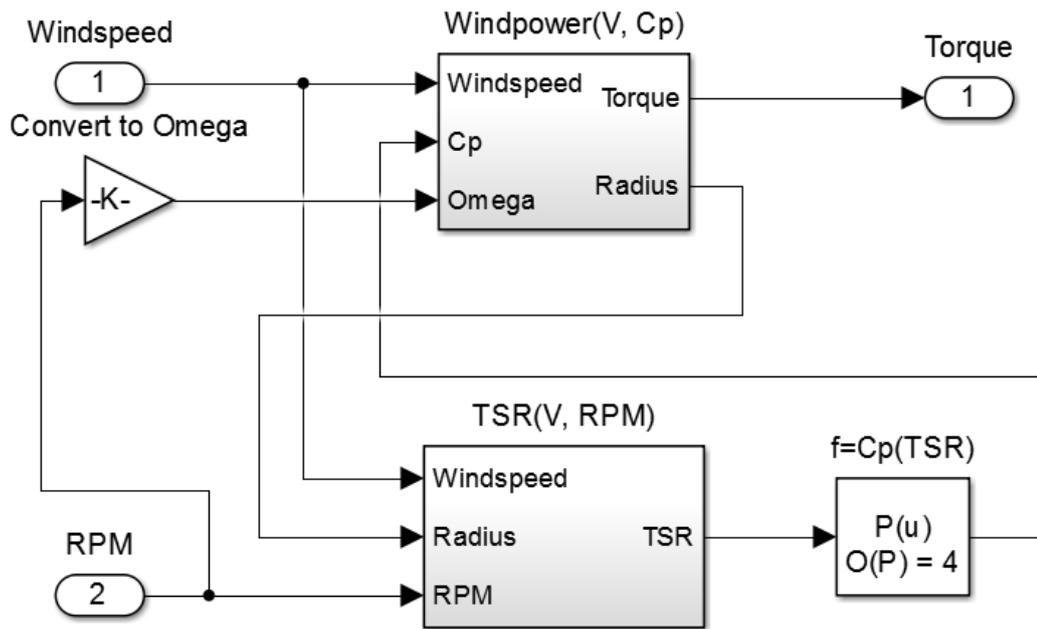


Рисунок 3.14 — Блок-схема модели ветроколеса, создающего крутящий момент в ветродвигателе ВЭУ

Для корректного расчета крутящего момента требуется текущее значение быстроходности, которое рассчитывается в модуле «TSR(V, RPM)», представленном на рисунке 3.15. Крутящий момент при этом рассчитывается в модуле «Windpower (V, Cp)», представленном на рисунке 3.16

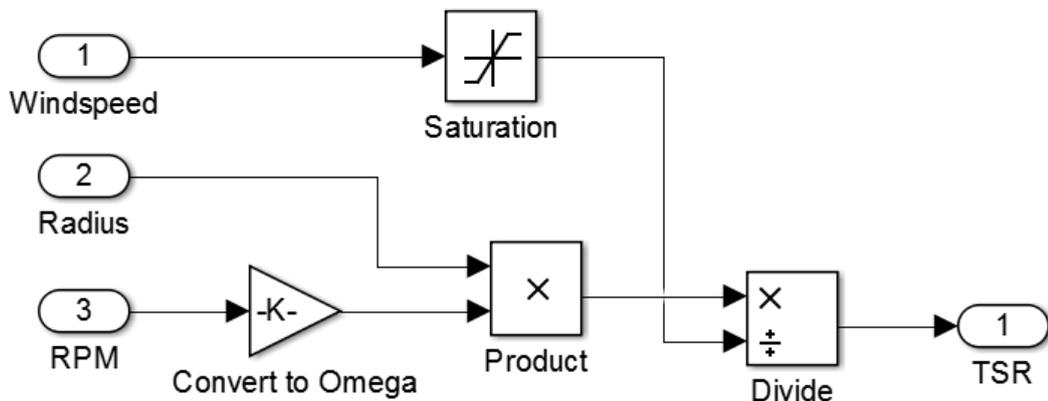


Рисунок 3.15 — Блок-схема модуля вычисления текущей быстроходности ветроколеса ВЭУ

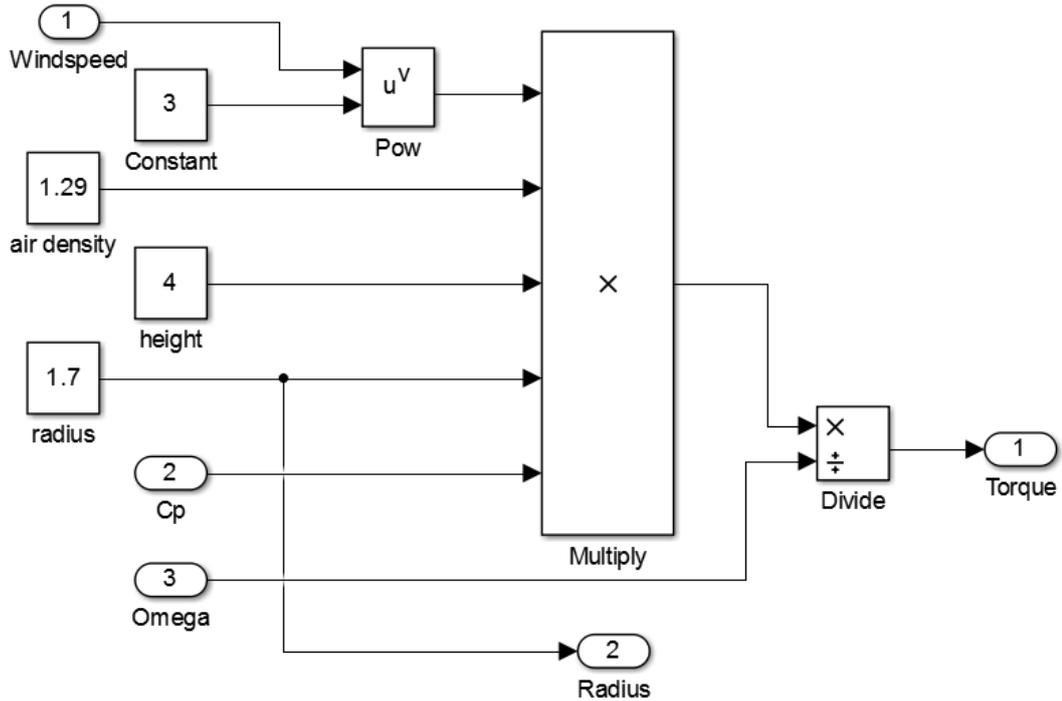


Рисунок 3.16 — Блок-схема модуля вычисления текущего крутящего момента ветродвигателя ВЭУ

Модуль электрического генератора, блок-схема которого представлена на рисунке 3.17, вычисляет текущее значение ЭДС в обмотках генератора, величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении, а так же тормозной момент, возникающий в генераторе при работе на заданную нагрузку. Выходным параметром модуля является напряжение на клеммах и тормозной момент на валу генератора.

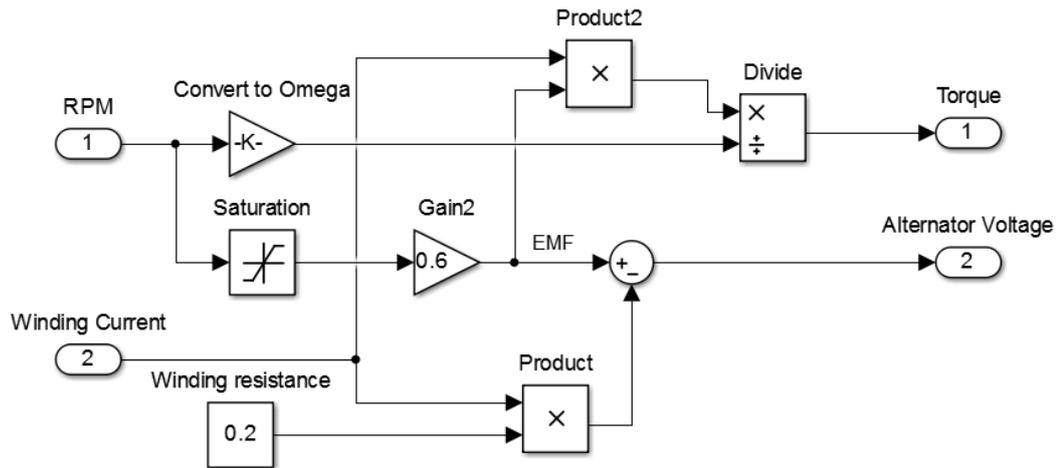


Рисунок 3.17 — Блок-схема модели генератора ВЭУ

Модуль контроллера заряда ветроэнергетической установки имитирует работу диодного выпрямителя электрического генератора переменного тока, при подключении которого к аккумуляторной батарее происходит регулирование зарядного тока АКБ путем изменения входного напряжения выпрямителя. Блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

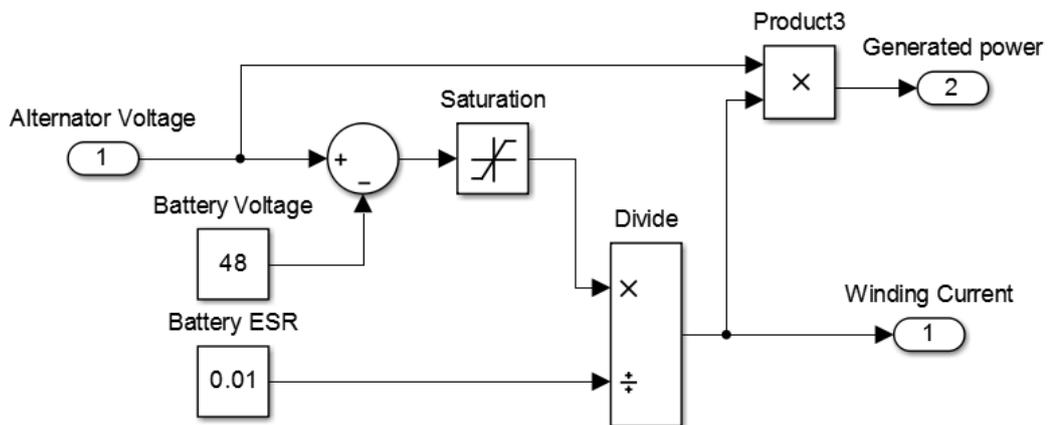


Рисунок 3.18 — Блок-схема модели контроллера заряда ВЭУ

В процессе исследования модель была испытана воздействием нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 3.19.

Верхний график на рисунке показывает зависимость скорости ветра во времени.

Второй сверху график отображает график максимальной-возможной и генерируемой мощности в зависимости от времени моделирования, где синим цветом изображена максимально-возможная электрическая мощность ВЭУ, а красным — текущее расчетное значение.

Третий сверху график отображает интегральное значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Нижний график отображает усредненное с помощью фильтра нижних частот значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Из графиков видно, что до определенной скорости ветра электрическая энергия в ветроэнергетической установке не генерируется вообще. Затем, при увеличении скорости ветра, генерируемая мощность растет вслед за скоростью ветра, достигая своего максимума при максимальной скорости ветра. Максимальная эффективность работы ветроэнергетической установки наблюдается в достаточно узком диапазоне скоростей ветра на скоростях около 8 м/с, при других скоростях ветра имеется потенциал для повышения производительности.

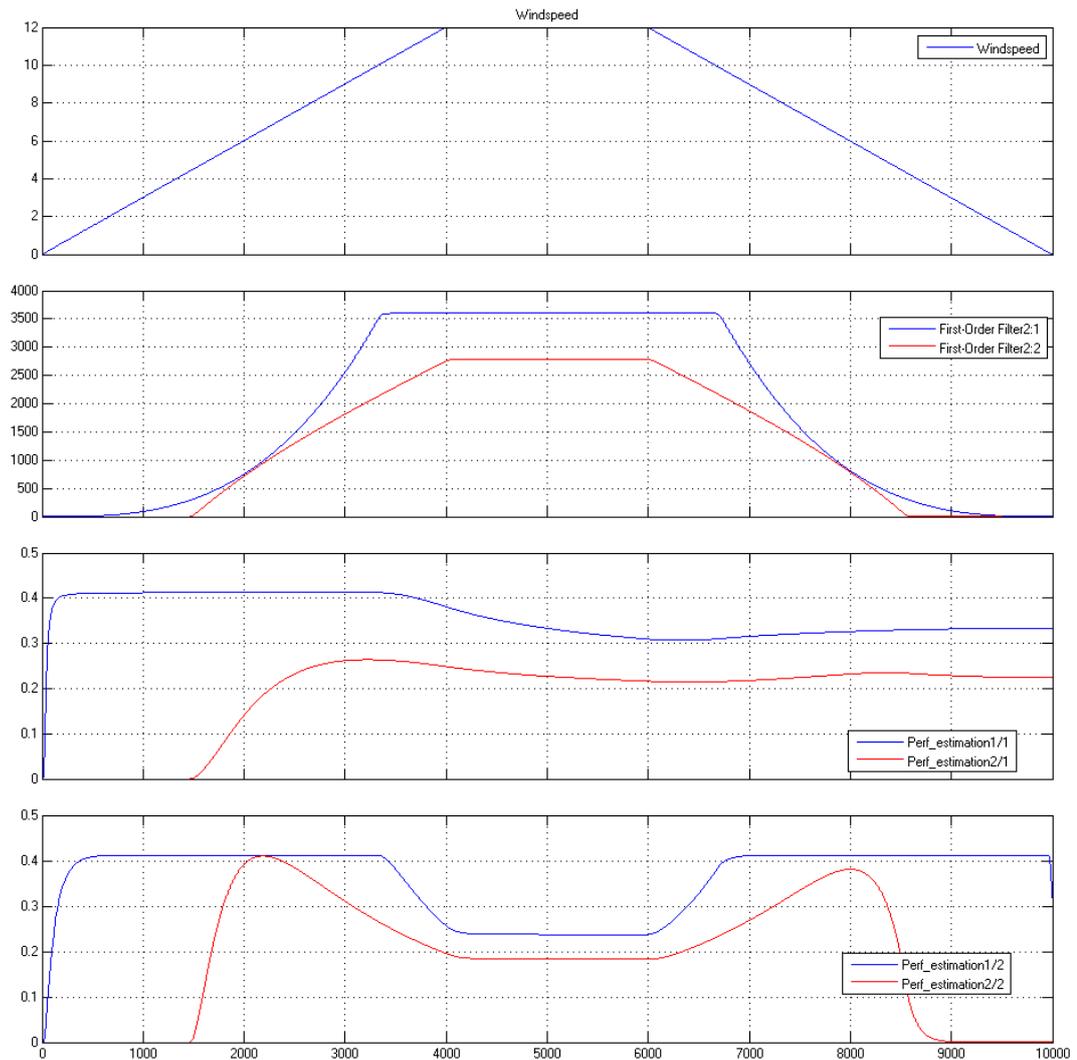


Рисунок 3.19 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра

На рисунке 3.20 приведены результаты испытания модели воздействием гармонически изменяющейся скорости ветра. Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно что интегральное значение КЭИВ составляет 0,32, что меньше максимально-возможного 0,42. При этом из графика усредненного значения КИЭВ видно, что максимальная эффективность достигается при скорости ветра 8м/с, снижаясь до величины 0,27 при отклонении от этой величины.

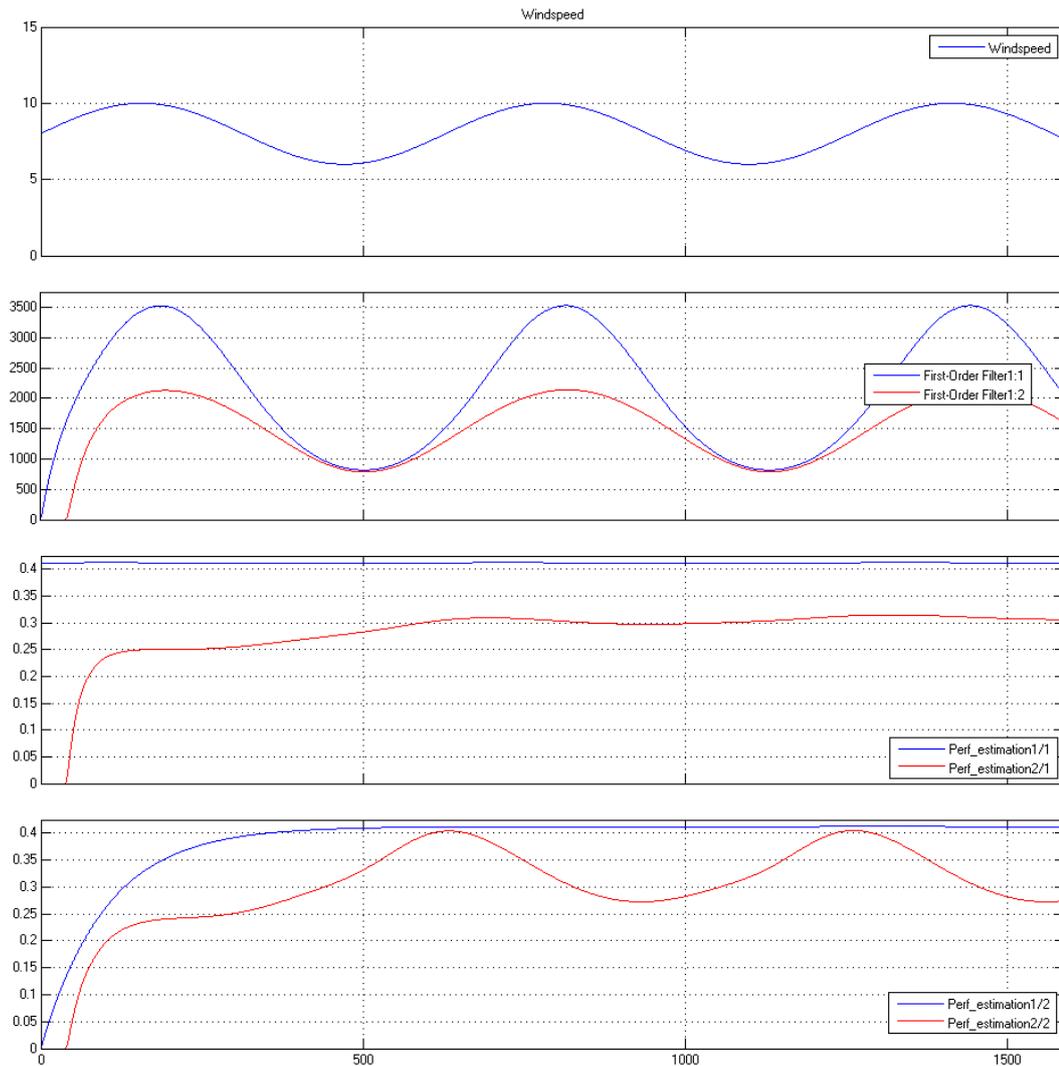


Рисунок 3.20 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра

На рисунке 3.21 приведены результаты испытания модели воздействием реальной скорости ветра. Скорость ветра при этом непрерывно изменяется вокруг среднего значения 7 м/с. Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно что интегральное значение КЭИВ составляет 0,35, что меньше максимально-возможного 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что эффективность ВЭУ непрерывно меняется вслед за изменением скорости ветра, очень редко достигая максимально-возможного значения.

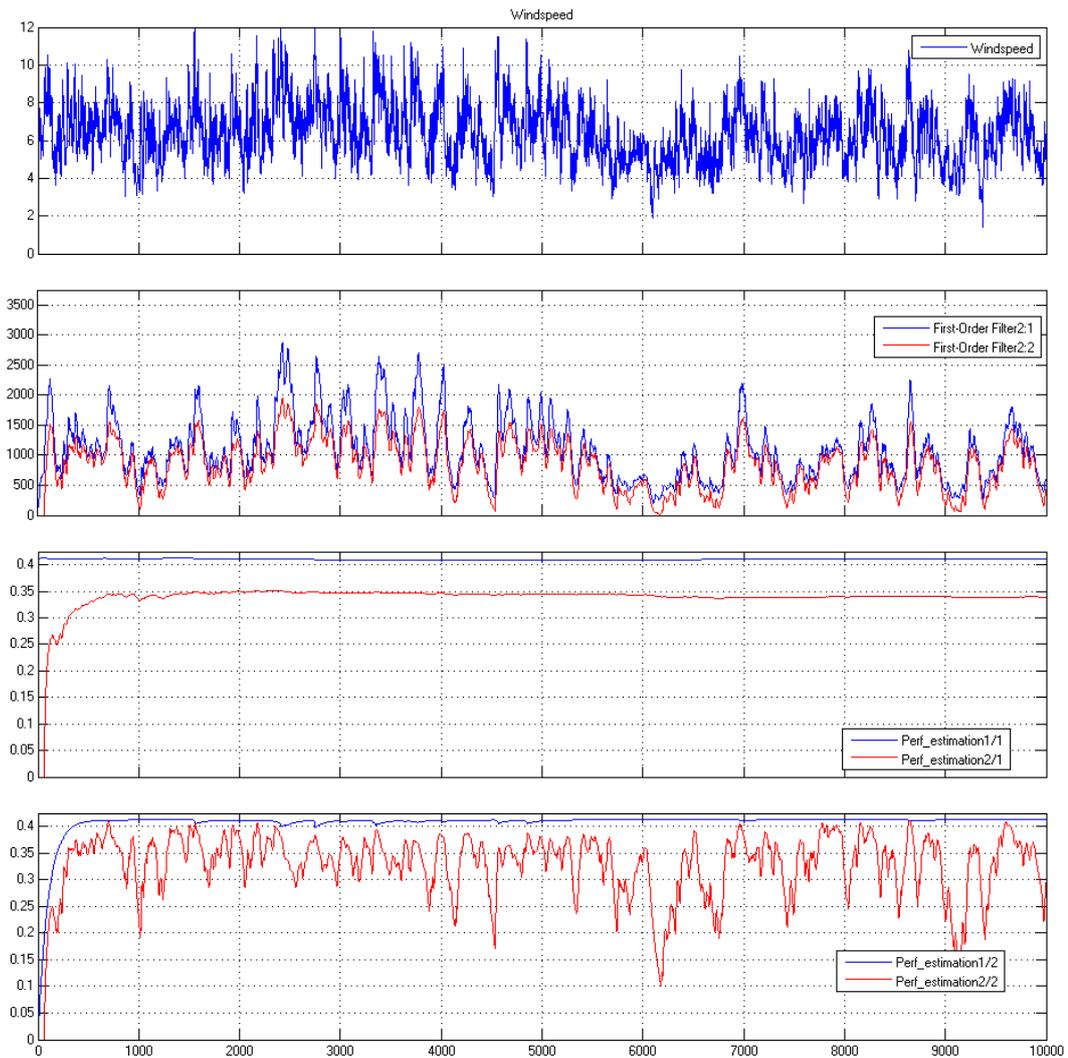


Рисунок 3.21 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра

### 3.2.2 Работа при нескольких частотах вращения переключением обмоток генератора

Способ управления мощностью ветроэнергетической установки при нескольких частотах вращения ветроколеса путем переключения обмоток генератора представляет интерес ввиду достаточно простой реализации конструкции ВЭУ.

Для исследования особенностей работы такой ветроэнергетической установки была использована компьютерная модель ВЭУ, представленная на рисунке 3.22. Модель состоит из следующих модулей:

- «Windmill» – модуль, имитирующий работу ветродвигателя по уравнениям (2.1) и (2.2).
- «Alternator» – модуль, имитирующий работу электрического генератора ВЭУ, описание которого приведено во второй главе.
- «Charge Controller» – модуль, имитирующий работу контроллера заряда аккумуляторной батареи и системы управления, обеспечивающей необходимые режимы работы ВЭУ, блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

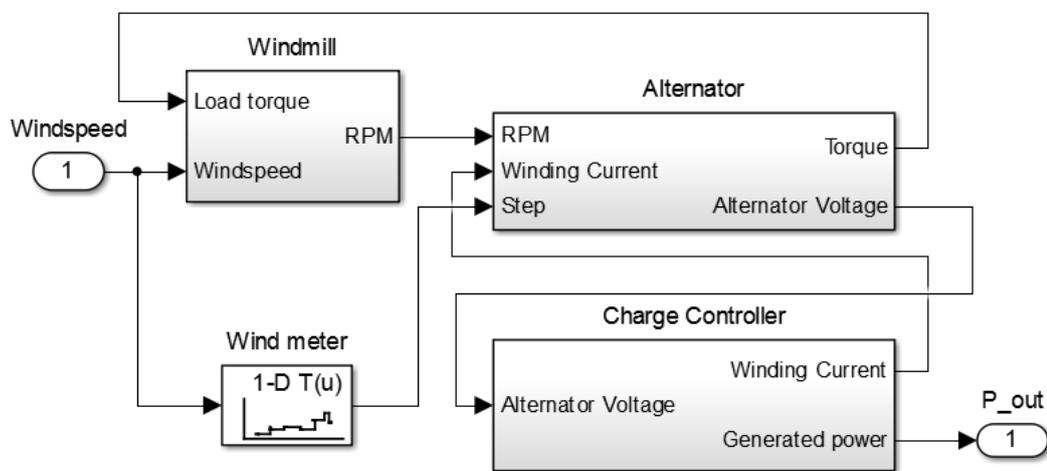


Рисунок 3.22 — Модель ветроэнергетической установки, работающей с переключением обмоток электрического генератора

Модуль электрического генератора, блок-схема которого представлена на рисунке 3.23, вычисляет текущее значение ЭДС в обмотках генератора, величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении, а так же тормозной момент, возникающий в генераторе при работе на заданную нагрузку. Для переключения обмоток генератора используется входной сигнал «Step» от блока «Windmeter», в зависимости от которого в модели применяются те или иные величины параметров обмоток. Выходными параметрами модуля является напряжение на клеммах и тормозной момент на валу генератора.

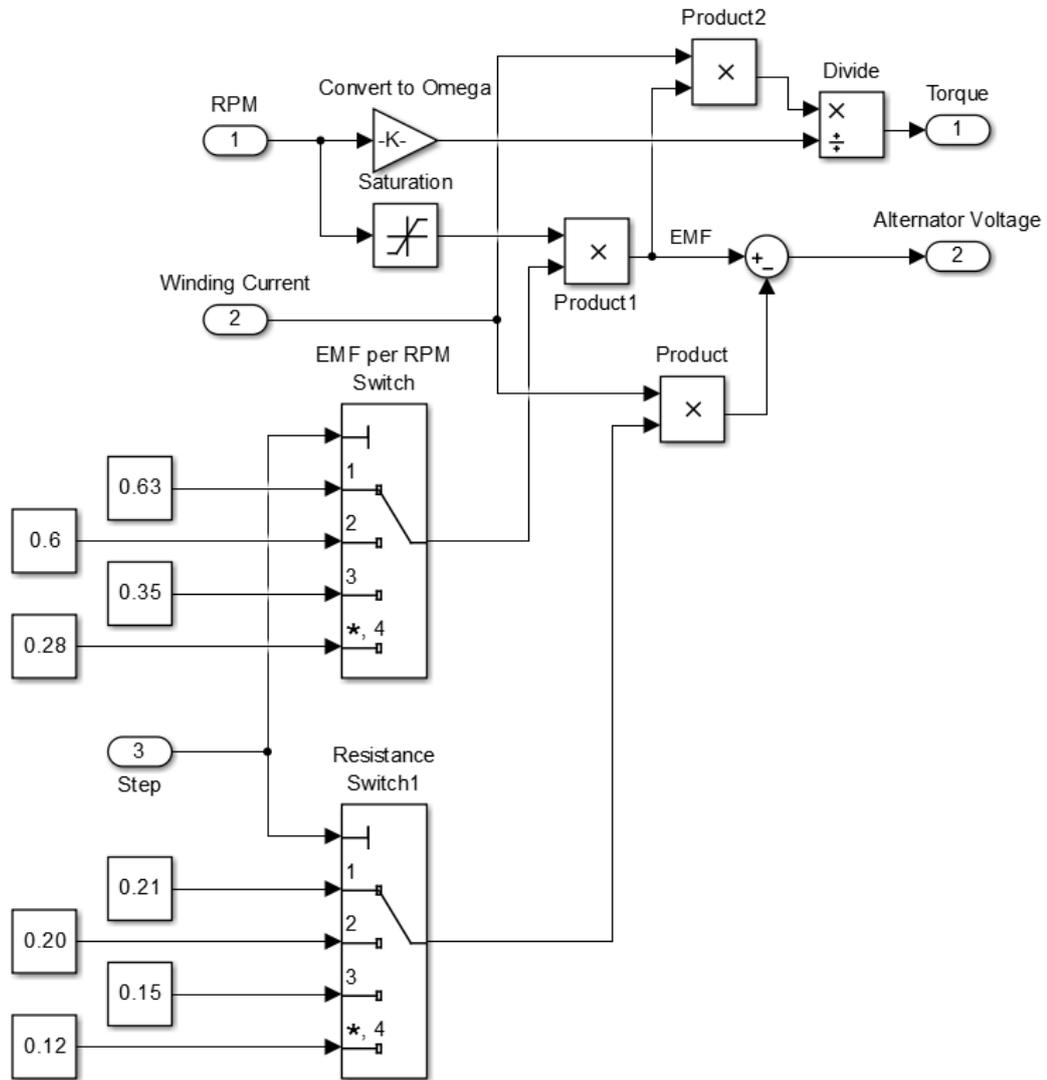


Рисунок 3.23 — Блок-схема модели генератора ВЭУ

Модуль контроллера заряда ветроэнергетической установки имитирует работу диодного выпрямителя электрического генератора переменного тока, при подключении которого к аккумуляторной батарее происходит регулирование зарядного тока АКБ путем изменения входного напряжения выпрямителя. Блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

В процессе исследования модель была испытана воздействием нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 3.24.

Верхний график на рисунке показывает зависимость скорости ветра во времени.

Второй сверху график отображает график максимальной-возможной и генерируемой мощности в зависимости от времени моде-

лирования, где синим цветом изображена максимально-возможная электрическая мощность ВЭУ, а красным — текущее расчетное значение.

Третий сверху график отображает интегральное значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Нижний график отображает усредненное с помощью фильтра нижних частот значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Из графиков видно, что до определенной скорости ветра электрическая энергия в ветроэнергетической установке не генерируется вообще. Затем, при увеличении скорости ветра, генерируемая мощность растет вслед за скоростью ветра ступенчато, согласно заданному алгоритму переключения обмоток, достигая своего максимума при скорости ветра 11 м/с. Максимальная эффективность работы ветроэнергетической установки наблюдается в достаточно узком диапазоне скоростей ветра на скоростях около 6 м/с, при других скоростях ветра имеется потенциал для повышения производительности.

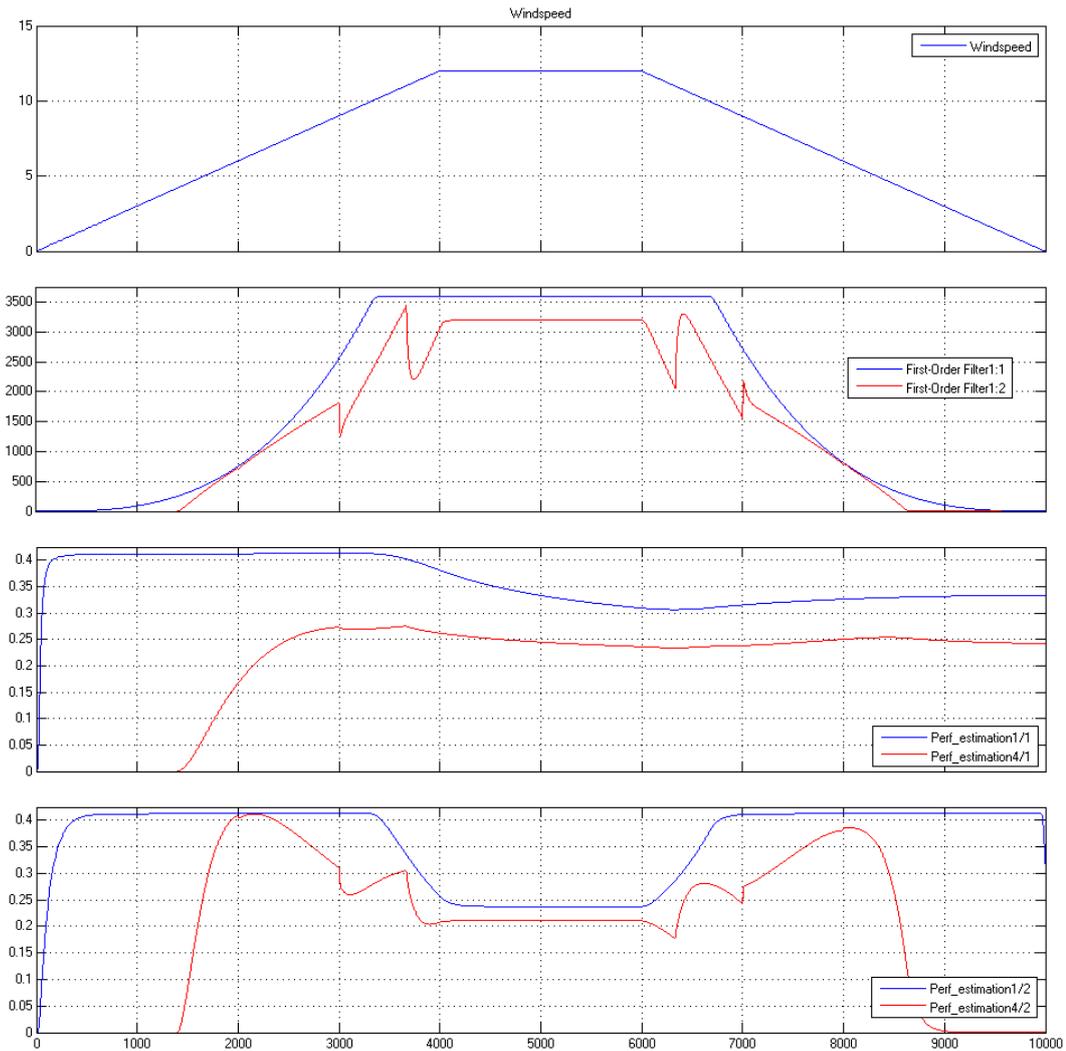


Рисунок 3.24 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра

На рисунке 3.25 приведены результаты испытания модели воздействием гармонически изменяющейся скорости ветра. Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно что интегральное значение КЭИВ составляет 0,32, что меньше максимально-возможного 0,42. При этом из графика усредненного значения КИЭВ видно, что максимальная эффективность достигается при скорости ветра 9м/с, снижаясь до величины 0,20 при отклонении от этой величины.

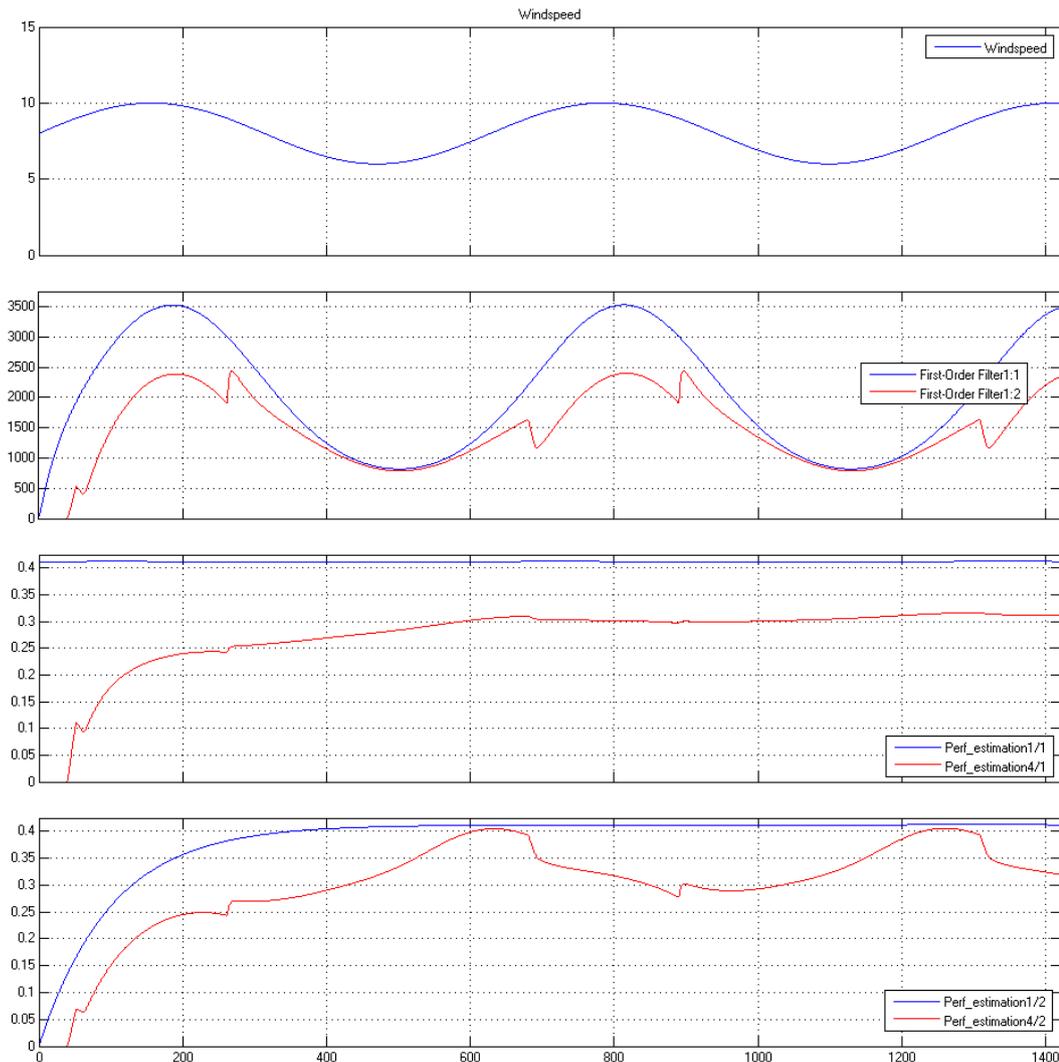


Рисунок 3.25 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра

На рисунке 3.26 приведены результаты испытания модели воздействием реальной скорости ветра. Скорость ветра при этом непрерывно изменяется вокруг среднего значения 7 м/с. Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно что интегральное значение КЭИВ составляет 0,35, что меньше максимально-возможного 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что эффективность ВЭУ непрерывно меняется вслед за изменением скорости ветра, очень редко достигая максимально-возможного значения.

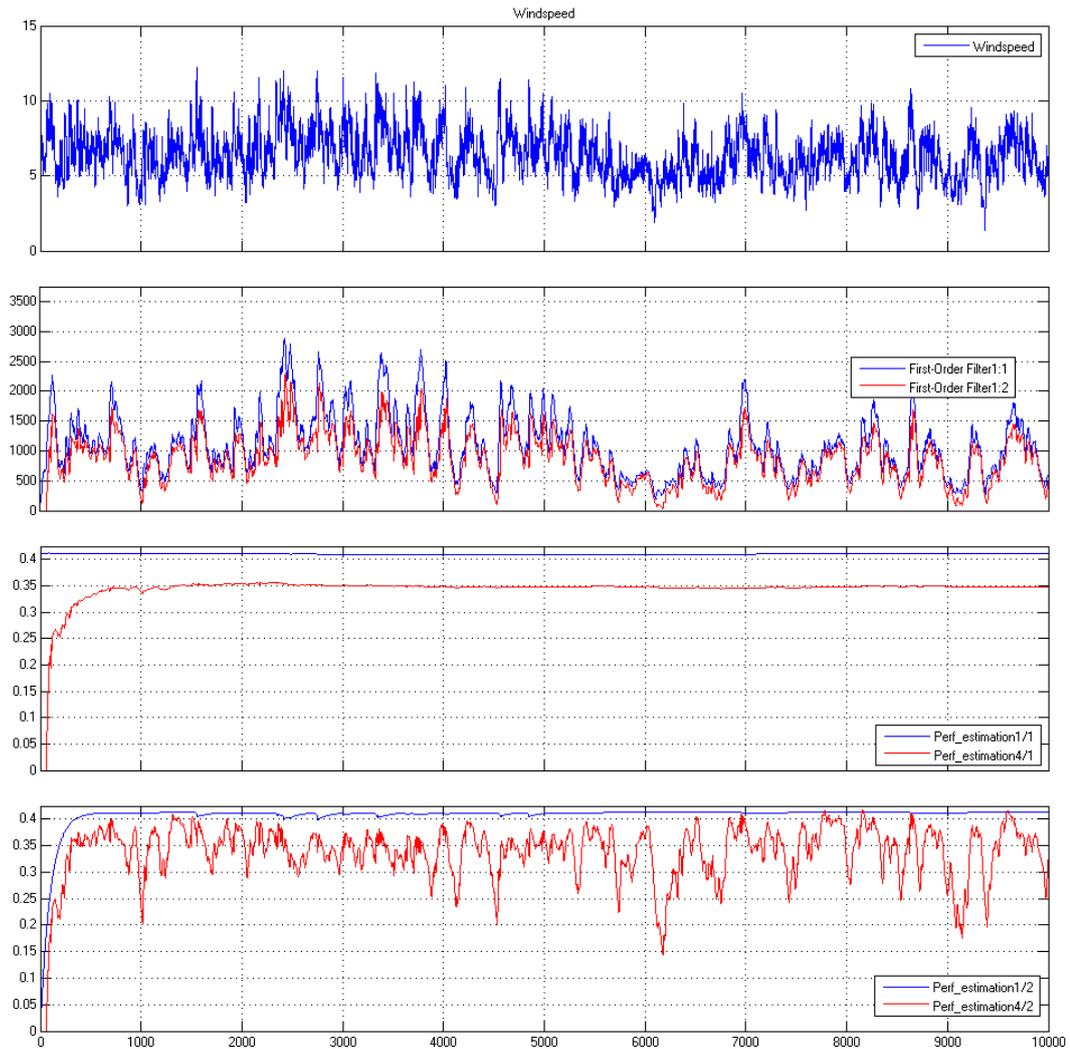


Рисунок 3.26 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра

Таким образом, можно утверждать, что усредненная производительность ВЭУ с переключением обмоток генератора аналогично производительности ВЭУ с постоянной частотой вращения, и выигрыш исследуемой конструкции в одних режимах компенсируется проигрышем в других режимах.

### 3.2.3 Работа при нескольких частотах вращения переключением передаточного отношения мультипликатора

Способ управления мощностью ветроэнергетической установки при нескольких частотах вращения ветроколеса путем переключения пере-

даточного отношения мультипликатора интересен тем, что потенциально должен обеспечить производительность выше, чем при работе ВЭУ с постоянной частотой вращения вала ветроколеса.

Для исследования особенностей работы такой ветроэнергетической установки была использована универсальная компьютерная модель ВЭУ, представленная на рисунке 3.27. Модель состоит из следующих модулей:

- «Windmill» – модуль, имитирующий работу ветродвигателя по уравнениям (2.1) и (2.2).

- «Gearbox» – модуль, имитирующий работу коробки передач, блок-схема модуля приведена на рисунке 3.28.

- «Alternator» – модуль, имитирующий работу электрического генератора ВЭУ, описание которого приведено во второй главе.

- «Charge Controller» – модуль, имитирующий работу контроллера заряда аккумуляторной батареи и системы управления, обеспечивающей необходимые режимы работы ВЭУ, блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

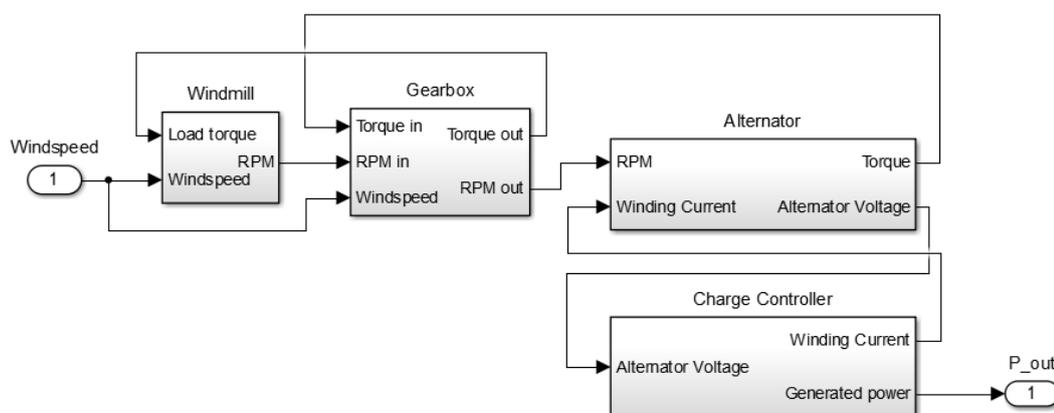


Рисунок 3.27 — Модель ветроэнергетической установки, работающей при переключении частоты вращения вала ветроколеса с помощью коробки передач

Модуль, имитирующий работу коробки передач, измеряет текущую скорость ветра, и, в зависимости от измеренного значения, выдает сигнал управления для включения необходимой передачи. При этом частота выходного вала коробки передач делится, а крутящий момент умножа-

ется на заданный коэффициент передачи. Блок-схема модуля приведена на рисунке 3.28.

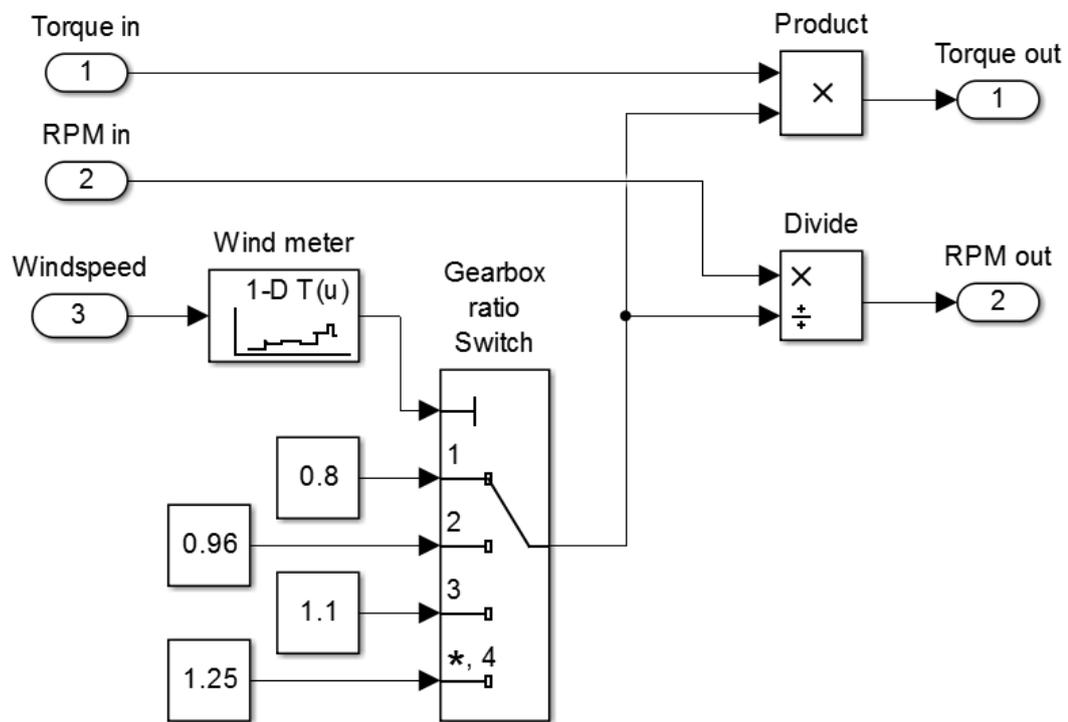


Рисунок 3.28 — Блок-схема модуля коробки передач

Модуль электрического генератора, блок-схема которого представлена на рисунке 3.17, вычисляет текущее значение ЭДС в обмотках генератора, величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении, а так же тормозной момент, возникающий в генераторе при работе на заданную нагрузку. Выходным параметром модуля является напряжение на клеммах и тормозной момент на валу генератора.

Модуль контроллера заряда ветроэнергетической установки имитирует работу диодного выпрямителя электрического генератора переменного тока, при подключении которого к аккумуляторной батарее происходит регулирование зарядного тока АКБ путем изменения входного напряжения выпрямителя. Блок-схема модуля приведена на рисунке 3.18.

В процессе исследования модель была испытана воздействием нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 3.29.

Верхний график на рисунке показывает зависимость скорости ветра во времени.

Второй сверху график отображает график максимальной-возможной и генерируемой мощности в зависимости от времени моделирования, где синим цветом изображена максимально-возможная электрическая мощность ВЭУ, а красным — текущее расчетное значение.

Третий сверху график отображает интегральное значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Нижний график отображает усредненное с помощью фильтра нижних частот значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

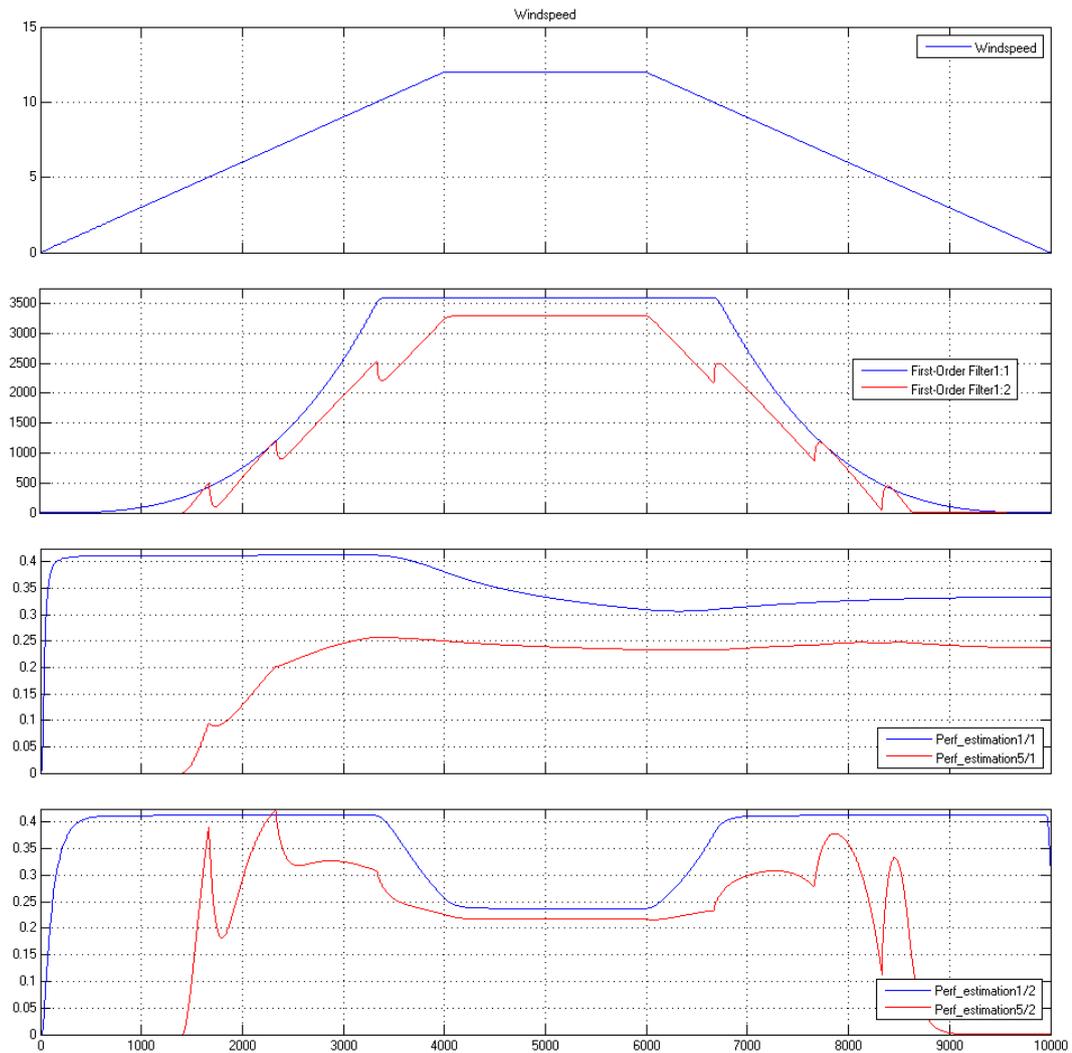


Рисунок 3.29 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра

Из графиков видно, что аналогично предыдущим вариантам, до определенной скорости ветра электрическая энергия в ветроэнергетической установке не генерируется вообще. Затем, при увеличении скорости ветра, генерируемая мощность растет вслед за скоростью ветра, достигая своего максимума при максимальной скорости ветра. На графике виден ступенчатый характер увеличения генерируемой электрической мощности, что свидетельствует о работоспособности регулирования генерируемой мощности с помощью коробки передач. Максимальная эффективность работы ветроэнергетической установки наблюдается в достаточно узком диапазоне скоростей ветра на скоростях 5 и 8 м/с, при других скоростях ветра имеется потенциал для повышения производительности.

На рисунке 3.30 приведены результаты испытания модели воздействием гармонически изменяющейся скорости ветра. Из графиков видно, что модель устойчиво реагирует на изменение скорости ветра, при этом интегральное значение КЭИВ составляет 0,36, что меньше максимально-возможного 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что максимальная эффективность достигается при скорости ветра 5м/с, снижаясь до величины 0,26 при отклонении от этой величины.

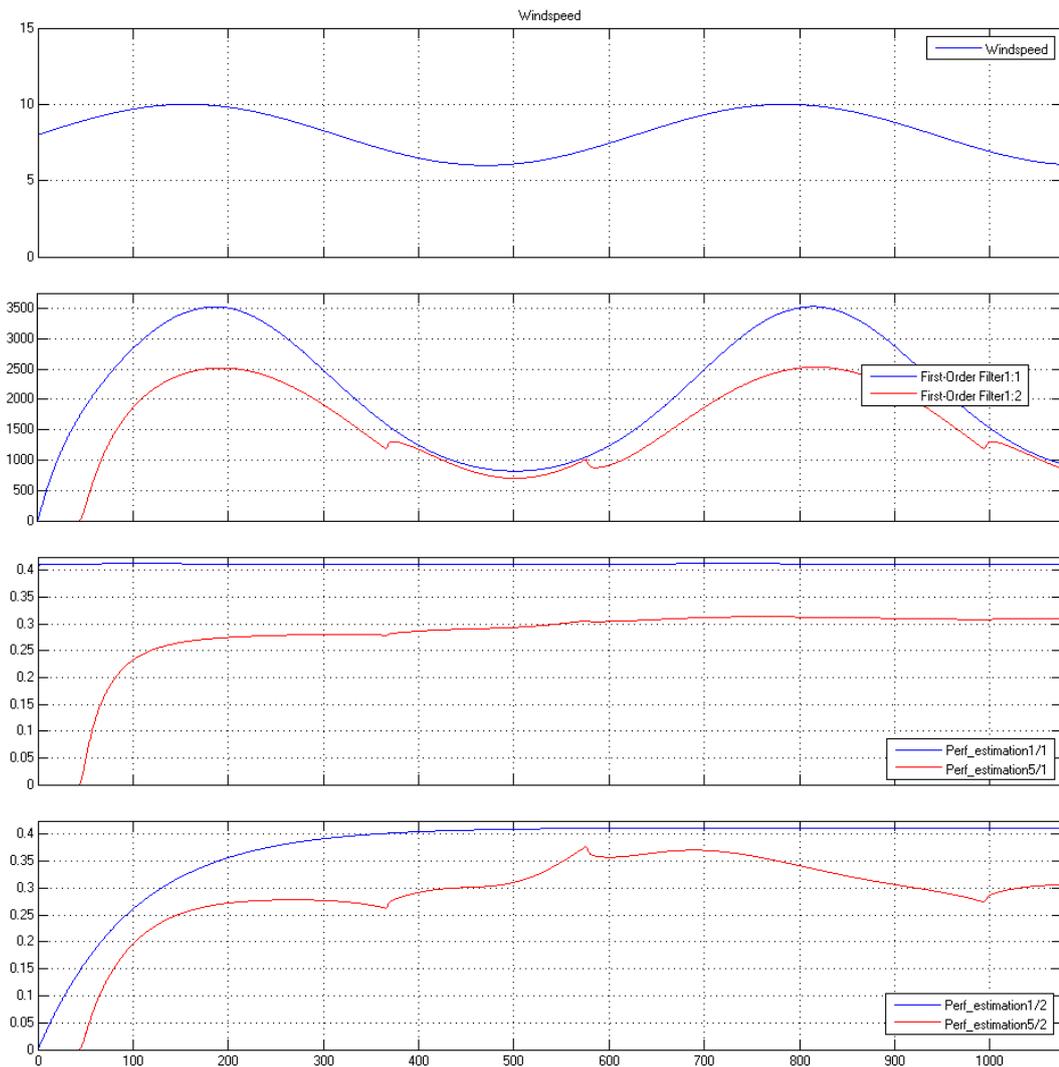


Рисунок 3.30 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра

На рисунке 3.31 приведены результаты испытания модели воздействием реальной скорости ветра. Скорость ветра при этом непрерывно изменяется вокруг среднего значения 7м/с. Из графиков видно,

что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно, что интегральное значение КЭИВ составляет 0,34, что меньше максимально-возможного 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что эффективность ВЭУ непрерывно меняется вслед за изменением скорости ветра, не достигая максимально-возможного значения.

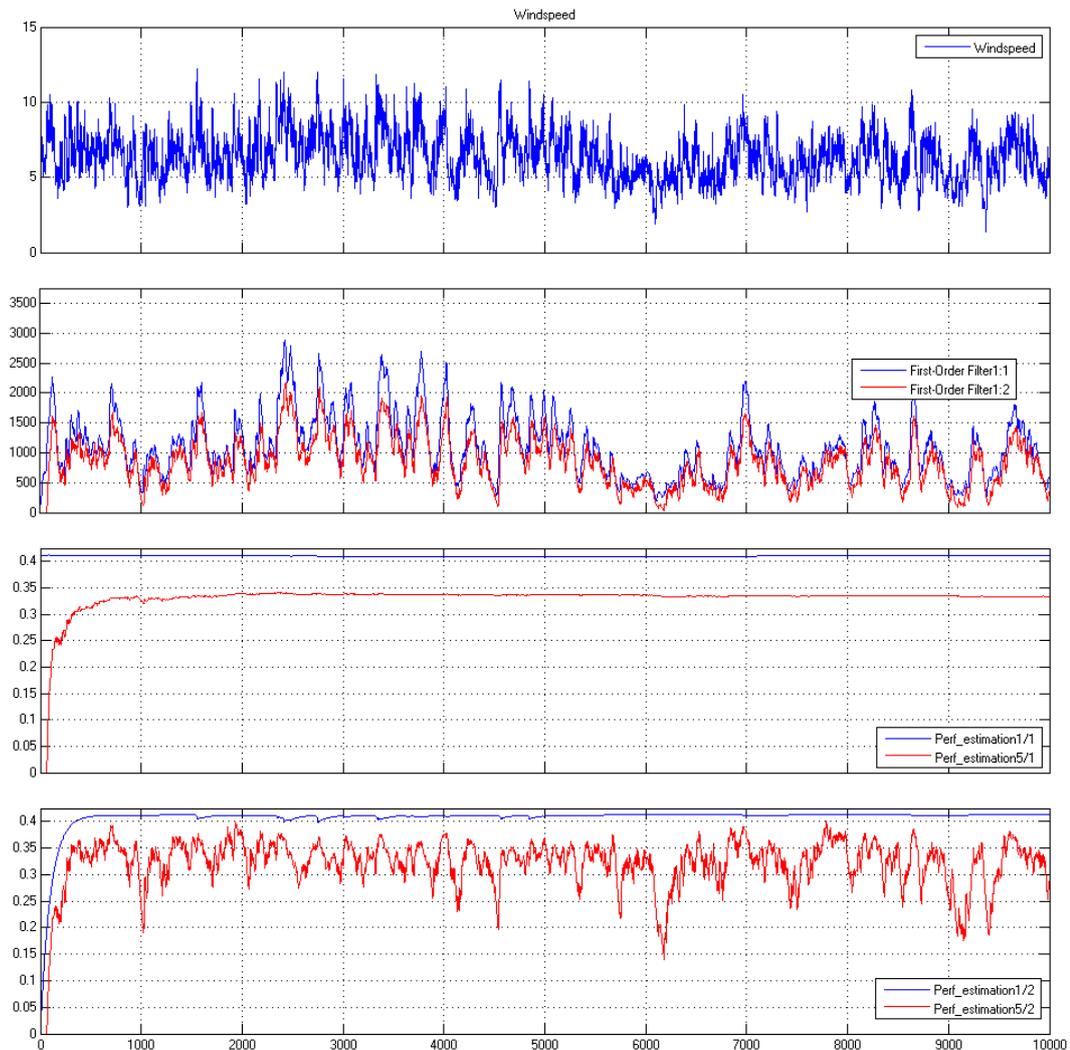


Рисунок 3.31 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра

### 3.2.4 Работа при переменной частоте вращения ветроколеса ВЭУ

Способ управления мощностью ветроэнергетической установки при переменной частоте вращения ветроколеса путем использования элек-

трического преобразователя с регулятором мощности представляется наиболее интересным с точки зрения использования потенциала ветроколеса ВЭУ.

Для исследования особенностей работы ветроэнергетической установки с переменной частотой вращения ветроколеса была использована универсальная модель ВЭУ, представленная на рисунке 3.32. Модель состоит из следующих модулей:

- «Windmill» – модуль, имитирующий работу ветродвигателя по уравнениям (2.1) и (2.2).
- «Alternator» – модуль, имитирующий работу электрического генератора ВЭУ, описание которого приведено во второй главе.
- «Charge Controller» – модуль, имитирующий работу контроллера заряда аккумуляторной батареи и системы управления, обеспечивающей необходимые режимы работы ВЭУ, блок-схема модуля приведена на рисунке 3.34.

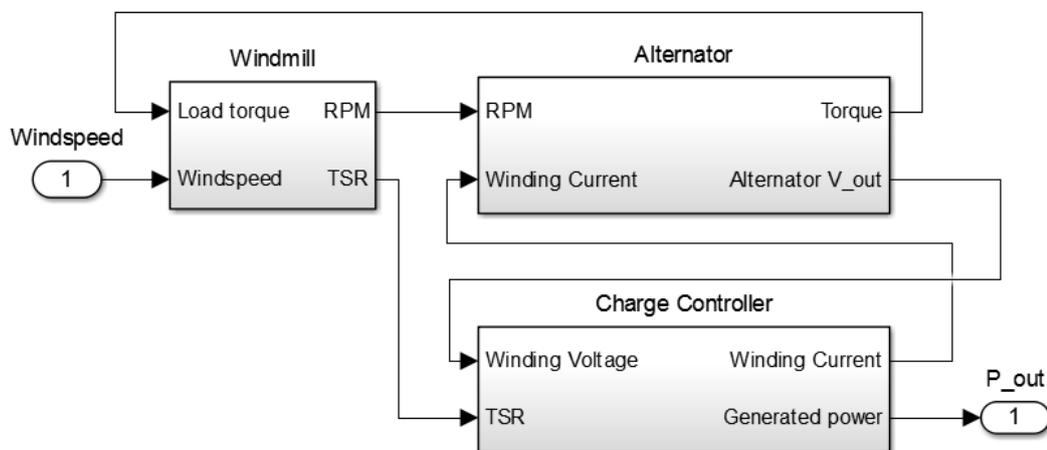


Рисунок 3.32 — Модель ветроэнергетической установки, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя

Модуль электрического генератора, блок-схема которого представлена на рисунке 3.33, вычисляет текущее значение ЭДС в обмотках генератора, величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении, а так же тормозной момент, возникающий в генераторе при работе на

заданную нагрузку. Выходным параметром модуля является напряжение на клеммах и тормозной момент на валу генератора.

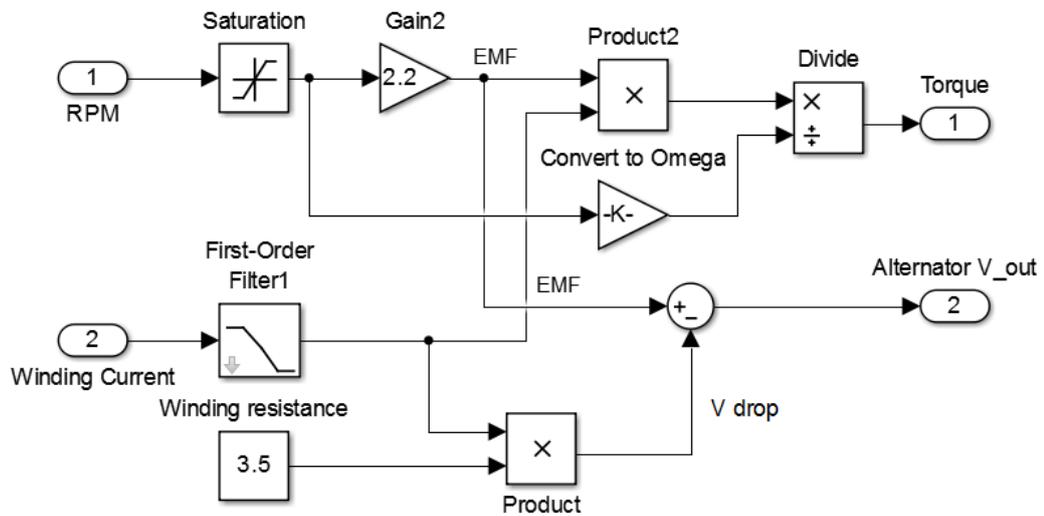


Рисунок 3.33 — Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя

Модуль контроллера заряда ветроэнергетической установки имитирует работу диодного выпрямителя генератора переменного тока, при подключении которого к аккумуляторной батарее происходит регулирование зарядного тока АКБ с помощью электрического преобразователя. Блок-схема модуля приведена на рисунке 3.34.

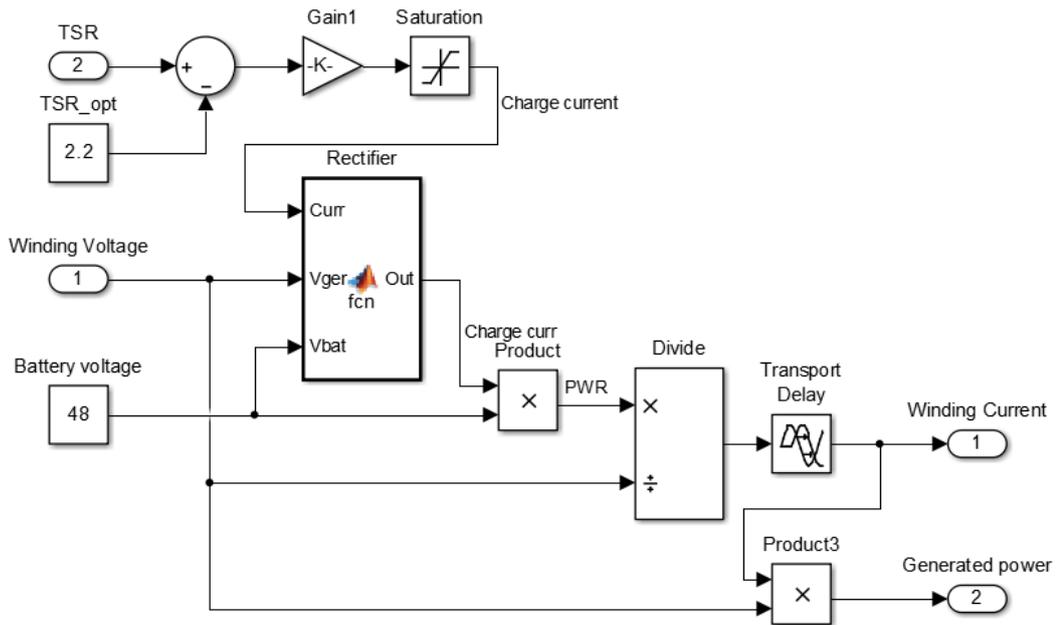


Рисунок 3.34 — Блок-схема модели контроллера заряда ВЭУ, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя

В процессе исследования модель была испытана воздействием нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 3.35.

Верхний график на рисунке показывает зависимость скорости ветра во времени.

Второй сверху график отображает график максимальной-возможной и генерируемой мощности в зависимости от времени моделирования, где синим цветом изображена максимально-возможная электрическая мощность ВЭУ, а красным — текущее расчетное значение.

Третий сверху график отображает интегральное значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Нижний график отображает усредненное с помощью фильтра нижних частот значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным — текущее расчетное значение.

Из результатов численного эксперимента видно, что при увеличении скорости ветра, генерируемая мощность растет вслед за скоро-

стью ветра, достигая своего максимума при максимальной скорости ветра. Максимальная эффективность работы ветроэнергетической установки наблюдается в диапазоне скоростей ветра от 6 до 8 м/с, при больших скоростях ветра эффективность снижается из-за ограничения мощности электрического преобразователя.

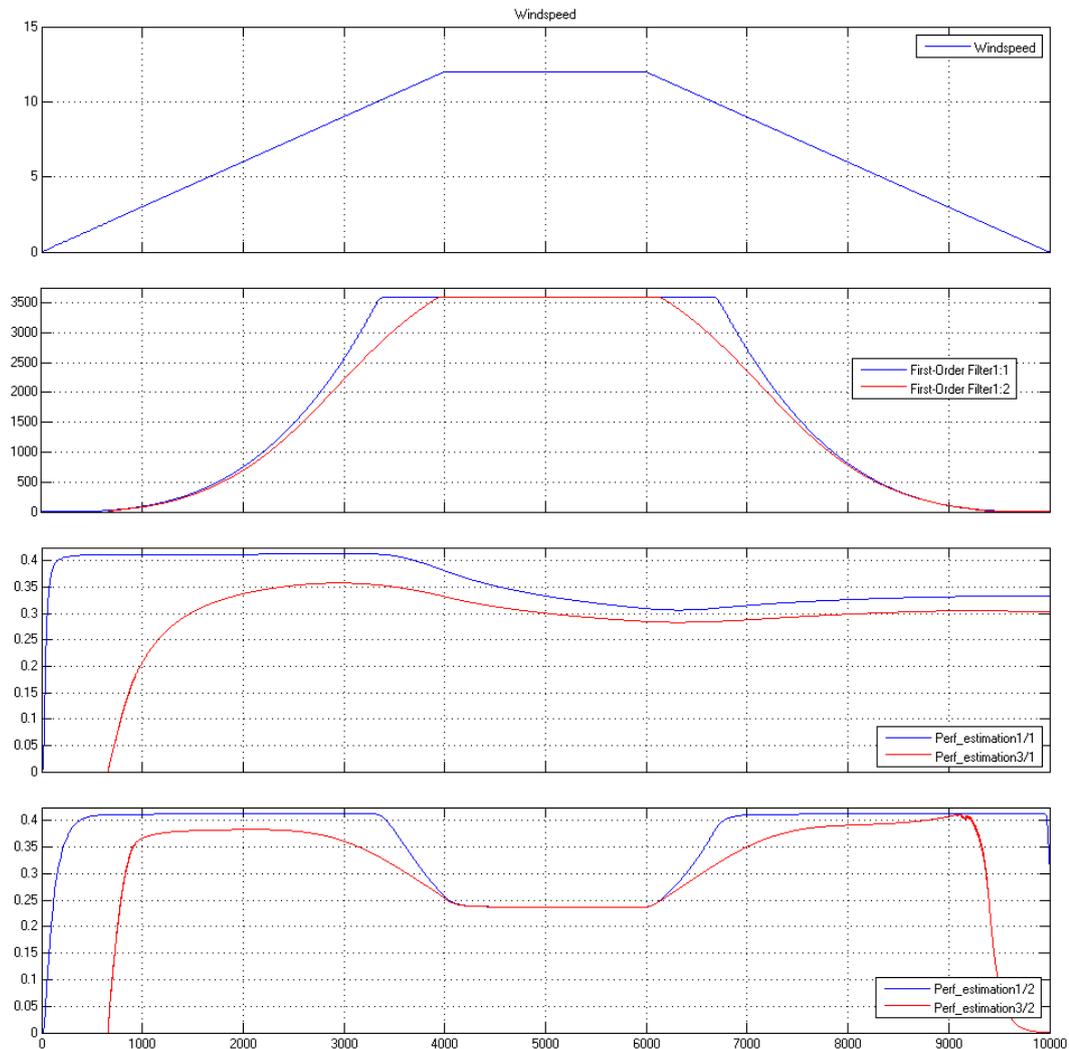


Рисунок 3.35 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра

На рисунке 3.36 приведены результаты испытания модели воздействием гармонически изменяющейся скорости ветра. Из графиков видно, что модель устойчиво реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно что интегральное значение КЭИВ составляет 0,36, что приближается к максимально-возможному 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что максимальная эффективность достигается при

скорости ветра 7 м/с, снижаясь до величины 0,34 при отклонении от этой величины.

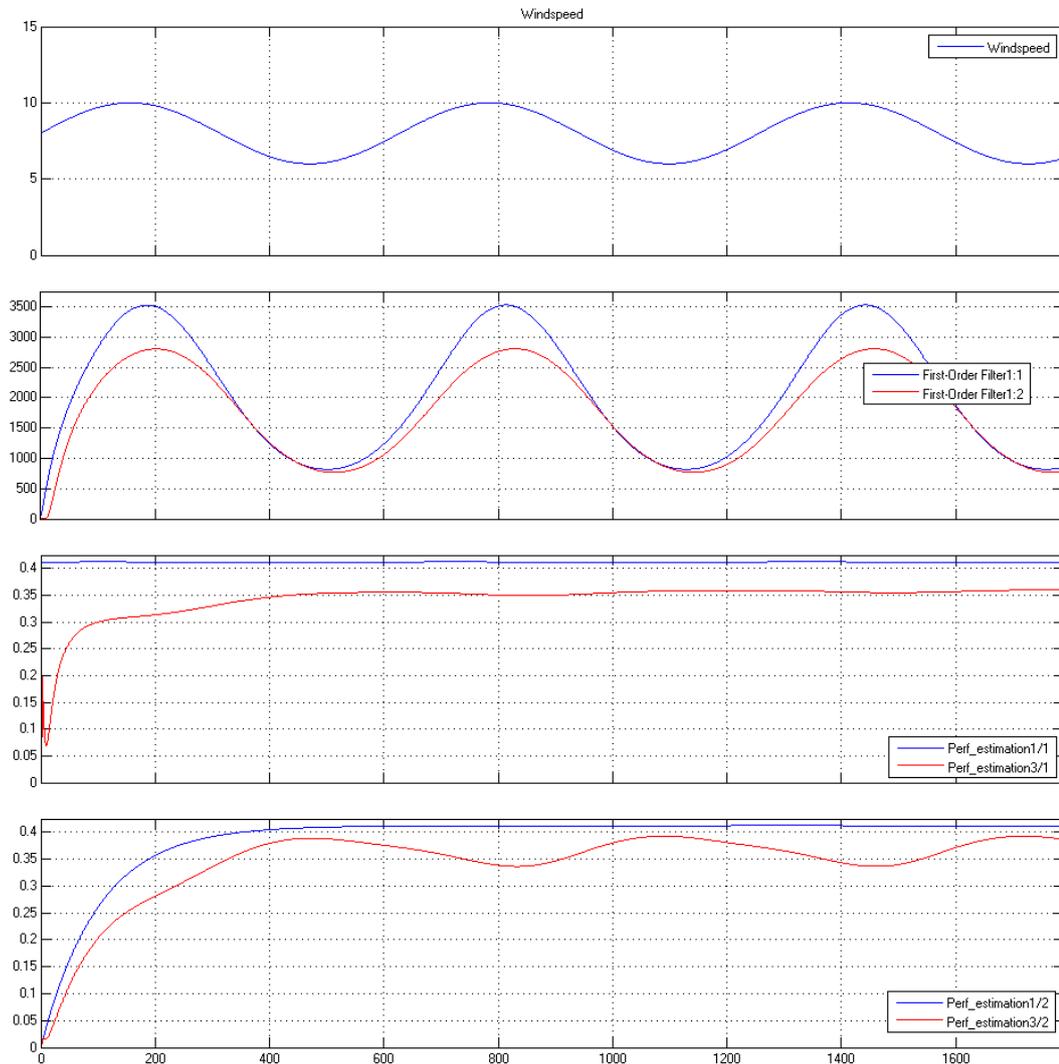


Рисунок 3.36 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра

На рисунке 3.37 приведены результаты испытания модели воздействием реальной скорости ветра. Скорость ветра при этом непрерывно изменяется вокруг среднего значения 7 м/с. Из графиков видно, что модель адекватно реагирует на изменение скорости ветра, при этом видно, что интегральное значение КЭИВ составляет 0,38, что близко к максимально-возможному 0,42. Из графика усредненного значения КИЭВ видно, что эффективность ВЭУ непрерывно меняется вслед за изме-

нением скорости ветра, колеблясь вокруг максимально-возможного значения.

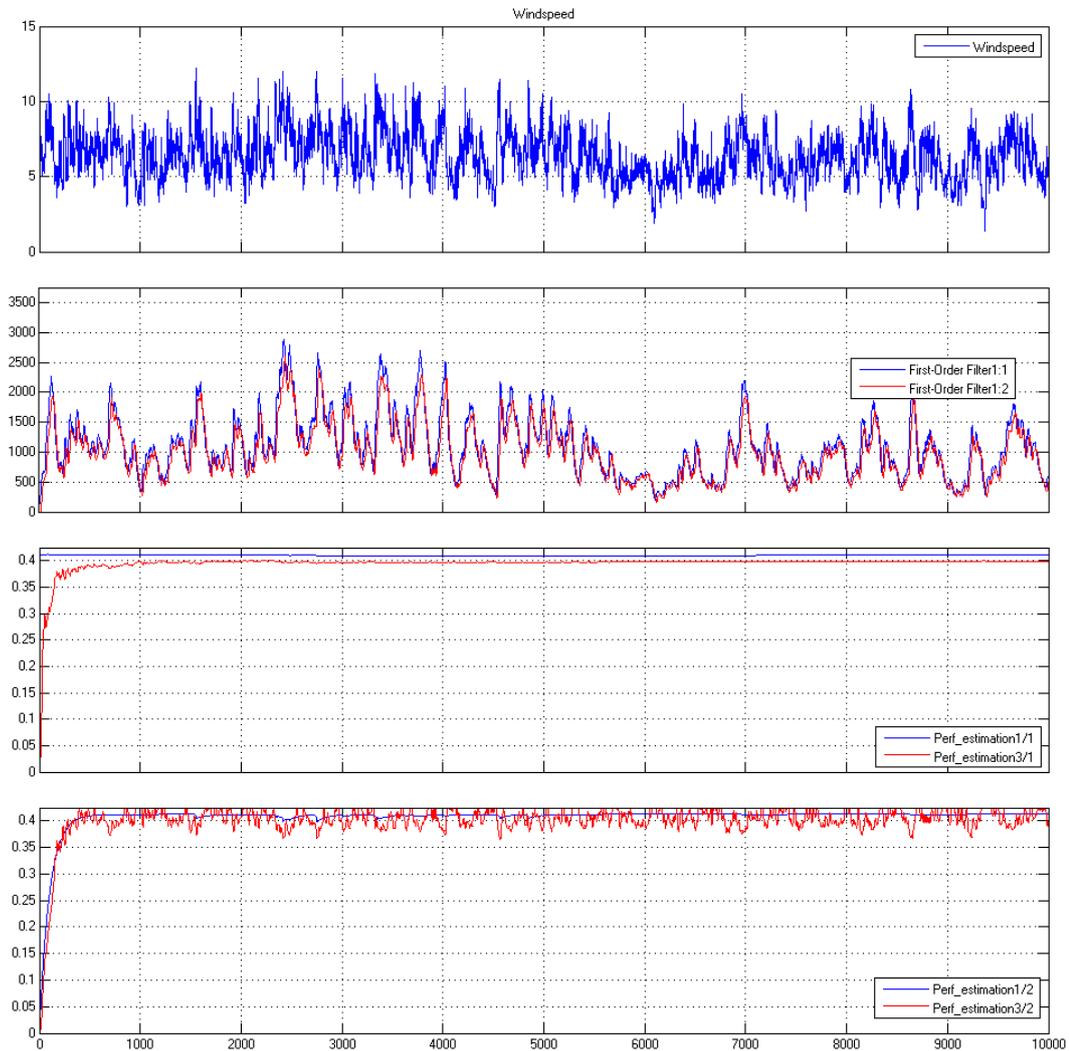


Рисунок 3.37 — Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра

### 3.2.5 Результаты сводного тестирования

Для сводного тестирования всех исследованных способов управления мощностью ветроэнергетической установки была использована универсальная компьютерная модель ВЭУ, представленная на рисунке 3.9.

В процессе исследования все исследуемые модели были испытаны воздействием нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 3.38.

Верхний график на рисунке показывает зависимость скорости ветра от времени моделирования.

Следующий график отображает зависимость максимальной-возможной и генерируемой мощности от времени моделирования, где синим цветом изображена максимально-возможная электрическая мощность ВЭУ, а красным, синим, зеленым, розовым и светло-зеленым — текущее рассчитанное значение четырех, описанных ранее способов, соответственно.

Третий сверху график отображает интегральное значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным, синим, зеленым, розовым и светло-зеленым — текущее рассчитанное значение четырех, описанных ранее способов.

Нижний график отображает усредненное с помощью фильтра нижних частот значение коэффициента использования энергии ветра, где синим цветом изображено максимально-возможное значение КЭИВ, а красным, синим, зеленым, розовым и светло-зеленым — текущее рассчитанное значение четырех, описанных ранее способов.

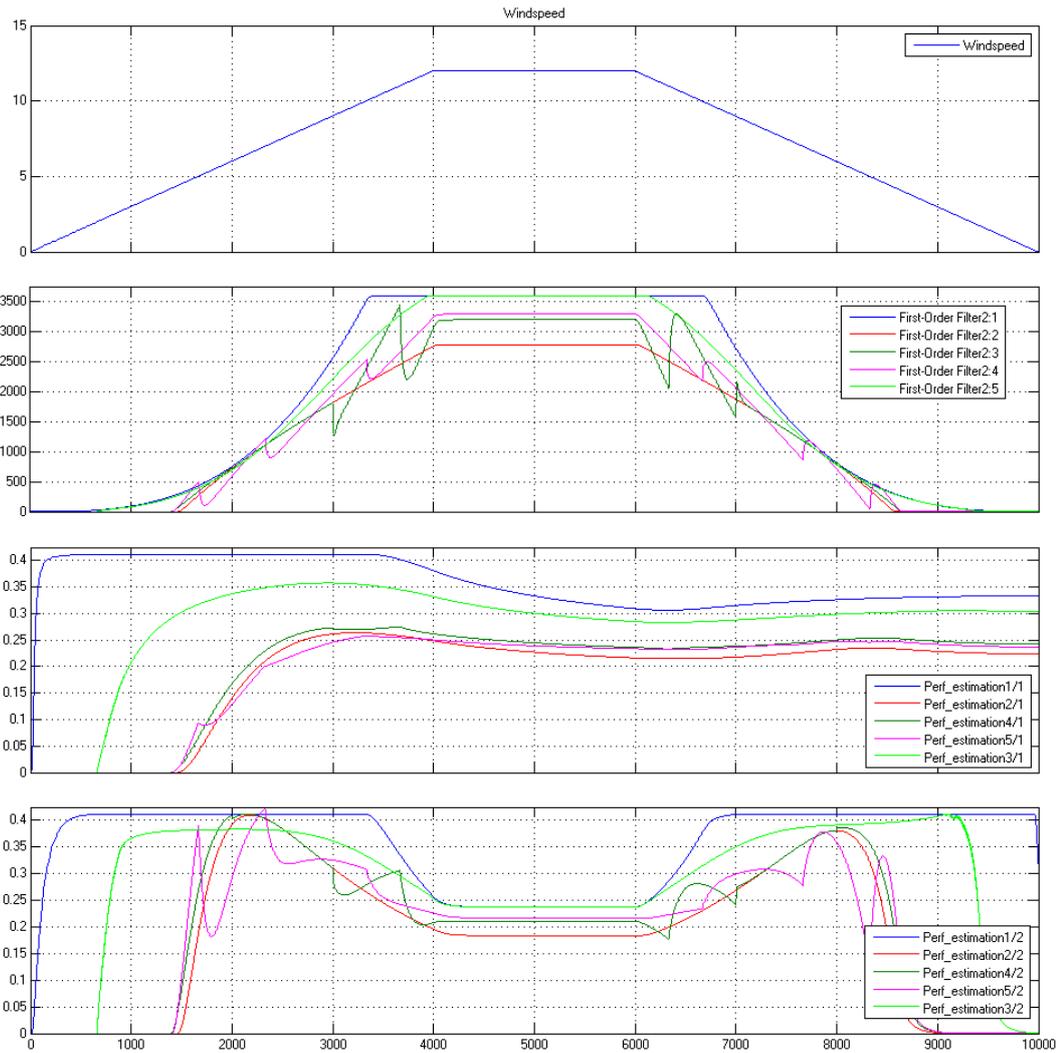


Рисунок 3.38 — Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ нарастающе-затухающим воздействием скорости ветра

Из графиков, показанных на рисунке 3.38 видно, что такие способы управления мощностью ветроэнергетической установки, как работа с переключением обмоток генератора и с переключением передаточного отношения в мультипликаторе между ветродвигателем и валом генератора обеспечивают повышение эффективности работы ВЭУ в некоторых режимах, включая работу при максимальной мощности, однако приводят к снижению этой эффективности других режимах. Наибольший прирост эффективности наблюдается при работе ВЭУ с переменной частотой вращения вала ветроколеса и электрическим преобразователем.

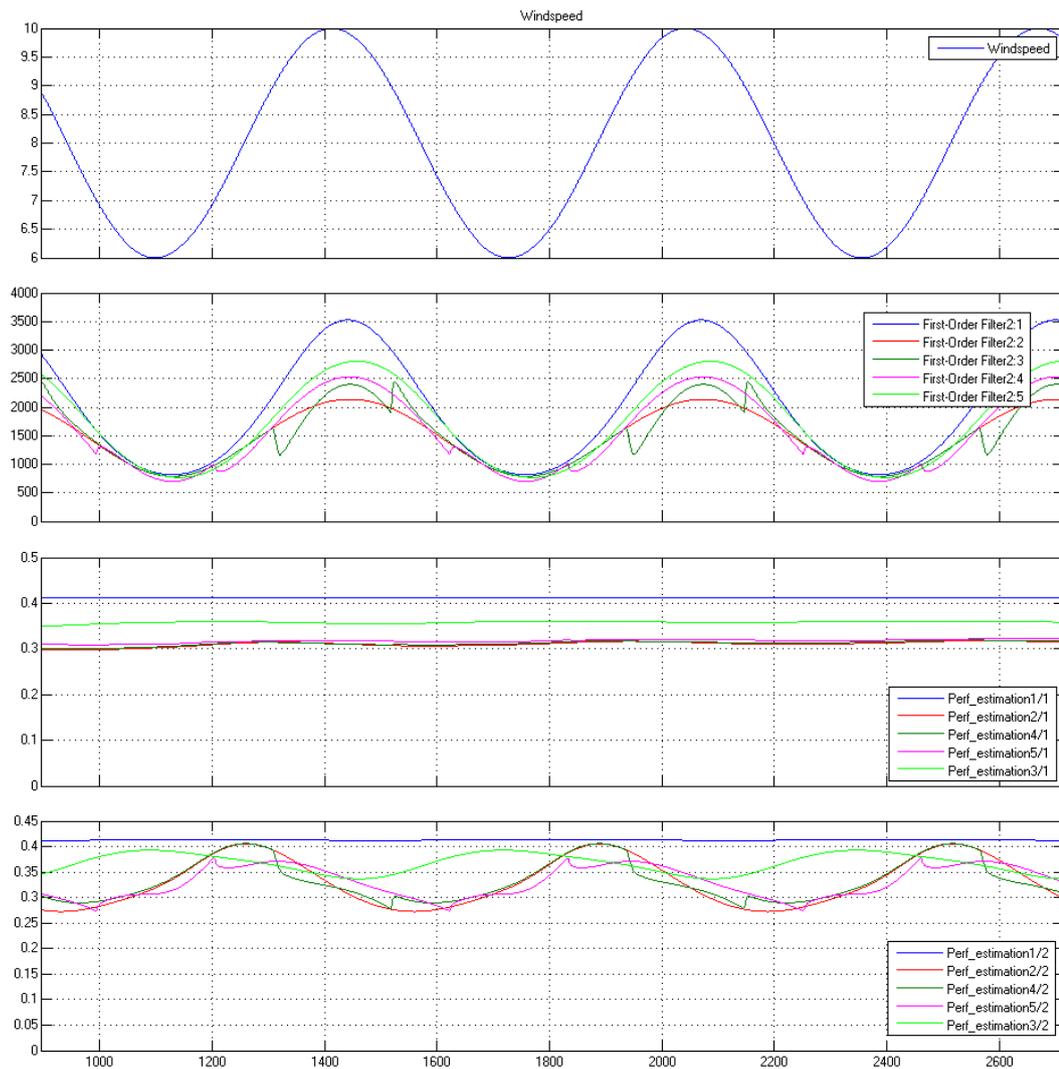


Рисунок 3.39 — Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ гармонически изменяющимся воздействием скорости ветра

Тестирование моделей ВЭУ гармонически изменяющимся воздействием скорости ветра, результаты которого показаны на рисунке 3.39, демонстрирует устойчивую работу всех ветроэнергетических установок, при этом наибольшая эффективность наблюдается при работе ВЭУ с переменной частотой вращения вала ветроколеса и электрическим преобразователем.

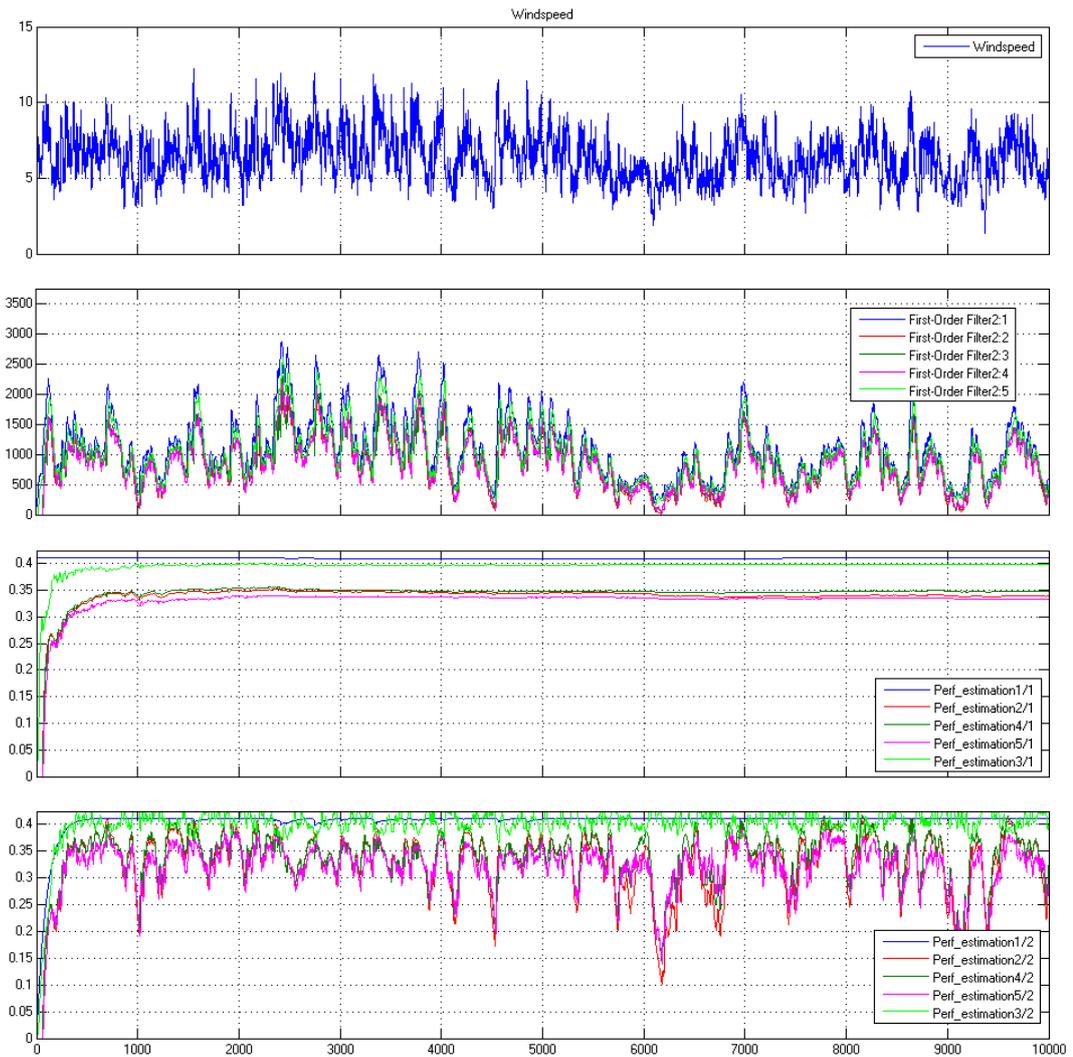


Рисунок 3.40 — Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ воздействием реальной скорости ветра

Сводное тестирование моделей ВЭУ воздействием реальной скорости ветра, результаты которого показаны на рисунке 3.40, демонстрирует существенное отличие работы ВЭУ с переменной частотой вращения вала ветроколеса и электрическим преобразователем в сторону увеличения эффективности, которая вплотную приближается к результатам, полученным с помощью модели оптимальной ВЭУ, показывающей теоретический максимум для данной конструкции ветроколеса.

### 3.3 Разработка алгоритма управления

Для достижения максимальной производительности ВЭУ требуется поддержание частоты вращения ветроколеса в точке наибольшей производительности при изменяющейся скорости ветра, которое можно обеспечить за счет изменения нагрузки на валу ветроколеса [10]. Нагрузкой ветроколеса в ВЭУ является синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов, в котором электромагнитный момент пропорционален току в обмотке якоря [21]. Таким образом, изменяя ток якорной обмотки, можно регулировать частоту вращения ветроколеса, обеспечивая режим наибольшей производительности. При этом максимальная производительность ветроколеса достигается при определенном значении быстроходности  $Z$  для любой заданной скорости ветра, что позволяет сформулировать закон управления ветроэнергетической установкой:

$$\begin{cases} i_g = 0 \text{ при } Z(t) < Z_0 \\ i_g = K \cdot \frac{\omega}{V} \text{ при } Z(t) \geq Z_0 \end{cases} \quad (3.20)$$

где  $Z_0$  – значение оптимальной быстроходности для заданной скорости ветра;  $Z(t)$  – значение текущей быстроходности;  $K$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора. Для такого регулирования системе управления необходимо знать два параметра: угловую скорость ветроколеса  $\omega$  и скорость ветра  $V$ .

Угловая скорость ветроколеса пропорциональна частоте тока в обмотке синхронного генератора и определяется как:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{gen}}{2p}, \quad (3.21)$$

где  $f_{gen}$  – частота тока в фазной обмотке генератора;  $2p$  – число пар полюсов синхронной электрической машины.

Определение скорости ветра  $V$  обычно требует применение специального измерительного прибора, например, анемометра. При этом такой анемометр должен быть расположен в непосредственной близости от

ветроколеса, на той же высоте, и ветроколесо не должно затенять анемометр. Часто такие требования приводят усложнению и удорожанию конструкции ВЭУ, а так же к увеличению стоимости монтажа и эксплуатации системы электроснабжения на основе ветроэнергетической установки. Для определения скорости ветра без использования специальных приборов предложено использовать наблюдатель пониженного порядка (3.18). Такой наблюдатель позволяет оценить скорость ветра по изменению угловой скорости ветроколеса. Для оценки скорости ветра с помощью наблюдателя необходимо значение оценки аэродинамического момента  $\widehat{M}_a$  подставить в уравнение (3.6). Тогда

$$\widehat{V} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \omega \cdot \widehat{M}_a}{C_P \cdot \rho \cdot S}}. \quad (3.22)$$

Перегруппируем (3.22) таким образом, чтобы с правой стороны уравнения находились только измеряемые, оцениваемые или постоянные параметры, тогда

$$\widehat{V} \cdot \sqrt[3]{C_P} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \omega \cdot \widehat{M}_a}{\rho \cdot S}}. \quad (3.23)$$

Приняв, что  $C_P$  при работе в окрестности точек оптимальной работы изменяется мало, можно предположить, что  $C_P$  – коэффициент пропорциональности, тогда  $\widehat{V}$  будет достаточно точно соответствовать  $V$  и может быть использована для оценки текущей быстроходности ветроколеса. Учитывая, что быстроходность ВЭУ – это  $\frac{\omega \cdot r}{V}$ , можно построить регулятор мощности ВЭУ по быстроходности, реализовав замкнутый контур управления.

Для обеспечения необходимого управления по (3.20) предложена система адаптивного регулирования мощности ветроэнергетической установки, функциональная схема которой приведена на рисунке 3.41. Система управления содержит два контура: контур регулирования и контур адаптации. Контур регулирования работает согласно (3.20), где в качестве задающего воздействия  $Z_0$  используется набор значений  $Z_0[i]$ .

Для этого набора  $i$  — это номер диапазона, соответствующий скоростям ветра  $V$  от  $(i - 1)$  до  $i$  м/с. Контур адаптации предназначен для определения оптимального значения задаваемой быстроходности  $Z_0[i]$  в зависимости от текущей скорости ветра для регулирования по (3.20). Адаптация базы знаний  $Z_0[i]$  задающих воздействий осуществляется поиском соответствующего значения  $Z_0[i]$ , при котором наблюдается максимум КИЭВ ВЭУ  $C_P$ , определенный для соответствующего диапазона  $i$  в соответствии с (3.19).

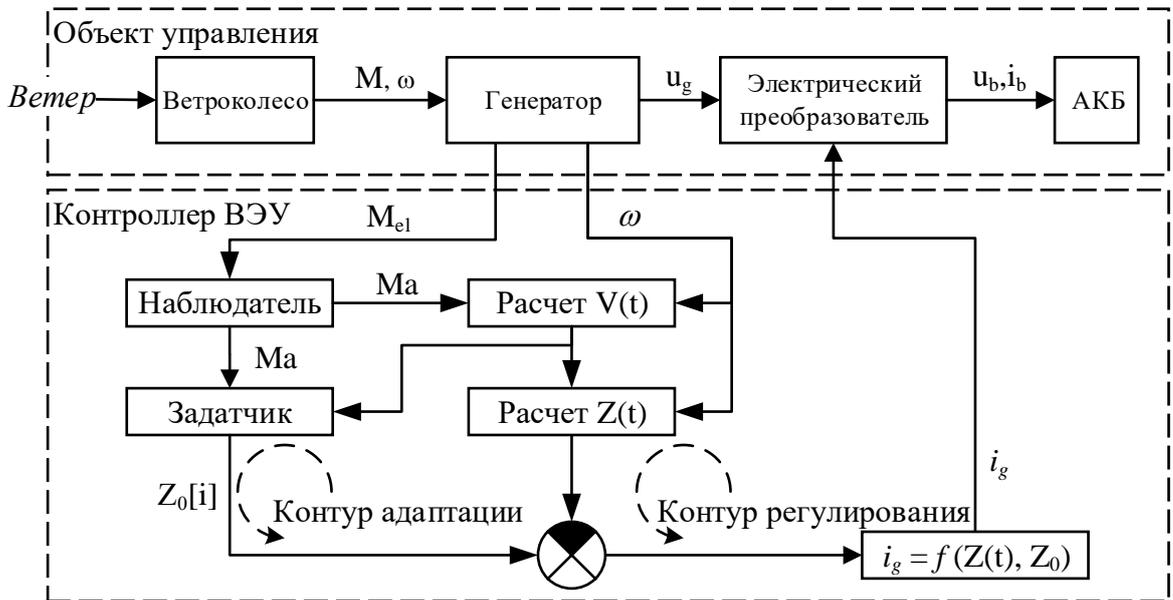


Рисунок 3.41 — Функциональная схема системы адаптивного регулирования мощности ветроэнергетической установки

Для предлагаемой системы управления разработан соответствующий алгоритм адаптивного управления, особенностью которого является возможность адаптации задающего воздействия  $Z(V)$  для обеспечения эффективной работы при любой скорости ветра. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.42. Алгоритм содержит процедуры инициализации, основной цикл и два обработчика прерываний, вызываемых по таймеру.

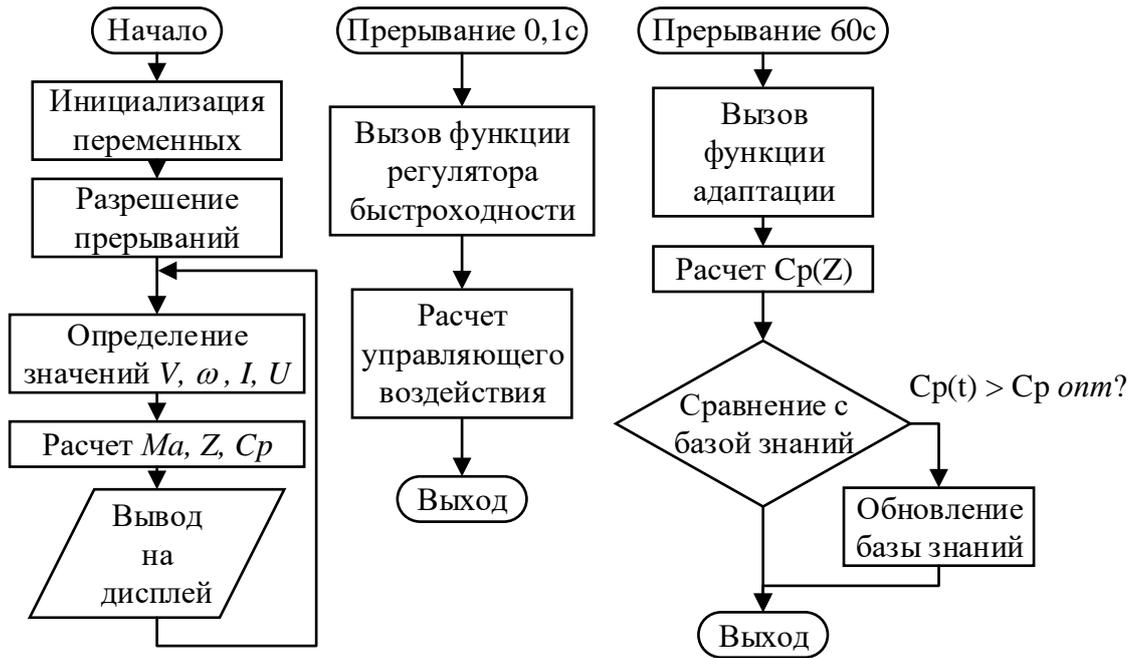


Рисунок 3.42 — Блок-схема алгоритма адаптивного управления

В основном цикле происходит измерение скорости ветра, частоты вращения ветроколеса, а также напряжений и токов в цепи зарядки аккумуляторной батареи для расчета мгновенных значений электрической мощности ВЭУ.

Прерывание с периодом 0,1 с вызывается по срабатыванию таймера, в обработчике прерывания находится функция регулятора быстроходности  $Z$ , который осуществляет расчет и задание требуемого значения тока генератора.

Прерывание с периодом 60 с вызывается по срабатыванию таймера, в обработчике прерывания находится функция адаптации задающего воздействия. В этой функции происходит анализ поведения ветроколеса ВЭУ в окрестностях точки, соответствующей наибольшему значению КИЭВ эффективности. Если это новое полученное значение приводит к увеличению эффективности ВЭУ, то оно заносится в базу знаний для текущего значения скорости ветра. Таким способом формируется база знаний задающего воздействия, состоящая из набора точек в зависимости от скорости ветра. Сама функция  $C_P(V)$  задающего воздействия

восстанавливается из этих точек с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов.

### **3.4 Выводы по главе**

Исследования показали, что в условиях постоянных скоростей ветра наиболее оптимальным является способ удержания постоянной частоты вращения вертикально-осевой ВЭУ благодаря простоте и дешевизне решения. Однако в случае, когда требуется обеспечить эффективную работу ВЭУ при изменяющихся скоростях ветра, лучшим решением представляется работа ВЭУ с переменной частотой вращения ротора. Основываясь на зависимости аэродинамической мощности ветроколеса от скорости ветра и частоты вращения сформулировать правило, что для любой заданной скорости ветра существует частота вращения ротора, при которой мощность ветроэнергетической установки будет максимальной. Поддержание частоты вращения ветроколеса в точке наибольшей эффективности при изменяющейся скорости ветра можно обеспечить за счет изменения нагрузки на валу ветроколеса с помощью электрического преобразователя в качестве регулятора мощности ВЭУ, работающего согласно предложенному алгоритму адаптивного управления.

## ГЛАВА 4

**Разработка и испытания универсального контроллера ВЭУ**

В главе приводится описание разработки, изготовления и испытаний универсального контроллера ветроэнергетической установки. Основываясь на результатах исследований, изложенных в предыдущей главе, была поставлена задача разработать и изготовить контроллер ветроэнергетической установки, обеспечивающий работу ВЭУ по разработанному алгоритму.

**4.1 Разработка универсального контроллера ВЭУ**

Общие требования, накладываемые на универсальный контроллер ветроэнергетической установки:

- Контроллер должен обеспечивать распределение генерируемой электрической энергии для заряда аккумулятора и питания нагрузки [62; 112].

- Контроллер должен регулировать ток в якорных обмотках генератора для формирования оптимального электромагнитного момента на валу электрической машины, основываясь на определении внешних параметров ВЭУ (скорости ветра, частоты вращения ветроколеса, состояния аккумуляторной батареи и др.) [111].

- Контроллер должен обнаруживать выход рабочих параметров за пределы безопасных режимов и обеспечивать защиту конструкции ВЭУ [79].

- Контроллер должен по возможности осуществлять зарядку аккумуляторной батареи постоянным током с ограничением напряжения при наличии достаточной располагаемой мощности [131].

- Контроллер должен предохранять аккумуляторную батарею от чрезмерного разряда [121].

- Схема управления контроллера должна быть построена на основе перепрограммируемого микроконтроллера для обеспечения возмож-

ности изменения алгоритма управления. Для настройки, диагностики и программирования контроллер должен иметь интерфейс связи с персональным компьютером (PC).

Для верификации модельных экспериментов натурными испытаниями разработан, изготовлен и испытан контроллер ветроэнергетической установки. Структурная схема контроллера ВЭУ представлена на рисунке 4.1, а укрупненная электрическая схема показана на рисунке 4.2

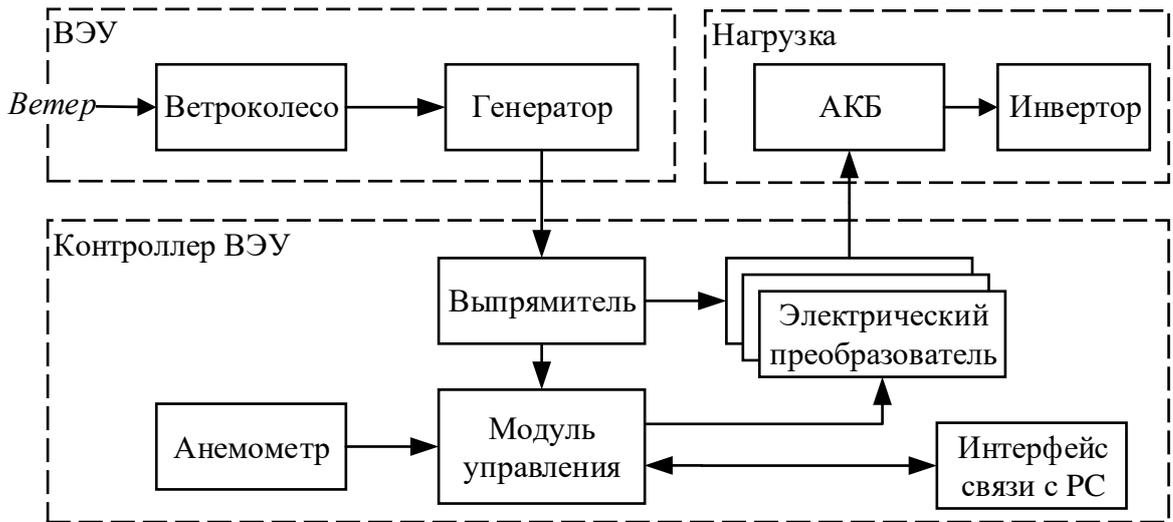


Рисунок 4.1 — Структурная схема контроллера ВЭУ

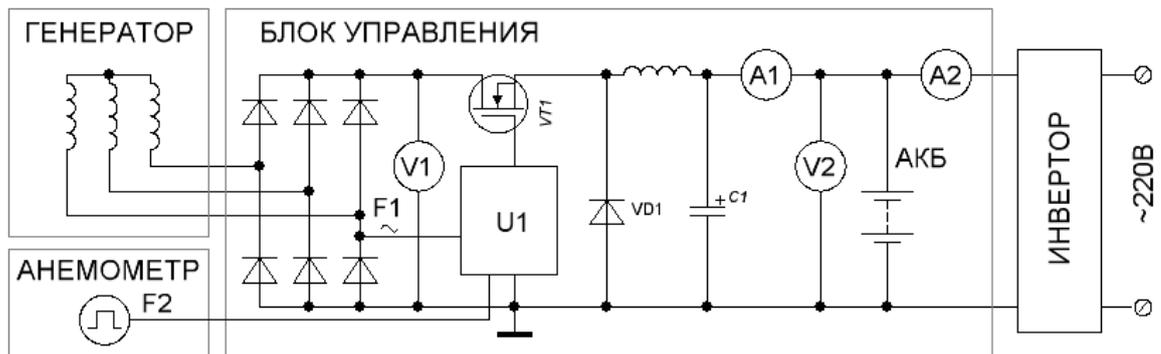


Рисунок 4.2 — Укрупненная электрическая схема контроллера ВЭУ

Измеряемые параметры для обеспечения алгоритма регулирования мощности:

- напряжение на выходе выпрямителя генератора V1 (рисунок 4.2) для измерения уровня напряжения на входе импульсного преобразователя;
- напряжение на аккумуляторной батарее V2 (рисунок 4.2) для определения степени заряда батареи и организации обратной связи по напряжению;
- ток A1 (рисунок 4.2) для организации обратной связи по току зарядки аккумуляторной батареи;
- ток A2 (рисунок 4.2), который идет от аккумуляторной батареи в нагрузку, для определения расхода электрической энергии и наличия возможности зарядки аккумуляторной батареи;
- частота F1 (рисунок 4.2) на фазном проводе генератора для определения частоты вращения ротора путем измерения частоты тока в обмотке синхронного генератора;
- частота F2 (рисунок 4.2) как сигнал, пропорциональный частоте вращения ротора чашечного анемометра, который служит для определения скорости ветра.

Разработанный универсальный контроллер содержит три одинаковых силовых модуля по 1кВт каждый, подключенных к плате управления и работающих параллельно[82]. Это позволяет существенно облегчить разработку и изготовление устройства, т.к. это упрощает требования к характеристикам модулей[56].

Основываясь на структурной схеме, в процессе работы над универсальным контроллером была разработана схема электрическая принципиальная, подробно описанная далее.

Напряжение электрического генератора ветроэнергетической установки поступает на вход универсального контроллера (рисунок 4.3), где переменный ток выпрямляется с помощью трехфазного выпрямителя (D2, D3, D4) и передается на разъемы «PWR\_IN» и «PGND1», предназначенные для подключения регуляторов тока. Так же на этом рисунке изображены преобразователи уровней входного напряжения для согласования их с датчиками входного напряжения и частоты вращения вала

генератора, в качестве которых выступает АЦП управляющего микроконтроллера.

Выпрямленное напряжение от генератора поступает на трехфазный выпрямительный мост, построенный по схеме Ларионова[14]. После чего выпрямленное напряжение поступает на силовые модули для преобразования в ток зарядки аккумуляторных батарей согласно закону, определяемому микроконтроллером платы управления исходя из сложившихся погодных условий. На операционном усилителе U6B построена схема детектора пересечения нуля, которая работает в широком диапазоне входных напряжений. Это позволяет определять частоту вращения ротора в широком диапазоне посредством детектирования частоты переменного тока в обмотках генератора. На операционном усилителе U6A построен делитель напряжения и фильтр НЧ второго порядка для определения величины выпрямленного напряжения генератора.

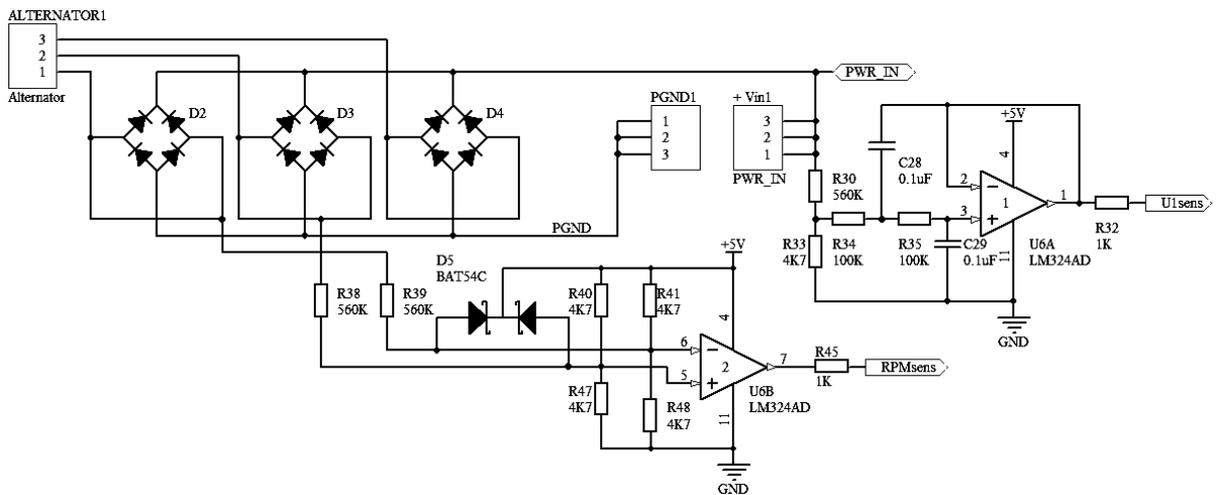


Рисунок 4.3 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, трехфазный выпрямитель и преобразователь уровней для АЦП

Фрагмент схемы на рисунке 4.4 показывает преобразователь уровня напряжения аккумуляторной батареи, выполненный на операционном усилителе U6C, и датчик тока U8, предназначенный для измерения тока заряда аккумуляторной батареи.

Схема измерения тока заряда аккумуляторной батареи реализована посредством датчика тока на эффекте Холла ACS754. Датчики тока этой

серии представляют собой интегральную микросхему. Ниже приведены некоторые параметры, характеризующие серию ACS750:

- максимальный рабочий ток  $\pm 50$  А,  $\pm 75$  А,  $\pm 100$  А;
- напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 5 \dots 16$  В;
- потребляемый ток 7 мА (макс. 10 мА);
- выход по напряжению;
- выходное напряжение пропорционально входному току:  $I_{\text{раб}} = 0$  А,
- $U_{\text{вых}} = 0,5 U_{\text{ип}}$ ;
- внутреннее проходное сопротивление 130 мкОм;
- диапазон рабочих частот до 13 кГц;
- напряжение изоляции 3 кВ;
- температурный диапазон  $-20 \dots +85$  °С;
- малые габариты (сопоставимы с ТО-220).

Подробную техническую информацию можно получить на сайте компании производителя.

На операционном усилителе U6C построена схема делителя напряжения и преобразователя уровня для измерения напряжения на аккумуляторной батарее в диапазоне 30..60 Вольт постоянного тока посредством аналогово-цифрового преобразователя, встроенного в управляющий микроконтроллер.

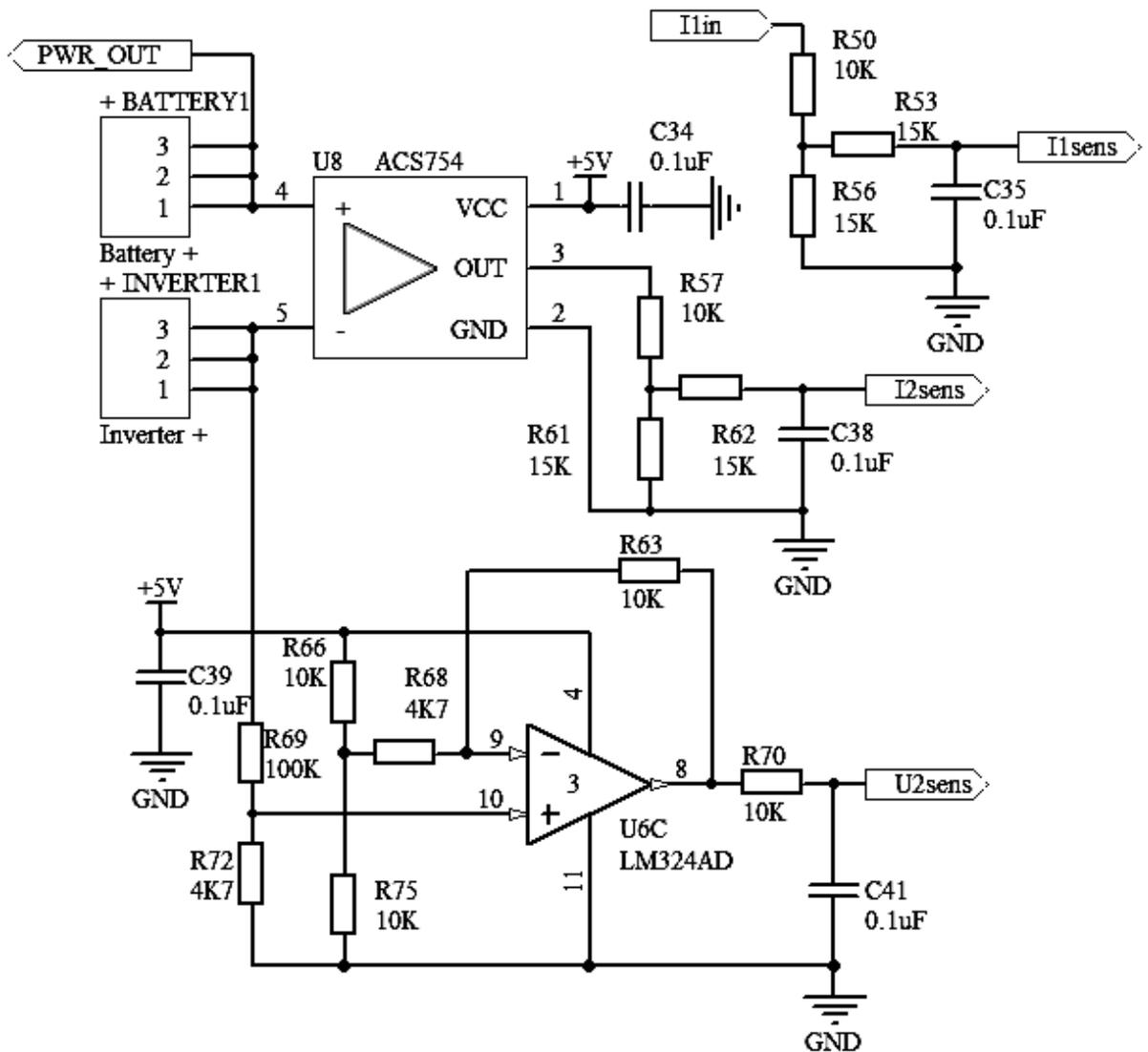


Рисунок 4.4 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, подключение датчиков тока и напряжения АКБ

Фрагмент схемы на рисунке 4.5 показывает схему управления транзисторными ключами, предназначенными для управления нагрузкой. Ключ открывается по сигналу управления от микроконтроллера и предназначен для включения и отключения напряжения питания регуляторов тока, что требуется для осуществления энергосберегающих режимов работы универсального контроллера.

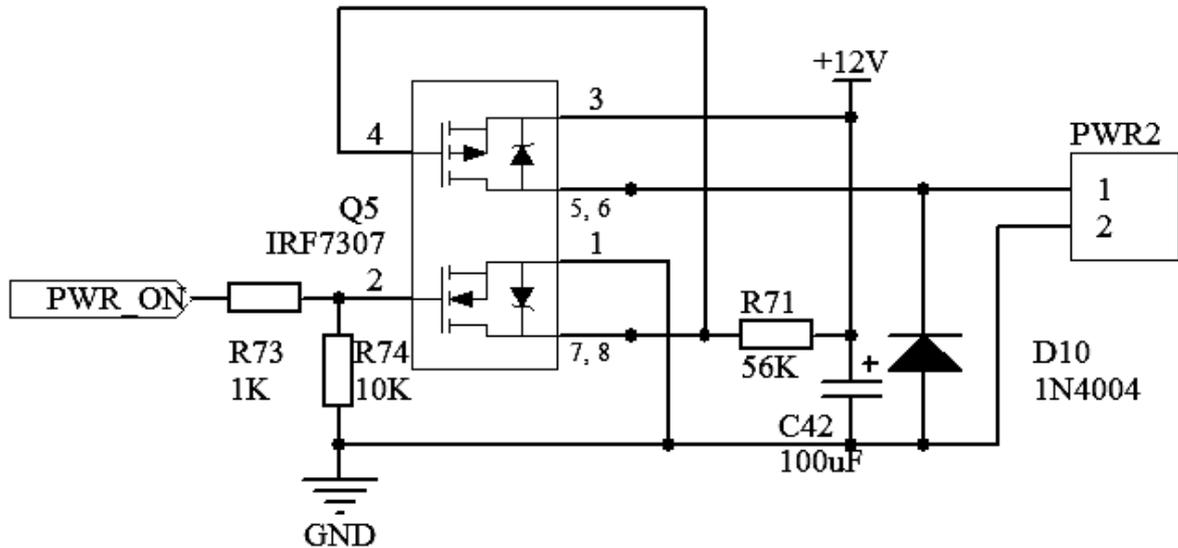


Рисунок 4.5 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, схема управления нагрузкой

Для обеспечения функции обмена данными и командами управления через альтернативный интерфейс с персональным компьютером в конструкцию включен интерфейс RS-232, электрическая схема которого представлена на рисунке 4.6. RS232 — широко распространенный протокол, применяемый для связи средств вычислительной техники с периферийными устройствами и предназначен для обмена данным между двумя устройствами на расстояние до 20 м с помощью проводной связи уровнями сигналов от +/-3 до +/-12 В. Интерфейс поддерживает синхронный и асинхронные режимы передачи данных.

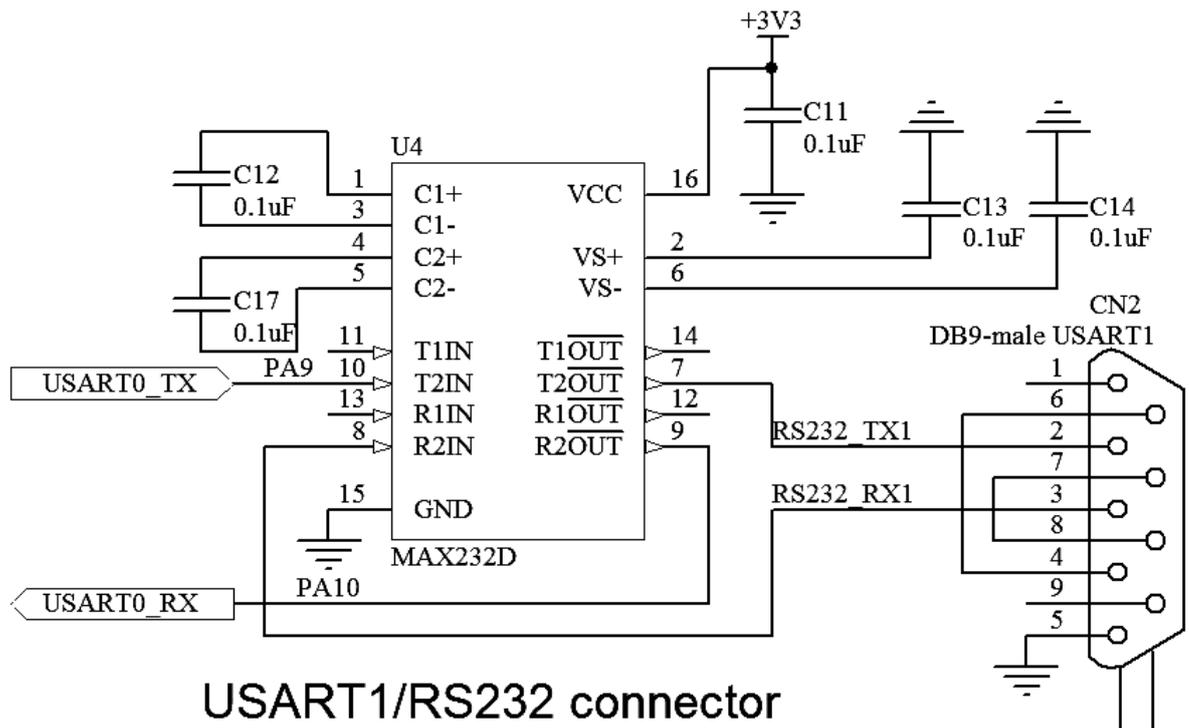


Рисунок 4.6 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, преобразователь RS-232 интерфейса

Универсальный контроллер ветроэнергетической установки обладает функцией обмена данными и командами управления с персональным компьютером через интерфейс USB. Для обеспечения возможности подключения переносных регистрирующих устройств, не оборудованных интерфейсом RS-232, но имеющих порт USB (ноутбуки, коммуникаторы, смартфоны) на плате управления был реализован USB интерфейс посредством встроенного в управляющий микроконтроллер контроллера шины USB-FS, схема интерфейса представлена на рисунке 4.7.

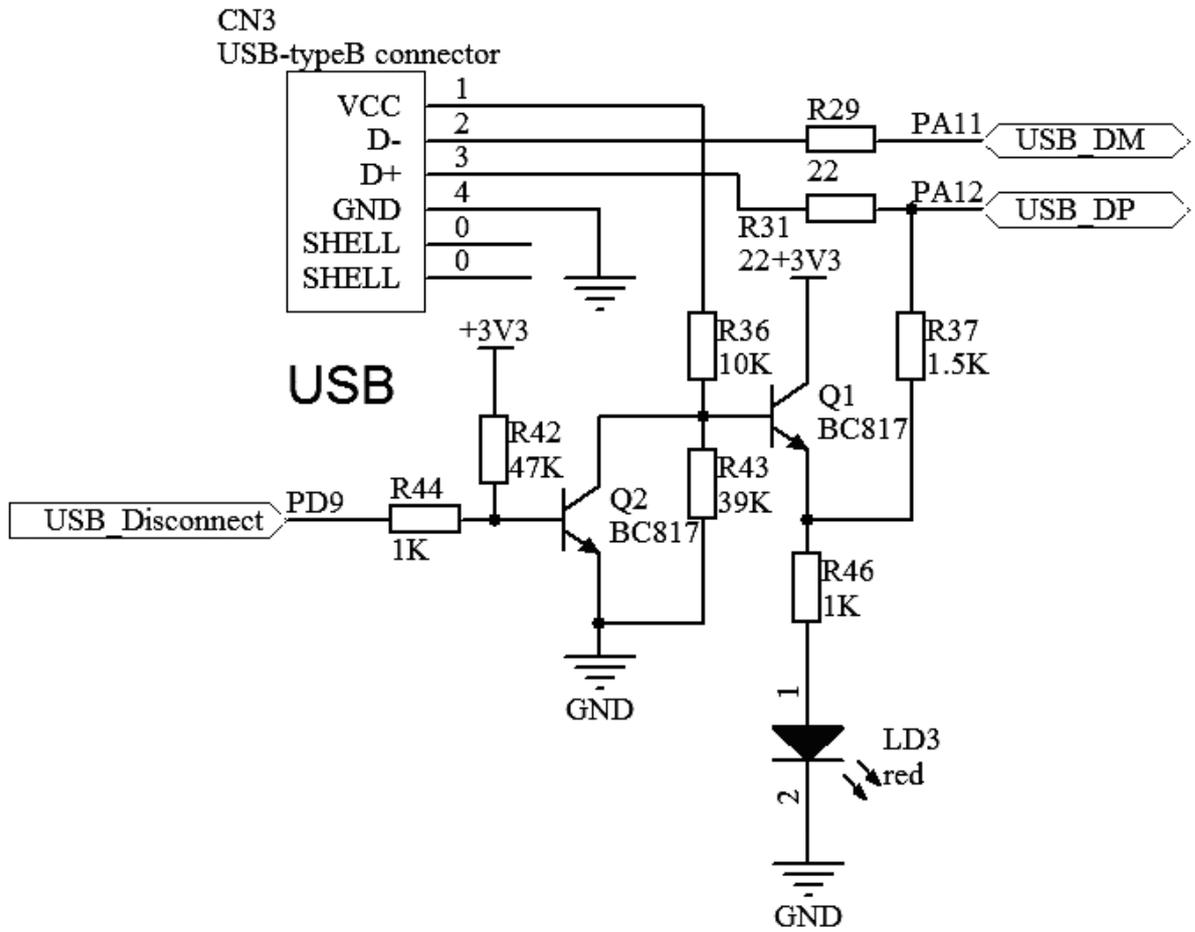


Рисунок 4.7 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, схема USB интерфейса

Для передачи команд управления от платы управления к платам силовых преобразователей используется набор команд, передаваемых по протоколу MODBUS посредством интерфейса RS-485. Интерфейс RS-485 обычно используется для организации локальных сетей промышленного назначения. Отличительными особенностями интерфейса являются:

- широкая доступность и невысокая стоимость микросхем драйверов, что упрощает аппаратную реализацию связываемых устройств;
- для организации связи на базе интерфейса RS-485 достаточно двухпроводного кабеля, что снижает себестоимость системы;
- малые габаритные размеры микросхем драйверов. Часто применяются микросхемы в корпусе DIP-8 или SO-8 со стандартным распо-

ложением выводов, что экономит площадь печатной платы и снижает стоимость устройства;

- микросхемы драйверов обладают низким потреблением, некоторые модели драйверов обладают режимами экономии энергии при бездействии;

- современные микросхемы драйверов обладают высокой нагрузочной способностью, что повышает надежность;

- современные микросхемы драйверов обеспечивают высокую скорость передачи данных, это позволяет сократить время передачи управляющих сигналов.

Для передачи команд управления от универсального контроллера к регуляторам тока и считывания их состояния в схему добавлен интерфейс RS-485, показанный на рисунке 4.8.

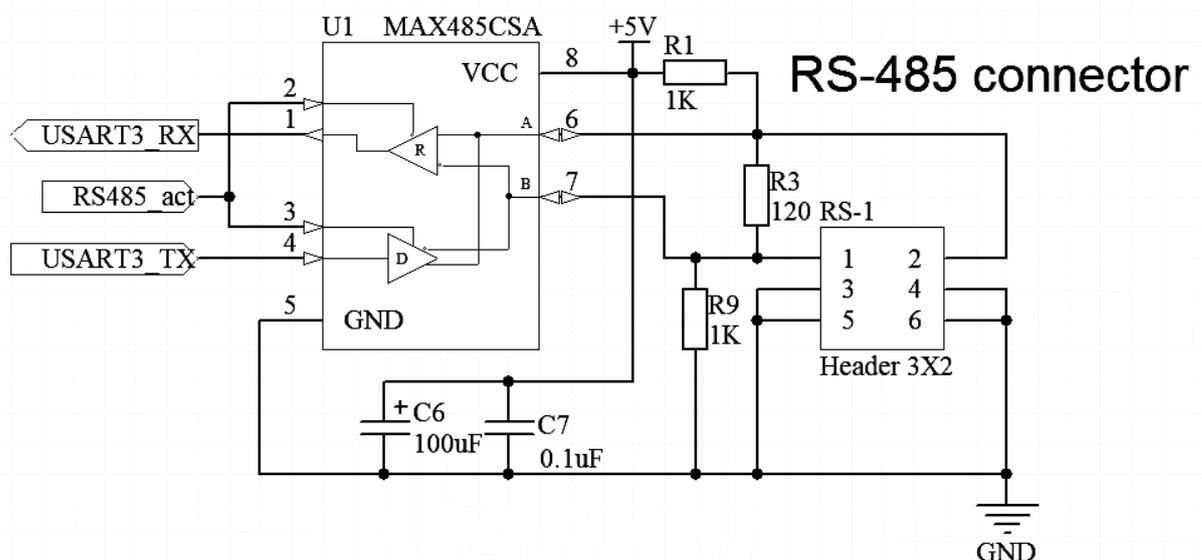


Рисунок 4.8 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, преобразователь RS-485 интерфейса

Основой схемы управления является микроконтроллер STM32F103RCT, разработанный компанией ST Microelectronics, семейство STM32 которой стало первым ее семейством микроконтроллеров, выполненных на основе нового ЦПУ ARM Cortex-M3. Эти микроконтроллеры стали новым эталоном по уровню рабочих характе-

ристик и стоимости. Они могут использоваться в применениях с малым энергопотреблением и жесткими требованиями к характеристикам управления в масштабе реального времени. STM32F103RCT — это 32-битный микроконтроллер на ядре Cortex-M3, с широким набором периферии (12-битный АЦП, 2x12 битных ЦАП, DMA, USART, I2C, SPI, 37 GPIO, ...).

STM32F103RCT является представителем семейства микроконтроллеров STM32, которое включает в себя более 180 вариантов, в том числе варианты со встроенным Zigbee каналом, со встроенными интерфейсами Ethernet и USB HS OTG, с производительностью 150 DMIPS, с потреблением 500нА в спящем режиме с сохранением содержания памяти SRAM и другие варианты.

Микроконтроллеры семейства STM32F103RCT предназначены для различных крайне чувствительных к стоимости применений, где возможностей 16-битного микроконтроллера уже недостаточно, а функциональность обычных 32-битных микроконтроллеров избыточна. Основные характеристики микроконтроллера STM32F103RCT:

- максимальная тактовая частота 72 МГц;
- 48 Кб ОЗУ, 256 Кб флэш-памяти;
- 16-канальный 12-битный АЦП (1.2 мкс) с датчиком температуры;
- два 12-битных ЦАП;
- 7-канальный DMA контроллер;
- I2C(SMBus/PMBus), 2x USART, SPI(2 Мбит/с), HDMI;
- 51 GPIO (для некоторых совместимость с 5 В);
- два сторожевых таймера (IWDG и WWDG);
- 5 таймеров общего и 1 расширенного назначений;
- два встроенных и откалиброванных тактовых генератора на 40 КГц и 8 МГц;
- 96-битный уникальный идентификатор (ID);
- управление питанием и сбросом (3 режима низкого потребления, PVD, BOR);

- аппаратный расчет CRC;
- напряжения питания 2.0 – 3.6 В;
- корпус LQFP64.

Так же схема управления содержит элементы интерфейса пользователя, такие, как ЖКИ индикатор WH1602D, предназначенный для отображения алфавитно-цифровой информации в 2 строки по 16 символов. Технические характеристики индикатора приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Технические характеристики индикатора WH1602D

Параметр	Значение
Тип дисплея	Символьный
Напряжение питания постоянное, В	+3...5
Символов в строке, шт	16
Строк, шт	2
Набор символов	русский/латинский
Температура эксплуатации, °С	-20...+70
Относительная влажность эксплуатации, %	до35
Габаритные размеры, ДхШхВ, мм	84 x 44 x 6 мм

Другим элементом интерфейса пользователя является энкодер PЭС-16 со встроенной кнопкой, который позволяет организовать взаимодействие с пользователем посредством многострочного меню.

Схема подключения микроконтроллера с соответствующими стабилизаторами напряжения, кварцевым генератором, источником опорного напряжения, светодиодными индикаторами, преобразователем сигнала от анемометра, интерфейсом подключения жидкокристаллического индикатора и устройства ввода (энкодера) представлена на рисунке 4.9.

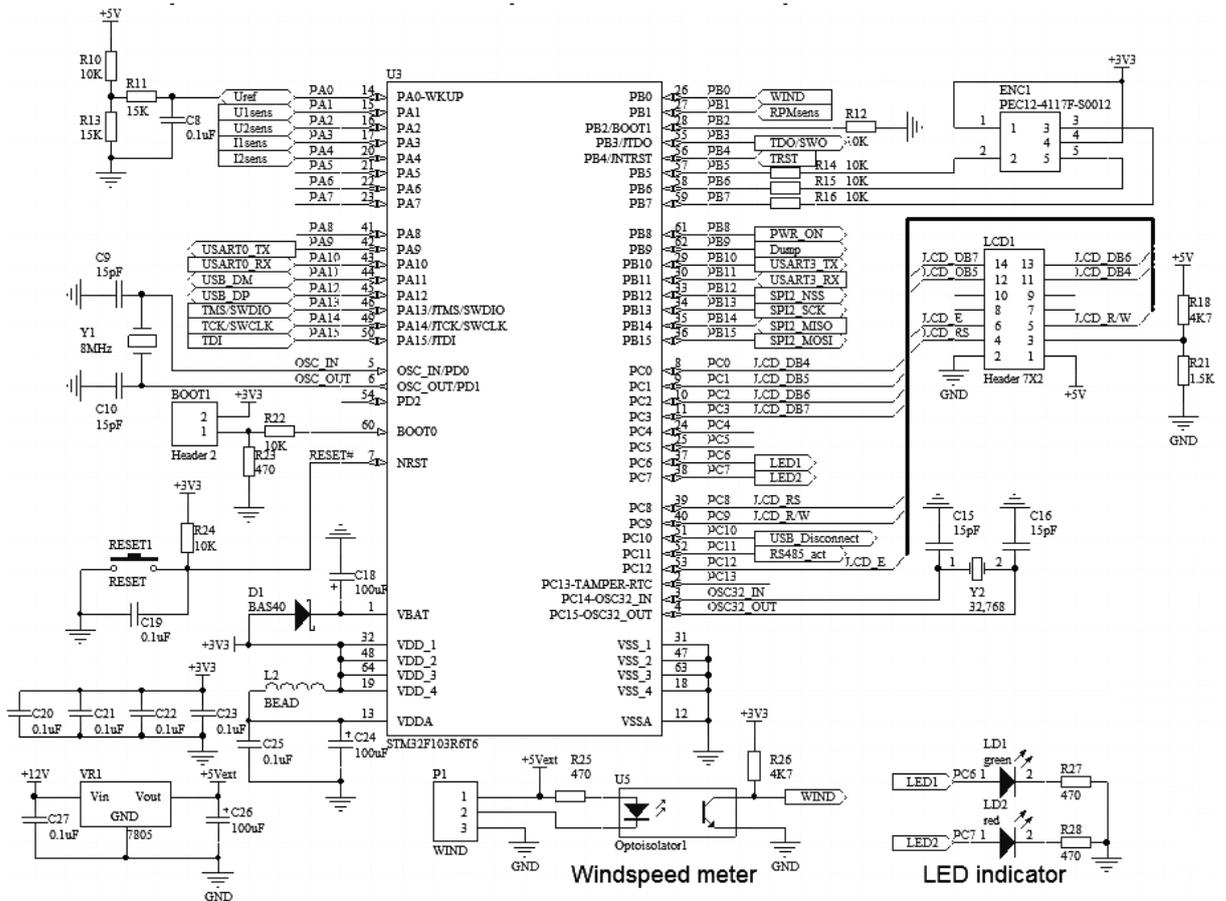


Рисунок 4.9 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, управляющий микроконтроллер с обвязкой

Для обеспечения работоспособности схемы, как контроллера управления, так и регуляторов тока, необходим источник вторичного питания. Схема источника питания, преобразующего постоянный ток напряжением 48В от аккумуляторной батареи в постоянный ток напряжением 12В, предназначенный для питания стабилизаторов напряжения микроконтроллера и регуляторов тока представлена на рисунке 4.10. В течение времени когда ключ находится в проводящем состоянии энергия запасается в первичной обмотке трансформатора Т1, и передается во вторичную обмотку когда ключ находится в выключенном состоянии.

Автономные обратноходовые преобразователи обычно используются в диапазоне выходных мощностей от 30 Вт до 250 Вт. Обратногоходовая топология в основном используется для создания недорогих многовывод-

ных импульсных источников питания, поскольку не используется дополнительный индуктивный фильтр на выходе.

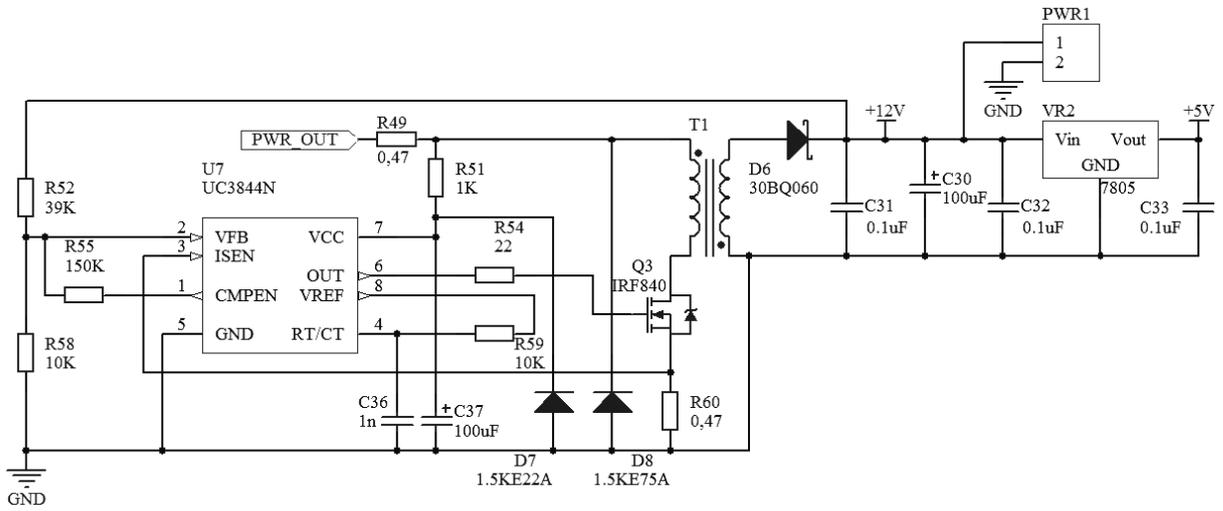


Рисунок 4.10 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, вторичный источник питания

Регулятор тока, выполненный по схеме импульсного понижающего преобразователя показан на рисунке 4.11.

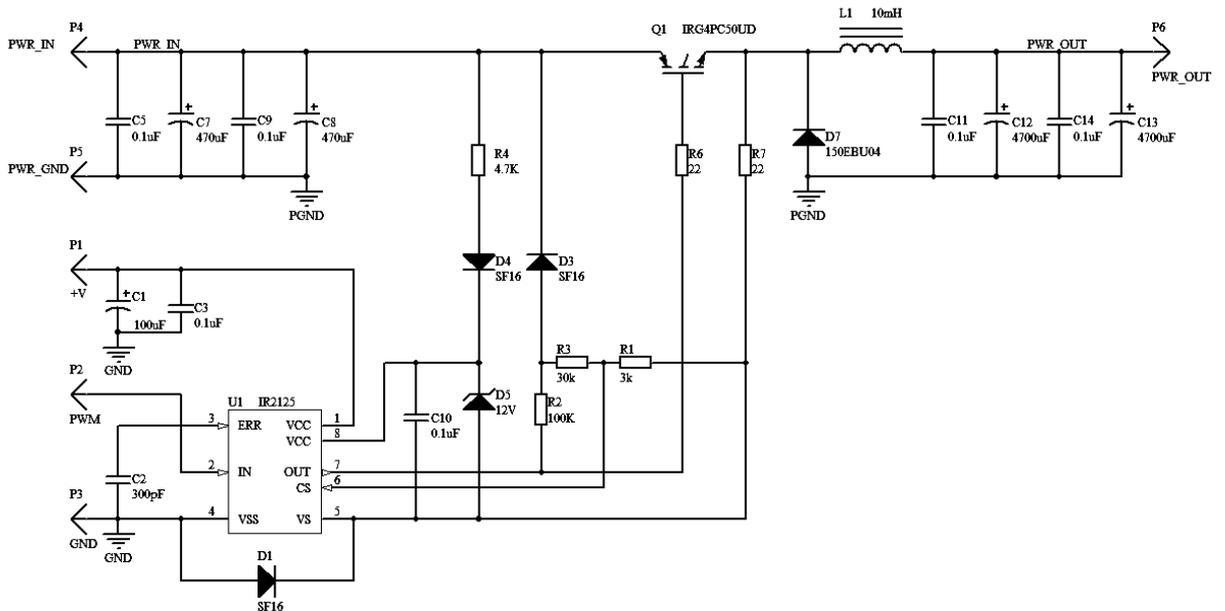


Рисунок 4.11 — Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, регулятор тока

Универсальный контроллер согласно структурной схеме реализован в виде нескольких модулей, размещенных на монтажной панели шита ЩМП 2-0 500x400x220 и соединенных монтажными проводами. Так же на монтажной панели размещены разъемы и клеммы для подключения таких внешних устройств как электрический генератор и аккумуляторная батарея, а так же анемометр для измерения скорости ветра. Разработанный универсальный контроллер содержит три одинаковых силовых модуля по 1кВт каждый, подключенных к модулю управления и работающих параллельно. Это позволило существенно облегчить разработку и изготовление устройства, т.к. это упрощает требования к характеристикам модулей. Контроллер управления реализован на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F103, который обладает богатым набором периферийных устройств. Внешний вид контроллера ВЭУ приведен на рисунке 4.12.

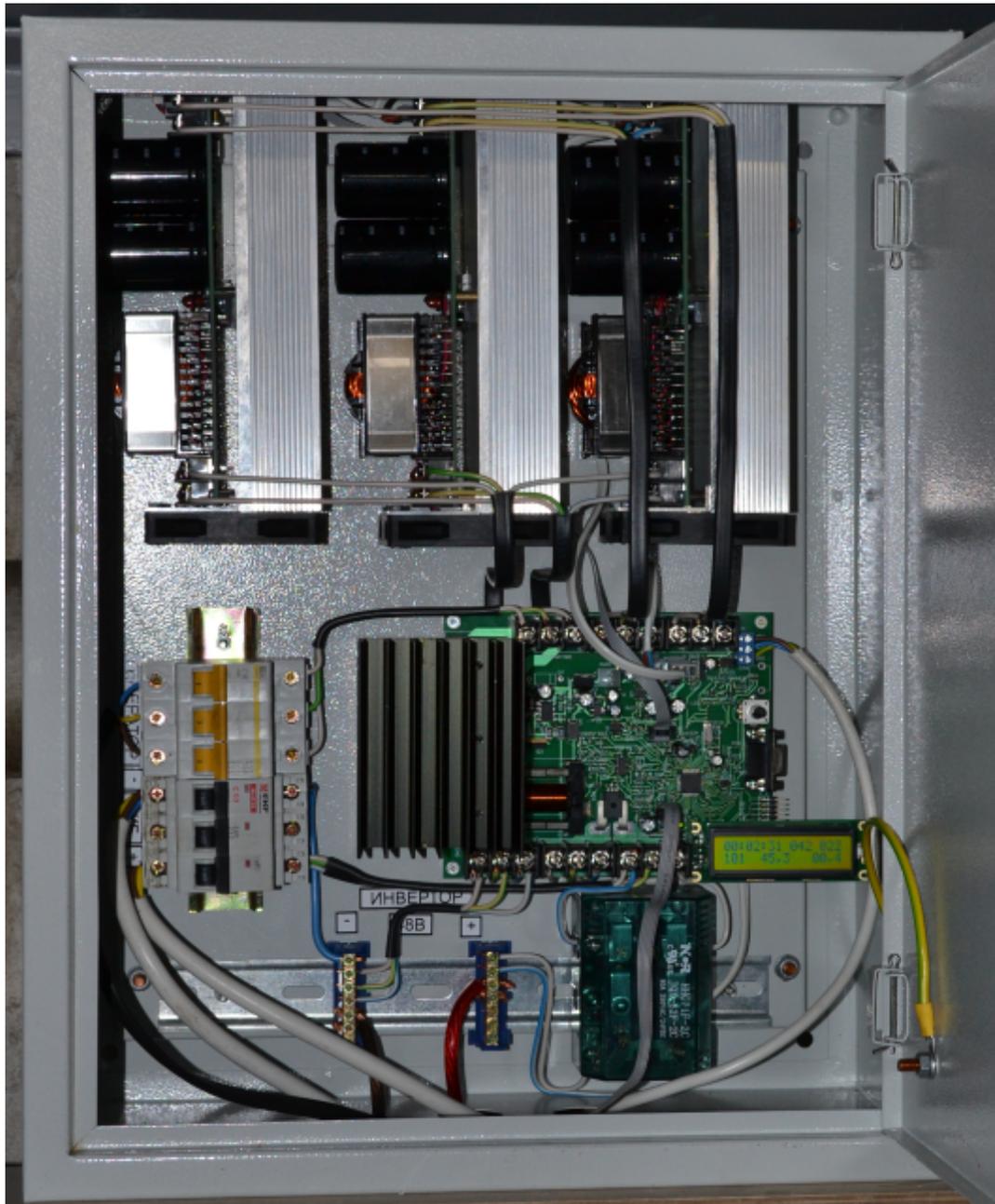


Рисунок 4.12 — Внешний вид контроллера ВЭУ

## 4.2 Разработка программы сбора данных

Все измеряемые данные в процессе работы ВЭУ передавались на персональный компьютер, который накапливал полученную информацию для последующего анализа в различные математических программах.

Для этих целей была разработано приложение (рисунок 4.13), позволяющее накапливать получаемые от контроллера ВЭУ данные, отсы-

лать накопленные данные указанному получателю через сеть Интернет, а также обеспечивать управление режимами работы контроллера с удаленного рабочего места.

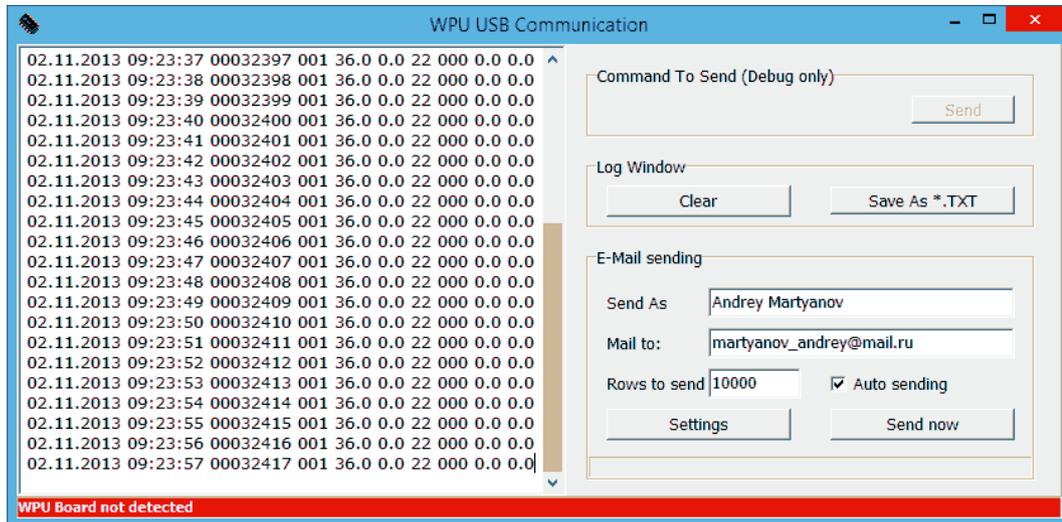


Рисунок 4.13 — Приложение для сбора данных с универсального контроллера

Для отправки сообщения на заданный адрес электронной почты необходимо иметь учетную запись на каком-либо имеющемся почтовом сервере. Данные этой учетной записи, от имени пользователя которой будет отправляться сообщение, необходимо задать в окне настроек учетной записи, рисунок 4.14.

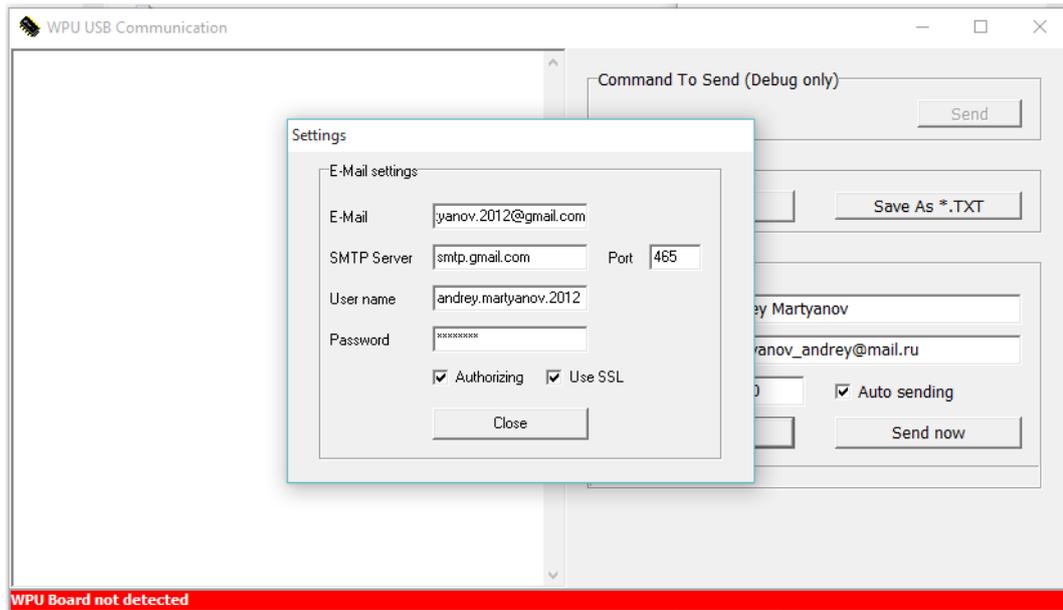


Рисунок 4.14 — Окно настроек параметров учетной записи электронной почты

Отправка сообщений может осуществляться как вручную, нажатием на кнопку «**Send now**», так и в автоматическом режиме через заданный интервал времени, с помощью установленной опции «**Auto sending**». После отправки сообщения окно содержимое окна данных архивируется в файл на жестком диске компьютера, затем окно очищается, и начинается сбор новой порции данных. Размер порции данных для архивирования и отправки по электронной почте задается с помощью опции «**Rows to send**», означающее число строк в файле данных.

### 4.3 Анализ результатов испытаний ветроэнергетической установки с универсальным контроллером

Далее приводятся результаты экспериментальных исследований ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, работающей под управлением разработанного универсального контроллера и сравнение их с ожидаемыми результатами.

Для проведения испытаний универсальный контроллер был размещен на производственной площадке предприятия ООО «Промэнерго», рисунок 4.15.



Рисунок 4.15 — Контроллер ВЭУ на испытательной площадке с подключенными АКБ и инвертором

Для того чтобы исследовать работу ветроэнергетической установки с универсальным контроллером в других ветровых условиях, дополни-

тельные испытания проводились на территории ООО «КРАСТ», рисунок 4.16.



Рисунок 4.16 — Исследуемая ВЭУ на территории ООО «КРАСТ»

Измерения проводились путем регистрации таких измеряемых параметров, как скорость ветра и генерируемая электрическая мощность.

Для сравнения выработанной электрической мощности и ожидаемой, была разработана компьютерная модель измерительной установки, рисунок 4.17.

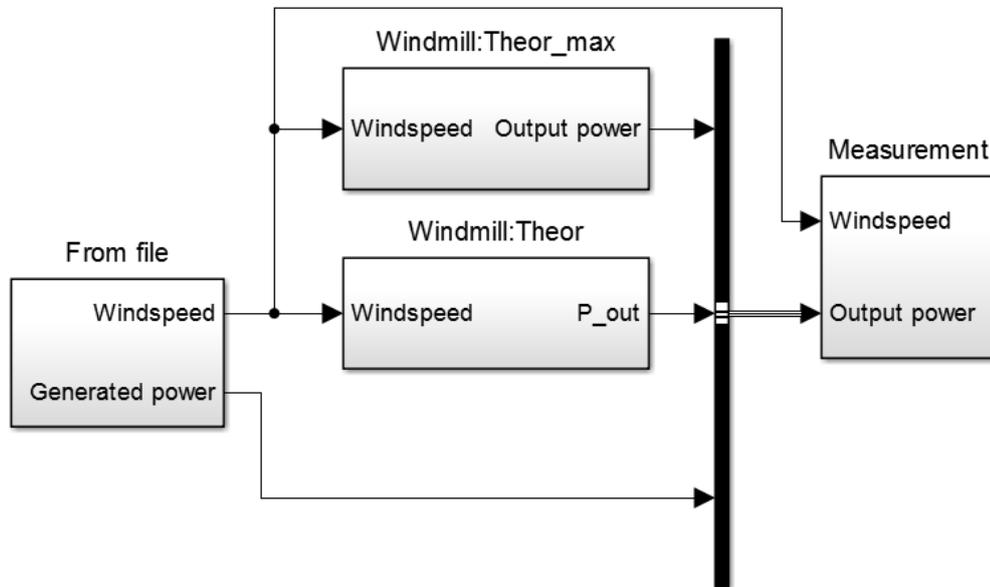


Рисунок 4.17 — Блок-схема измерительной установки

Модель содержит блок источника данных «From file», который в процессе проведения численного эксперимента считывает данные из файла, содержащего результаты измерений, и передает эти данные для последующего анализа. Два блока «Windmill:Theor\_max» и «Windmill:Theor» рассчитывают теоретические значения генерируемой электрической мощности с помощью моделей, описанных в третьей главе. Затем три рассчитанных значения направляются в блок «Measurement» для последующего сравнения. Блок схема этого модуля приведена на рисунке 4.18.

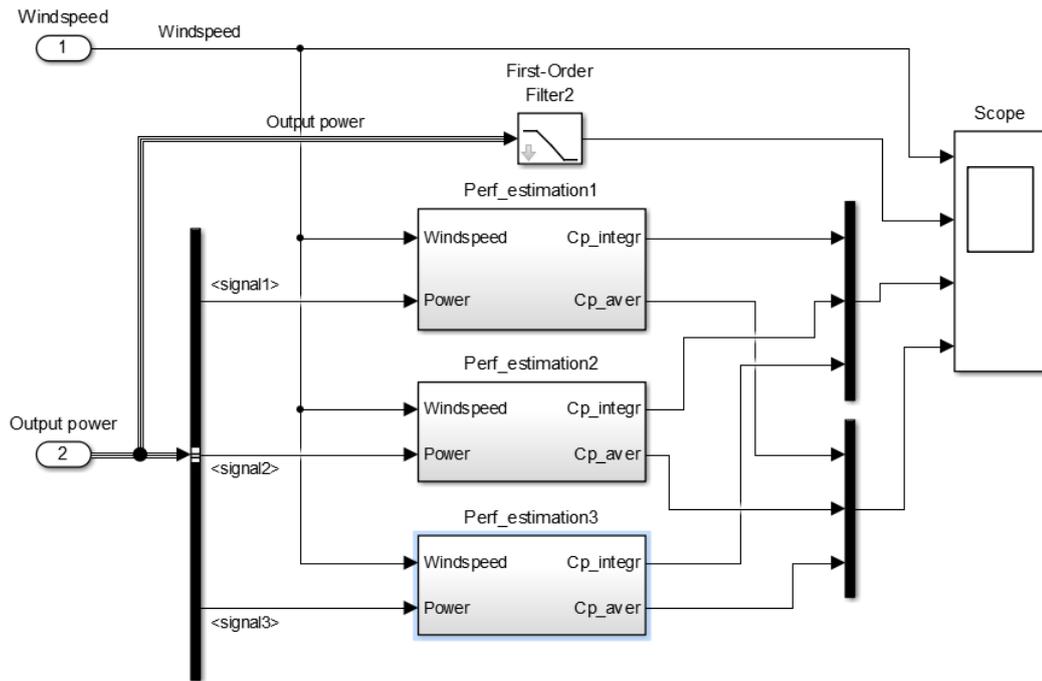


Рисунок 4.18 — Блок-схема модуля «Measurement»

Окончательные значения рассчитанных значений электрической мощности и коэффициента использования энергии ветра приведены на рисунке 4.19.

На верхнем графике рисунка 4.19 синим цветом изображена измеренная зависимость скорости ветра от времени.

На втором сверху графике рисунка 4.19 изображены: синим цветом — значения максимально-возможной мощности ветроэнергетической установки, полученные на теоретической модели; красным цветом изображены значения мощности ветроэнергетической установки, полученные на теоретической модели с учетом динамических параметров ВЭУ и алгоритма управления; зеленым цветом изображены значения мощности ветроэнергетической установки, измеренные на реальном образце в процессе проведения натурального эксперимента.

На третьем сверху графике рисунка 4.19 изображены интегральные значения коэффициента использования энергии ветра: синим цветом изображены максимально-возможные значения, полученные на теоретической модели; красным цветом изображены значения КИЭВ, полученные на теоретической модели с учетом динамических параметров ВЭУ

и алгоритма управления; зеленым цветом изображены значения КИЭВ ветроэнергетической установки, рассчитанные по результатам измерения параметров, полученных на реальном образце в процессе проведения натурного эксперимента.

На четвертом графике рисунка 4.19 изображены усредненные значения коэффициента использования энергии ветра: синим цветом изображены максимально-возможные значения, полученные на теоретической модели; красным цветом изображены значения КИЭВ, полученные на теоретической модели с учетом динамических параметров ВЭУ и алгоритма управления; зеленым цветом изображены значения КИЭВ ветроэнергетической установки, рассчитанные по результатам измерения параметров, полученных на реальном образце в процессе проведения натурного эксперимента.

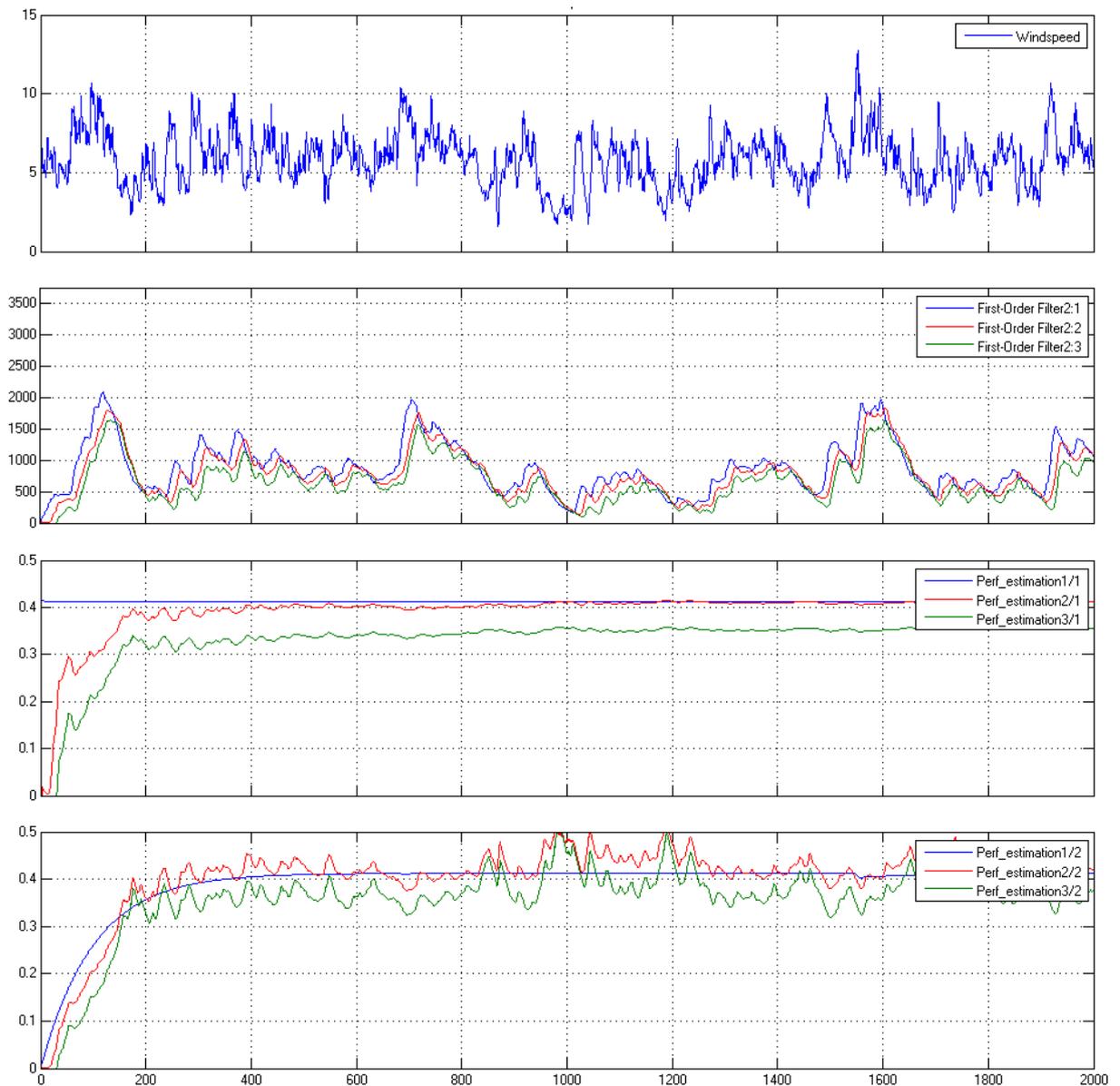


Рисунок 4.19 — Результаты измерений значений электрической мощности и коэффициента использования энергии ветра

Из графиков видно, что реальные значения, полученные при проведении натуральных экспериментов, не достигают значений, рассчитанных теоретическим путем. Это можно объяснить тем, что компьютерная модель ветроэнергетической установки не учитывает такие особенности реального изделия, как потери на аэродинамическое сопротивление некоторых элементов конструкции ветроколеса, трение в механических узлах, электрические потери в преобразователе.

В процессе исследования работы ветроэнергетической установки при изменяющейся скорости ветра была построена диаграмма распределения мгновенных значений КЭИВ ( $C_P$ ) от быстроходности  $Z$ , показанная на рисунке 4.20.

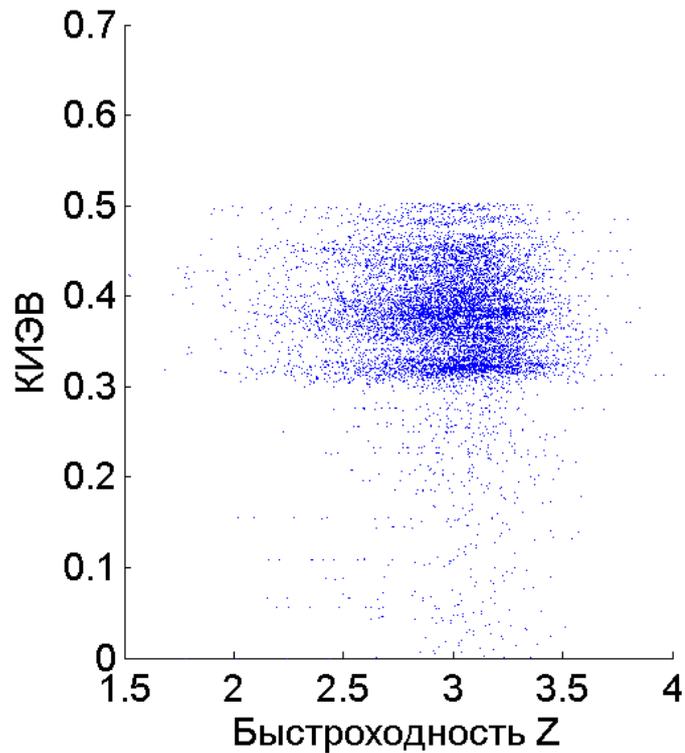


Рисунок 4.20 — Мгновенные значения КЭИВ ( $C_P$ ) от быстроходности  $Z$

Из диаграммы видно, что измеренные значения КЭИВ группируются вокруг оптимального значения, но также имеется много измеренных значений, которые демонстрируют несоответствие текущего режима работы ветроколеса оптимальному для данной скорости ветра. Наличие таких точек объясняет отклонение измеренных значений электрической мощности от теоретических, и говорит о том, что имеется потенциал для большего улучшения эффективности работы ветроэнергетической установки.

#### 4.4 Выводы по главе

В главе приведено описание разработки, изготовления и испытаний универсального контроллера ветроэнергетической установки. Основываясь на результатах исследований, изложенных в предыдущей главе, была выполнена задача по разработке и изготовлению контроллера ветроэнергетической установки, обеспечивающего работу ВЭУ по разработанному алгоритму.

Основываясь на результатах натурных испытаний, можно сформулировать следующие выводы и предложения по дальнейшему повышению эффективности ветроэнергетической установки:

- Для подтверждения результатов теоретических исследований и модельных экспериментов разработать контроллер ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, обеспечивающий регулирование быстроходности ветроколеса при изменении скорости ветра.

- Для контроллера ВЭУ было разработано соответствующее программное обеспечение, реализующее управление по разработанному алгоритму.

- Для проведения натурных испытаний универсальный контроллер был включен в состав ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения ВЭУ-3, произведенной ООО «ГРЦ-Вертикаль».

- Для измерения характеристик ВЭУ была разработана программа для персонального компьютера, позволяющая накапливать получаемые от контроллера ВЭУ данные, отсылать накопленные данные указанному получателю через сеть Интернет, а также обеспечивать управление режимами работы контроллера с удаленного рабочего места.

- Результаты натурных экспериментов показали соответствие измеренных характеристик ожидаемым значениям, что подтверждает достоверность теоретической части работы.

## Заключение

Результаты проделанной работы показали, что разработка и совершенствование способов и алгоритмов управления ветроэнергетической установкой является актуальной задачей по решению проблемы повышения производительности и снижения затрат на генерирование энергии. В диссертационной работе приведены результаты исследований по сравнению известных способов управления ветроэнергетическими установками, пригодных для ВЭУ с вертикальной осью вращения. Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования, для чего была разработана имитационная модель ветроэнергетической установки. Для исследования производительности ВЭУ в условиях изменяющейся скорости ветра была предложена методика определения КИЭВ с использованием наблюдателя пониженного порядка. На основе результатов исследования различных алгоритмов и способов управления был разработан алгоритм управления ВЭУ, обеспечивающий регулирование быстроходности ветроколеса при изменении скорости ветра без использования канала измерения скорости ветра в системе управления. Практическим результатом работы явилась разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, который успешно прошел испытания и был использован для проведения натуральных экспериментов по исследованию разработанного алгоритма. Обобщая итоги проделанной работы можно определить следующие результаты и выводы:

1. Разработана имитационная математическая модель ВЭУ с управляющим контроллером изменяемой конфигурации, отличающаяся возможностью задания алгоритмов управления на языке высокого уровня и предназначенная для исследования различных алгоритмов и способов управления ВЭУ при изменении внешних воздействий.

2. Методом компьютерного моделирования исследованы известные способы управления мощностью ветроэнергетической установки. Установлено, что способ управления мощностью путем поддержания заданной быстроходности ветроколеса обеспечивает наибольшую производительность ВЭУ в широком диапазоне скоростей ветра. По результатам

исследования имитационной модели ветроэнергетической установки разработан алгоритм адаптивного управления мощностью ВЭУ с использованием наблюдателя пониженного порядка и позволяющий обеспечить управление ВЭУ по быстроходности без использования анемометра.

3. Предложена методика измерения производительности ветроэнергетической установки, отличающаяся использованием наблюдателя пониженного порядка для определения аэродинамического момента ветроколеса, и позволяющая определять коэффициент использования энергии ветра ВЭУ при непрерывно изменяющейся скорости ветра.

4. Разработан и изготовлен контроллер ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, обеспечивающий работу ВЭУ по разработанному алгоритму с высокой производительностью в широком диапазоне скоростей ветра. Контроллер успешно прошел испытания и используется в Центре Коллективного Пользования ЮУрГУ «Ветроэнергетический комплекс». Для автоматизации измерений разработана программа дистанционного мониторинга и регистрации производительности ветроэнергетической установки. Натурные испытания ветроэнергетической установки с контроллером ВЭУ подтвердили соответствие результатов модельных экспериментов и натуральных испытаний с точностью до 5%.

### Список сокращений

- ГОСТ — Государственный Стандарт  
ВЭУ — Ветроэнергетическая установка  
ЭВМ — Электронно-вычислительная машина  
ВВЭС — Ветро-водородная энергетическая система  
ВЭС — Ветроэлектростанция  
т.у.т. — Тонна условного топлива  
ДЭС — Дизельная электростанция  
АКБ — Аккумуляторная батарея  
КПД — Коэффициент полезного действия  
КЭИВ — Коэффициент использования энергии ветра  
ЭДС — Электродвижущая сила  
ЗУ — Зарядное устройство  
SOC — Состояние заряда аккумуляторной батареи  
DOC — Глубина заряда аккумуляторной батареи  
ИМС — Интегральная микросхема  
ПТ — Полевой транзистор  
БТИЗ — Биполярный транзистор с изолированным затвором  
НЧ — Низкие частоты  
АЦП — Аналогово-цифровой преобразователь  
ЦАП — Цифро-аналоговый преобразователь  
ШИМ — Широтно-импульсная модуляция  
ЖКИ — Жидкокристаллический индикатор

## Список рисунков

1.1	Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветра .....	22
2.1	Функциональная схема имитационной модели ветроэнергетической установки .....	33
2.2	Зависимость КИЭВ $C_P$ от быстроходности $Z$ .....	37
2.3	График распределения мощности ротора в зависимости от скорости ветра и частоты вращения .....	38
2.4	Блок-схема модели генератора .....	42
2.5	Блок-схема модели соединения обмоток «звездой» .....	43
2.6	Блок-схема модели трехфазного выпрямительного моста ....	43
2.7	Напряжения на фазных обмотках и выходе выпрямителя ...	44
2.8	Результат моделирования работы генератора с трехфазным выпрямительным мостом на нагрузку .....	44
2.9	Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink .....	48
2.10	Структурная схема управляющего устройства .....	49
2.11	Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink .....	50
2.12	Эквивалентная электрическая схема модели электрохимической ячейки аккумулятора .....	53
2.13	Блок-схема компьютерной модели ячейки АКБ .....	54
2.14	Общий вид модели в пакете MATLAB/Simulink .....	60
3.1	Схема измерения КИЭВ в среде MATLAB/Simulink .....	63
3.2	Периодически изменяющаяся скорость ветра .....	64
3.3	Результаты измерения $C_P$ при воздействии периодически изменяющейся скорости ветра .....	64
3.4	Блок-схема редуцированного наблюдателя в среде MATLAB/Simulink .....	70
3.5	Результаты вычислительного эксперимента при воздействии ступенчатого изменения скорости ветра .....	71

3.6	Результаты вычислительного эксперимента при воздействии изменяющейся скорости ветра .....	72
3.7	Результаты вычислительного эксперимента по оценке качества определения КИЭВ ВЭУ .....	74
3.8	Результаты вычислительного эксперимента по оценке качества определения КИЭВ ВЭУ .....	76
3.9	Блок-схема универсальной модели для анализа различных ветроэнергетических установок .....	78
3.10	Параметры блока модели нарастающе-затухающей скорости ветра .....	79
3.11	Параметры блока модели гармонически изменяющейся скорости ветра .....	80
3.12	Модель ветроэнергетической установки, работающей при постоянной частоте вращения вала ветродвигателя .....	82
3.13	Блок-схема модели ветродвигателя ВЭУ .....	82
3.14	Блок-схема модели ветроколеса, создающего крутящий момент в ветродвигателе ВЭУ .....	83
3.15	Блок-схема модуля вычисления текущей быстроходности ветроколеса ВЭУ .....	83
3.16	Блок-схема модуля вычисления текущего крутящего момента ветродвигателя ВЭУ .....	84
3.17	Блок-схема модели генератора ВЭУ .....	85
3.18	Блок-схема модели контроллера заряда ВЭУ .....	85
3.19	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра .....	87
3.20	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра .....	88
3.21	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра .....	89
3.22	Модель ветроэнергетической установки, работающей с переключением обмоток электрического генератора .....	90
3.23	Блок-схема модели генератора ВЭУ .....	91

3.24	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра .....	93
3.25	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра .....	94
3.26	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра .....	95
3.27	Модель ветроэнергетической установки, работающей при переключении частоты вращения вала ветроколеса с помощью коробки передач .....	96
3.28	Блок-схема модуля коробки передач.....	97
3.29	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра .....	99
3.30	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра .....	100
3.31	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра .....	101
3.32	Модель ветроэнергетической установки, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя .....	102
3.33	Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя .....	103
3.34	Блок-схема модели контроллера заряда ВЭУ, работающей при переменной частоте вращения вала ветродвигателя .....	104
3.35	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии нарастающе-затухающего воздействия скорости ветра .....	105
3.36	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии гармонически изменяющейся скорости ветра .....	106
3.37	Результат моделирования работы ВЭУ при воздействии реальной скорости ветра .....	107
3.38	Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ нарастающе-затухающим воздействием скорости ветра .....	109

3.39	Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ гармонически изменяющимся воздействием скорости ветра .....	110
3.40	Результаты сводного тестирования моделей ВЭУ воздействием реальной скорости ветра .....	111
3.41	Функциональная схема системы адаптивного регулирования мощности ветроэнергетической установки .....	114
3.42	Блок-схема алгоритма адаптивного управления .....	115
4.1	Структурная схема контроллера ВЭУ .....	118
4.2	Укрупненная электрическая схема контроллера ВЭУ .....	118
4.3	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, трехфазный выпрямитель и преобразователь уровней для АЦП .....	120
4.4	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, подключение датчиков тока и напряжения АКБ .....	122
4.5	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, схема управления нагрузкой .....	123
4.6	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, преобразователь RS-232 интерфейса .....	124
4.7	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, схема USB интерфейса .....	125
4.8	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, преобразователь RS-485 интерфейса .....	126
4.9	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, управляющий микроконтроллер с обвязкой .....	129
4.10	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, вторичный источник питания .....	130
4.11	Схема электрическая принципиальная контроллера ВЭУ, регулятор тока .....	130
4.12	Внешний вид контроллера ВЭУ .....	132
4.13	Приложение для сбора данных с универсального контроллера	133

4.14	Окно настроек параметров учетной записи электронной почты .....	134
4.15	Контроллер ВЭУ на испытательной площадке с подключенными АКБ и инвертором.....	135
4.16	Исследуемая ВЭУ на территории ООО «КРАСТ».....	136
4.17	Блок-схема измерительной установки .....	137
4.18	Блок-схема модуля «Measurement» .....	138
4.19	Результаты измерений значений электрической мощности и коэффициента использования энергии ветра .....	140
4.20	Мгновенные значения КЭИВ ( $C_P$ ) от быстроходности $Z$ ....	141
A.1	Схема электрическая принципиальная модуля управления, лист 1 из 2 .....	170
A.2	Схема электрическая принципиальная модуля управления, лист 2 из 2 .....	171
A.3	Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 1 из 3 .....	172
A.4	Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 2 из 3 .....	173
A.5	Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 3 из 3 .....	174

**Список таблиц**

2.1	Параметры емкости аккумуляторной батареи .....	58
2.2	Конечные значения параметров для математической модели аккумуляторной батареи .....	59
4.1	Технические характеристики индикатора WH1602D .....	128

**Список литературы**

1. Akhmatov, V. Advanced simulation of windmills in the electric power supply / V. Akhmatov // Electrical power and energy systems. 2000. — № 22. — P. 421-434.
2. Anderson M. B. An analysis of the aerodynamic forces on a variable geometry vertical axis wind turbine // Wind energy conversion 1983: Proc. of the 5th BWEA Wind Energy Conf. 1983. P. 27-29.
3. *Anikin A. S., Martyanov A. S., Martyanov N. A.* Comparative analysis of wind turbines control strategies // Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). — 2015. — С. 607—614.
4. AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard AWEA 9.1 – 2009, AWEA, 2009.
5. Bao, N.Sh. Modelling and Identification of a Wind Turbine System / N.Sh. Bao, Q.X. Chen, T. Jiang // Wind Engineering,- Vol. 20. -№ 4. 1990. — P 203 -218.
6. Budisan, N. ; Groza, V. ; Prostean, O. ; Filip, I. Rotation Speed and Wind Speed Indirect Measurement Methods for the Control of Windmills with Fixed Blades Turbine // Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008, p.912 – 916.
7. Carlin P.W. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology/ P.W. Carlin, S. Laxson, E.B. Muljadi // Technical Report NREL/TP-500-28607, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A. –2001.
8. Datta R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system/ R. Datta, V.T. Ranganathan // IEEE Transactions on Energy Conversion.– 2003. – № 18(1). – p. 163–168.

9. Dawson M. H. Variable Length Wind Turbine Blade/ Dawson M. H., Lisa Barnet, Gibson Asuquo, Deborah Weems, Michael Schledorn, Marcus Farmer: Final Report DE-FG36-03GO13171. – 2006. – p.47.
10. Jerome Matthew Hendler. Windmill Tip-Speed Ratio Regulation Using an Impedance-Matching Control System // Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 1982, 286 p.
11. Jianzhong Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines/ Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6–9 April, 2008.
12. *Kirpichnikova I. M., Martyanov A. S., Solomin E. V.* VERTICAL AXIS WIND TURBINES. NEW ASPECTS // *Альтернативная энергетика и экология*. – М.: НИИЭС. – 2013. – 1-2(118). – С. 55–58.
13. *Korobatov D. V., Martyanov A. S., Solomin E. V.* Development of control algorithms in Matlab/Simulink // *Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*. – 2015. – С. 922–926.
14. Lee D.C. DC-bus voltage control of three-phase AC/DC PWM converters using feedback linearization/ D.C. Lee, G.M. Lee, K.D. Lee // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2000. – №36(3). – p.826 – 833.
15. Leithead W.E. Dependence of performance of variable speed wind turbines on the turbulence, dynamics and control/ W.E. Leithead // *IEE Proceedings* 137(6). – 1990. – p.403–413.
16. Maksimovic D., Stankovi'c A., Thottuvelil V., "Modeling and simulation of power electronic converters,"*Proc. IEEE*, vol. 89, pp. 898-912, 2001.

17. *Martyanov A. S., Sirotkin E. A., Solomin E. V.* Adaptive control over the permanent characteristics of a wind turbine // *Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*. — 2015. — С. 640—646.
18. *Martyanov A. S., Solomin E. V.* Issues of windmill efficiency measurement in the field // *Вопросы трансформации образования*. — 2015. — С. 17—23.
19. *Martyanov A., Solomin E.* Modelling of Wind Turbine Performance Measurement // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. — 2014. — № 2. — С. 18—25.
20. Novak P. Modelling, identification and control of a variable speed HAWT/ P. Novak, T. Ekelund // *In Proceedings of the European Wind Energy Conference – EWEC '94*. – 1994. – p. 441–446.
21. Scott J. Johnson Active Load Control Techniques for Wind Turbines/ Scott J. Johnson, C.P. Case van Dam, Dale E. Berg // *Sandia report, Sandia National Laboratories, Sandia Contract No. 360473, August 2008*. – p. 1 – 124.
22. *Solomin E. V., Kirpichnikova I. M., Martyanov A. S.* Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines // *Applied Mechanics and Materials. Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering Collection of selected, peer reviewed papers from the International Conference for Young Scientists “ELECTRICAL ENGINEERING. ELECTROTECHNOLOGY. ENERGY”*, June 9-12. — 2015. — С. 92—95.
23. Torres E. Experimental results of the variable speed, direct drive multipole synchronous wind turbine/ E.Torres, M.Garcia-Sanz // *TWT1650, Wind Energy 7*. – 2004. – p.109–118.
24. *Windpower in electricity system. Danish Experiences Association of Danish Windmill Manufacturers. 1987. 11 p.*

25. Адрианов В. Н., Быстрицкий Д. Н., Вашкевич К. П., Секторов В. Р. Ветроэлектрические станции. — М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 320 с.
26. Адрианов, В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Адрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич, В.Р. Секторов. М. : Госэнергоиздат, 1960. 320 с.
27. Андрианов, В.Н., Ветроэлектрические станции / В.Н.Андрианов, Д.Н.Быстрицкий, К.П.Вашкевич, В.Р. Секторов В.Р. / под общей редакцией Андрианова В.Н. — М.: ГЭИ, 1960. — С. 1–11.
28. *Аникин А. С., Мартьянов А. С.* Математическая модель литий-железо-фосфатной аккумуляторной ячейки и батареи на ее основе // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 1152—1156.
29. *Аникин А. С., Мартьянов А. С.* Моделирование цифровых систем управления в среде MATLAB/SIMULINK // Сборник статей 89-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобилестроение России: новые вызовы», Москва. — 2015.
30. Балагуров В.А., Галатеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. — 324 с.
31. Безруких, П.П. Использование энергии ветра / П.П. Безруких.— М.: Колос, 2008. —С. 9–158.
32. Безруких, П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков // Малая энергетика. — М.: НИИЭС, 2005. — №1–2(2–3). — С.6–12.
33. Белей, В.Ф. Анализ технических характеристик ВЭУ ведущих фирм мира / В.Ф. Белей, А.Ю. Никишин // Международная научная конференция «Инновации в науке и образовании -2006»: сб. докл. / КГТУ. Калининград: Изд-во КГТУ, 2006.

34. Белей, В.Ф. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и некоторые пути их решения / В.Ф. Белей, А.Ю. Никишин // Электрика. 2006. — № 8. — С. 19-22.
35. Блоцкий Н. Н., Пиковский А. В., Плотникова Т. В., Титова М. В., Шакарян Ю. Г., Плахтына Е. Г. Система автоматического регулирования ветроэнергетической установки с вентильным электрогенератором // Электричество. 1991. — №4. — С. 11-16.
36. Бойко Ю. В., Бункин П. Я., Филаретов В. Ф. Создание ветроэнергетических установок малой мощности // Нетрадиционная энергетика и технология. Материалы международной конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1995. С. 60.
37. Ваулин С. Д., Ганджа С. А., Мартьянов А. С. Электрический генератор для газотурбинной установки // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2014. — 19(159). — С. 35—41.
38. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев Ставропольский государственный аграрный университет. — Ставрополь АГРУС, 2008 — С. 152.
39. Ганджа, С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок / С.А.Ганджа // Альтернативная энергетика и экология. — М:НИИЭС. — 2010 — №1. — С.25–28.
40. Ганджа С. А., Мартьянов А. С. Методика инженерного расчета вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. — 2013. — № 13. — С. 85—87.
41. Ганджа С. А., Мартьянов А. С. Методика ускоренного расчета синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком //

- Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС. – 2014. – № 5. – С. 42–44.
42. Ганджа С. А., Мартьянов А. С. Определение оптимальных габаритных размеров для вентиляционных машин с аксиальным магнитноустановки (ВМАП) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2013. – № 13. – С. 88–90.
  43. Грахов, Ю.В. Программно–математическая модель ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Ю.В. Грахов., И.М. Кирпичникова, Е.В.Соломин // Материалы V Международной научно–практической конференции «Возобновляемые источники энергии. Ресурсы. Системы энергогенерирования на возобновляемых источниках энергии. – М., 2008. – 49 с.
  44. Гультяев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. СПб.: КРОНА – принт, 1999. – 228 с.
  45. Денисенко О. Г., Козловский Г. А. Преобразование и использование ветровой энергии. К.: Техника, 1992. – 176 с.
  46. Дмитриева Г. А., Макаровский С. И., Хвощинская З. Г. Анализ работы неуправляемой ветроэлектрической установки в автономной энергосистеме // Электричество. 1998. – №6. – С. 12-18.
  47. Дмитриева Г.А. Анализ работы неуправляемой ВЭУ в автономной системе // Электричество, 1998. № 6. – С. 16-23.
  48. Дорошенко Н. И., Доржинкевич И. Б., Романов В. В., Харитонов В. П. Система управления возбуждением генератора ветроэнергетической установки малой мощности // Ветроэнергетика: Труды ВНИИЭ. Том 34. -М.: ВНИИЭ, 1970. С. 115-120.
  49. Дьяков А.Ф. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития / Дьяков А.Ф., Перминов Э.М., Шакарян Ю.Г. – М.: Издательство МЭИ, 1996. – 219 с.

50. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики. М.: Нолидж, 1999. — 328 с.
51. Дьяконов, В.П. Matlab 6. Учебный курс / В.П. Дьяконов. СПб., 2001. — 592 с.
52. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. Под ред. Л. А. Жукова. — М.: Энергия, 1979. 456 с.
53. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. 4-е изд. сокр. и перераб. — Д.: Энергоатомиздат, 1984. — 408 с.
54. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 176 с.
55. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 496 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. СС1, заключительный).
56. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Учеб. Пособие. Изд 2-е, испр. И доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 664 с.
57. Зубова Н. В. Optimization Of Energy Generation Of Wind Turbine In Region 2 Through Fuzzy Control / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES (IFOST 2009), October 21 – 23, HoChiMinh City, Vietnam, 2009. – Session 4. – p. 110 –114.
58. Зубова Н. В. Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н. В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». — Томск: Изд-во ТПУ, 17–18 мая 2012 г., с.16–19.

59. Зубова Н. В. Нечеткое управление ветротурбинами с изменяемой геометрией лопасти / С. Н. Удалов, В. З. Манусов, Н. В. Зубова, А. А. Ачитаев // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности, (REENFOR-2013): материалы 1 междунар. форума, Москва, 22 – 23 окт. 2013 г. – Москва: Рос. академия наук, 2013. – с.364 – 368.
60. Зубова Н. В. Основные принципы управления ветроэнергетической установкой / С. Н. Удалов, Н. В. Зубова // Научный вестник НГТУ.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, №3(48), 2012 г. – с.153–161.
61. Зубова Н. В. Разработка и проверка адекватности нечеткого контроллера для ВЭУ с изменяемым радиусом ветроколеса / Н. В. Зубова // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2–4 дек. 2011 г. : в 6 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – с. 204–206.
62. Зубова Н. В. Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера / В. З. Манусов, Н. В. Зубова, С. Н. Удалов // Научный вестник НГТУ, Новосибирск, Издательство НГТУ, 2010. – №1(38). – с. 159 – 163.
63. Иванов, И.И. Модельные исследования роторных рабочих колес ветро-энергетических станций / И.И. Иванов, Г.А. Иванова, О.Л. Перфилов // Сб. науч. тр. Гидропроекта. – 1988. – Вып. 129. – С. 106–113.
64. Историк, Б.Л. Исследование характеристик вертикальной ветроэнергетической установки с аэродинамическим регулированием / Б.Л. Историк, Ю.Б. Шполянский Ю.Б. // Энергетическое строительство. – 1991. – №3. – С. 37–39.
65. *Киндряшов А. Н., Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИ-ЭС. – 2013. – 1-2. – С. 59–62.

66. *Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С.* О преобразовании энергии в ветроэнергетических установках малой мощности // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2009. – № 2. – С. 304.
67. *Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Моделирование генератора ветроэнергетической установки // Электротехника. – М.: – 2013. – № 10. – С. 46–49.
68. *Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Преобразование энергии в ветроэнергетических установках // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС. – 2010. – № 1. – С. 93–97.
69. Ковалев О. П., Кукушкин И. Н. Стабилизация частоты вращения исполнительного механизма установки // Автономная и нетрадиционная энергетика. Материалы российской конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1998. С. 24-25.
70. Козлитин Л. С., Кацурин А. А. Разработка системы управления ветроэнергетической установкой // Электротехника. Сб. тезисов докладов научно-технической конференции: Вологдинские чтения. Владивосток: ДВГТУ, 1998.-С. 14-15.
71. Копылов И.П. Математическое моделирования электрических машин. Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. И доп. — М.: Высш. Шк., 2001. — 327 с.
72. Костырев М.Л, Скороспешкин А.И. Автономные генераторы с вентильным возбуждением. М.: Энергоатомиздат, 1993. 212 с.
73. Костюков И. Ю. Некоторые аспекты создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Нетрадиционная энергетика и технология. Материалы международной конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1995.-С. 54.

74. Красовский А. А. Оптимизационный подход в теории управления. Часть I // Современная прикладная теория управления / Под ред. А. А. Колесникова. — Таганрог: ТРТУ, 2000. — 400 с.
75. Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1973.-375 с.
76. Кухарцев, В.В. Совершенствование параметрических характеристик энергоэффективных и экологически безопасных систем комплексного теплоэнергоснабжения автономных потребителей на базе ветроустановок / В.В. Кухарцев. – М., 2005. – 213 с.
77. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. — 512 с.
78. Лятхер, В.М. Развитие ветроэнергетики / В.М. Лятхер // Малая энергетика. – 2006. – №1–2 (4–5). – С. 18–38.
79. Манусов В. З. Анализ функционирования нечеткого регулятора мощности ВЭУ на границе II и III зон работы / В. З. Манусов, Э. Г. Ядагаев // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – с.141–142.
80. Мартынов Н.Н., Иванов А.П. MATLAB 5.x: Вычисления, визуализация, программирование. М.: КУДИЦ- ОБРАЗ, 2000. 265 с.
81. *Мартьянов А. С.* Генератор для газотурбинной энергетической установки // Eastern European Scientific Journal. — 2014. — № 5. — С. 199—203.
82. *Мартьянов А. С.* Исследование транзисторного ключа импульсного преобразователя // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 1157—1164.

83. *Мартьянов А. С.* Моделирование алгоритмов заряда аккумуляторной батареи // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 1165—1171.
84. *Мартьянов А. С.* Моделирование измерения характеристик ВЭУ в реальных погодных условиях // НАУКА ЮУрГУ: Материалы 66-й научной конференции (Электронный ресурс). Ответственный за выпуск: Ваулин С.Д. — 2014. — С. 1354—1361.
85. *Мартьянов А. С.* Моделирование потребления электроэнергии // В сборнике: Наука. Южно-Уральский государственный университет материалы 65-ой Научной конференции. — 2013. — С. 174—177.
86. *Мартьянов А. С.* Регулирование мощности в ветроэнергетической установке // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2011. — Т. 2. — С. 206—209.
87. *Мартьянов А. С.* Решение задач оптимизации в ANSYS MAXWELL // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 67-ой научной конференции. Секция технических наук. — 2015. — С. 24—28.
88. *Мартьянов А. С.* Система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 10. — Материалы VIII Международного симпозиума. — М.:РАН. — 2013. — С. 21.
89. *Мартьянов А. С.* Управление мощностью ветроэнергетической установки // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й научной конференции. Секция технических наук. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2011. — Т. 3. — С. 202.

90. *Мартьянов А. С., Неустроев Н. И.* ANSYS MAXWELL для электромагнитных расчетов // Eastern European Scientific Journal. — 2014. — № 5. — С. 203—207.
91. *Мартьянов А. С., Неустроев Н. И.* Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2014. — 19(159). — С. 47—52.
92. *Мартьянов А. С., Пронин Н. В.* Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете MATLAB // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. — 2012. — 37(296). — С. 143—145.
93. *Мартьянов А. С., Пронин Н. В., Соломин Е. В.* Разработка математической модели ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ-Вертикаль» в пакете Matlab // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2011. — № 5. — С. 41—43.
94. *Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Контроллер заряда АКБ ветроэнергетической установки // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секция технических наук. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2010. — № 3. — С. 278.
95. *Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Контроллер заряда ветроэнергетической установки // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2010. — № 1. — С. 106—109.
96. *Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Система освещения, основанная на ветроэнергетической установке // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2010. — № 1. — С. 101—105.
97. *Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Система отопления на основе ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора // Альтернативная энергетика и экология. — М.: НИИЭС. — 2011. — № 2. — С. 30—33.

98. *Мартьянов А. С., Соломин Е. В.* Эффективность автономного электроснабжения фермерского хозяйства // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – М. – 2011. – № 9. – С. 29–30.
99. *Матвеевко О.В.* Комплексная программно-математическая модель ветроэнергетической установки / *О.В. Матвеевко* // *Альтернативная энергетика и экология*. – М.: НИИЭС, 2010 – №5(85). – С.64–70.
100. *Математическое моделирование: Методы, описания и исследования сложных систем* / Под ред. А.А. Самарского. -М.: Наука, 1989. - 271 с.
101. *Мирошник И. В.* Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
102. *Николаев, В.Г.,* Современное состояние и тенденции развития мировой ветроэнергетики / *В.Г. Николаев, С.В. Ганага* // *Малая энергетика*. 2006. -№1-2.
103. *Обухов С.Г.* Моделирование продольной составляющей скорости ветра/ *С.Г.Обухов, Е.Ж. Саркисеев* // *Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции*. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – с. 74–75.
104. *Панкратов В.М.* Регулирующее устройство для вертикальных ветродвигателей с поворотными лопастями. Авт. свид. СССР, 1938. Опубл. 31.10.40.
105. Патент 110825, Российская Федерация. Комбинированная система теплоснабжения на возобновляемом источнике энергии / *И. М. Кирпичникова [и др.]*. — № 2011107463/28 ; опубл. 25.02.2011, Бюл. №33. — 4 с.

106. Патент 110825, Российская Федерация. Комбинированная система теплоснабжения на возобновляемом источнике энергии / И. Кирпичникова [и др.]. — № 2011107463 ; заявл. 25.02.2011 ; опубл. 27.11.2011, Бюл. №33. — 2 с. : ил.
107. Патент 2347104 Российская Федерация, МПК F03D 3/06 (2006.1). Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения / Ю.В.Грахов, Е.В.Соломин и др. — № 2006117014/06; заявл. 12.05.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. — 12с.
108. Патент 2443902 Российская Федерация, МПК F03D3/06 (2006.01). Ветроколесо ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения / Ю.В.Грахов, Е.В.Соломин и др. — № 2010121692/06; заявл. 27.05.2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 3. — 3с.
109. Патент 2472987, Российская Федерация. Виброгаситель мачты ветряной установки / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин. — № 2008128666/11 ; заявл. 14.07.2008 ; опубл. 20.01.2013, Бюл. №2. — 7 с. : ил.
110. Патент 87767, Российская Федерация. Амортизатор растяжки ветряной установки / И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин. — № 2008138451/22 ; заявл. 26.09.2008 ; опубл. 20.10.2009, Бюл. №29. — 2 с. : ил.
111. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. — М.: Наука, 1986. — 615 с.
112. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1979. — 256 с.
113. Принципы построения систем регулирования электроприводов с двигателями переменного тока. / И.Л. Локтева, Г.Б. Онищенко, Т.В. Плотникова, Ю.Г. Шакарян // Электричество. 1978. №5. — С. 19-22.

114. Птицын О.В., Григораш О.В. Генераторы переменного тока. Состояние и перспектива // Электротехника, 1994. — № 9. — С. 2-6.
115. Радин В. И., Загорский А. Е., Шакарян Ю. Г. Управляемые электрические генераторы при переменной частоте М.: Энергия, 1978. -152 с.
116. Рензо, Д. Ветроэнергетика / под ред. Я.И.Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – С. 4–35.
117. Роль возобновляемых источников энергии в энергетической стратегии России. // Материалы конференции «Бизнес и инвестиции в России», Москва, 2000. 157 с.
118. Сабинин, Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г.Х. Сабинин // Сборник ВСНХ СССР «Труды научно–исследовательских институтов промышленности». – № 482. – Вып. 104. Тема – Проблема использования энергии ветра. – М.; Л.: ОГИЗ, Гос. Науч.–техн. изд–во, 1931. – 70 с.
119. Самородов Г.И., Хорошев Н.И. О системе замещения синхронного генератора при расчетах электромагнитных переходных процессов. — Тр. СибНИИЭ, 1976. вып. 31. 127 с.
120. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015616930, Российская Федерация. Расчет динамической модели аккумуляторной батареи / А. С. Аникин [и др.]. — № 2015613646 ; заявл. 30.04.2015 ; опубл. 25.06.2015.
121. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015616945, Программа для управления зарядного устройства в режиме инвертора / А. С. Аникин [и др.]. — № 2015613622 ; заявл. 30.04.2015 ; опубл. 26.06.2015.
122. Секрет производства (ноу–хау) «Способ регулирования отбора мощности генератора ветроэнергетической установки» // И. М. Кирпичникова, А. С. Мартьянов, Е. В. Соломин. — При-

каз № 60 от 18.02.2011 г. — ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

123. Семенов В.В. Анализ режимов работы энергетических систем в пакете MATLAB.
124. Сергеев В. Д., Кулешов Е. В. Синхронный генератор с постоянными магнитами для ветроэлектрической установки // Автономная и нетрадиционная энергетика. Материалы российской конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1998. С. 26-27.
125. Сидоров, В.В. Ветроэнергетические установки и системы / В.В. Сидоров. – М.: Внешторгиздат, 1990. – 3 с.
126. Сипайлов Г.А. и др. Электрические машины (специальный курс): Учеб. Для вузов по спец. «Электрические машины» / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1987. — 287 с.
127. *Соломин Е. В., Кирпичникова И. М., Мартьянов А. С.* Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // В сборнике: Электротехника. Электротехнология. Энергетика сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск. — 2015. — С. 92—95.
128. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т. // Под общей ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. — М.: Энергоатомиздат. 1989.-456 с.
129. Стабилизация частоты вращения генератора ветроустановки / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев, П.В. Коноплев // Механизация и электрификация сельского хозяйства № 5 2012 - С. 24-25.

130. Твайдел, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж.Твайделл, А.Уэйр / Пер. с англ. под ред. Коробкова В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 195–242.
131. Толмачев В.Н., Орлов А.В., Булат В.А. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения. – СПб: ВИТУ, 2002. – 203 с.
132. Турян, К.Дж. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения / К.Дж. Турян, Дж.Х. Стрикленд, Д.Э. Берг // Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 8. – С. 105–121.
133. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. Государственное издательство сельско-хозяйственной литературы. Москва, 1957. 532 с.
134. Фатеев, Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М.Фатеев. М.: Сельхозгиз, 1948. — 546 с.
135. Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Разработка системы автоматической стабилизации параметров выходного напряжения автономной ветроэнергетической установки // Электричество. 2001. — № 7.-С. 37-42.
136. Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Система управления генератором ветроэнергетической установки // Сб. трудов Дальневосточного отделения Российской инженерной академии. Вып. 3. — Владивосток: ДВГТУ, 2000. С. 28-41.
137. Фортов, В.Е. Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. – Долгопрудный: Изд.дом «Интеллект», 2011. — С. 140–141.
138. Шапиро Л. Я., Засеев С. Г. Синхронный генератор ветроэнергетической установки с управляемым преобразователем в цепи статора // Возобновляемые источники энергии: Сб. науч. трудов. № 233. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1990. С. 153-1157.

139. Шефтер Я.И. Ветроэнергетические агрегаты. М.: Машиностроение, 1972. — 288 с.
140. Шефтер, Я.И. Изобретателю о ветрогенераторах и ветроустановках / Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. — М., 1957. — 146 с.
141. Шефтер, Я.И. Использование энергии ветра / Я.И. Шефтер. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 199 с.
142. Щербаков И. Ф. Ветроэнергетическая установка с вертикальным ротором и поворотными лопастями // Нетрадиционная энергетика и технология. Материалы международной конференции. Ч. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1995.-С. 57.
143. Яковлев, А.И. Расчет ВЭУ с вертикальной осью вращения. Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная. — Учеб. пособие по курсовому проектированию. — Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. инс.», 2002 г. — 61 с.
144. Янсон, Р.А. Ветроустановки: учебное пособие / Р.А. Янсон. — М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2007. — 36 с.

## Приложение А Схемы электрические принципиальные контроллера ВЭУ

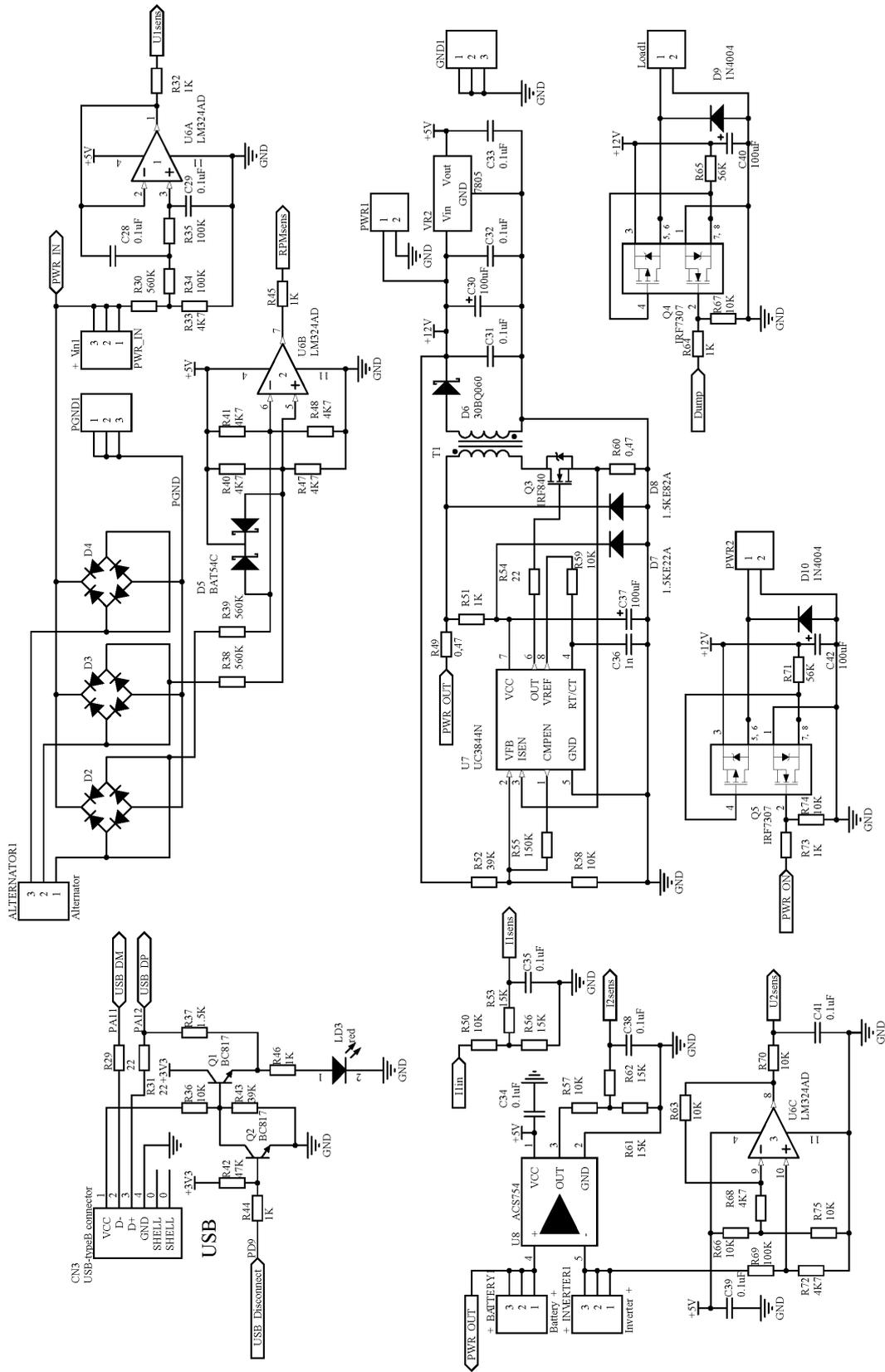


Рисунок А.1 — Схема электрическая принципиальная модуля управления, лист 1 из 2

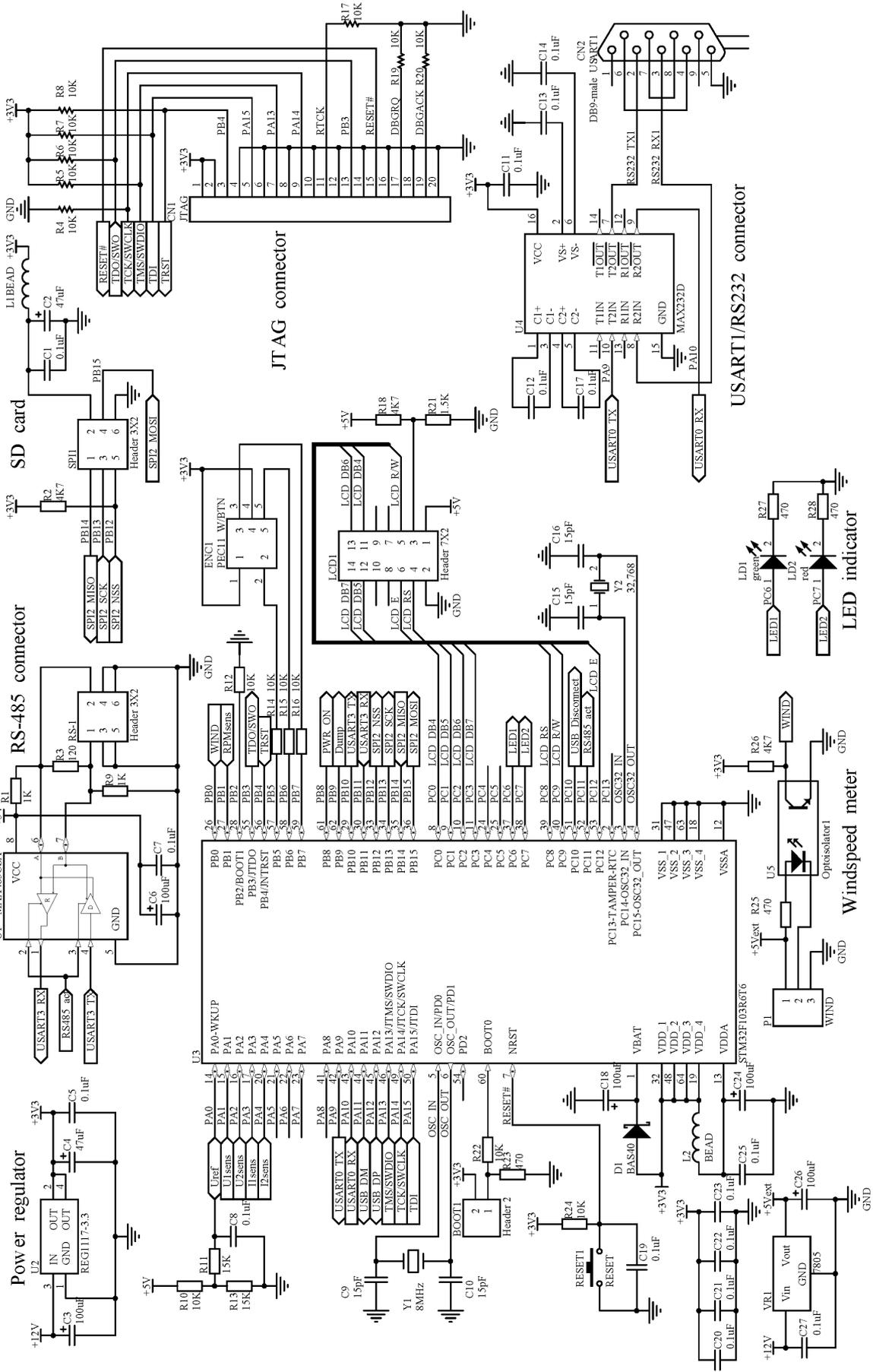


Рисунок А.2 — Схема электрическая принципиальная модуля управления, лист 2 из 2

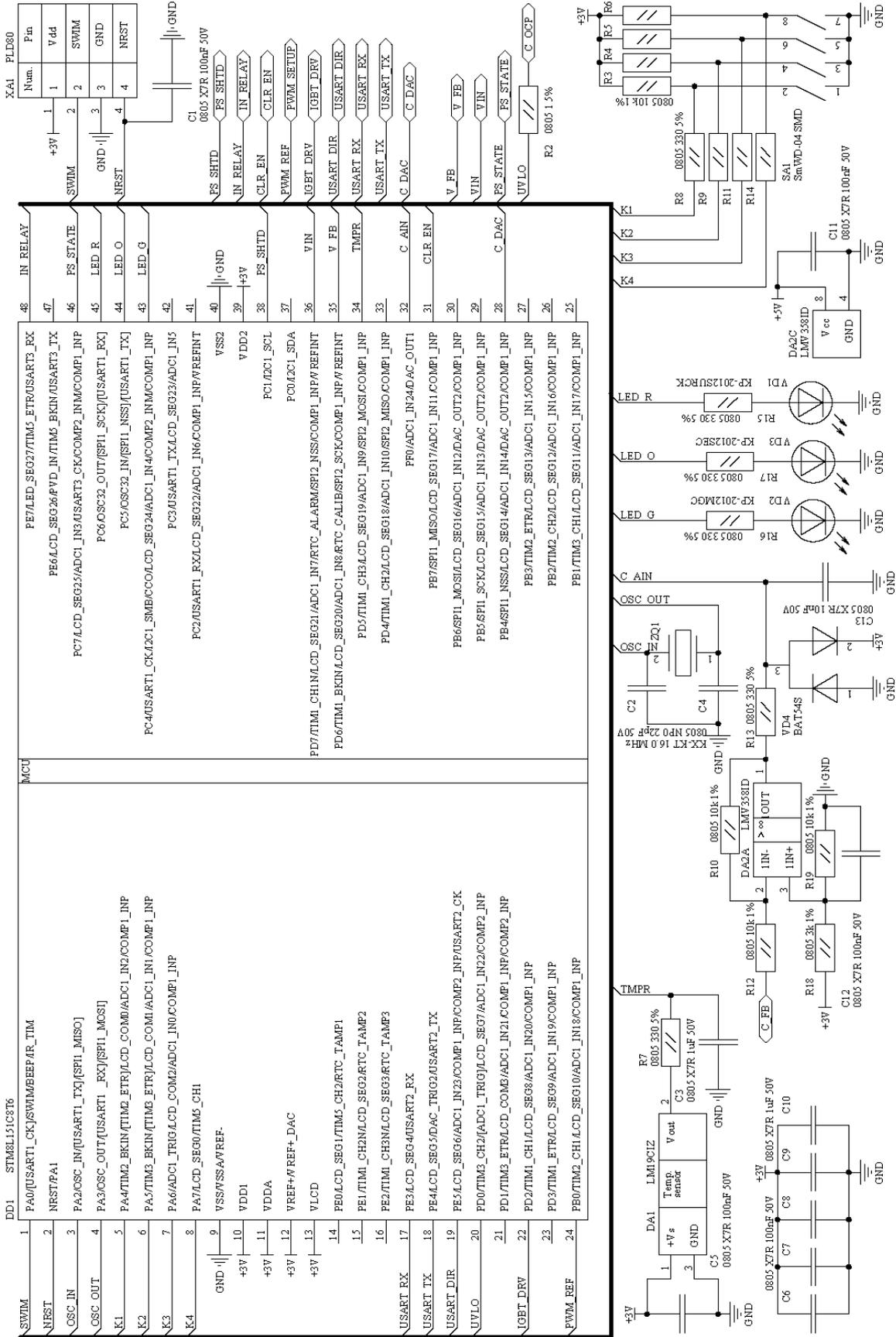


Рисунок А.3 — Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 1 из 3

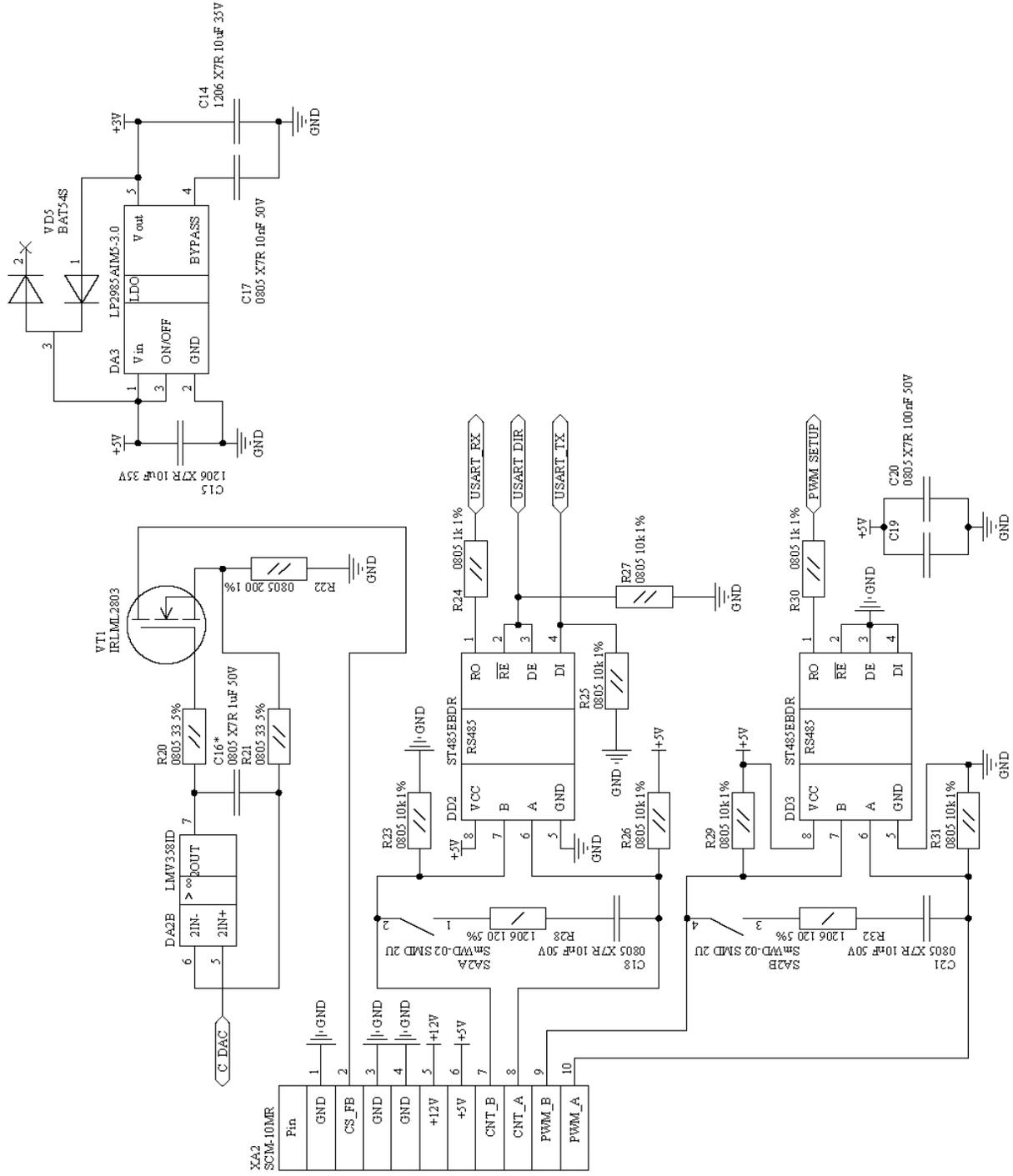


Рисунок А.4 — Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 2 из 3

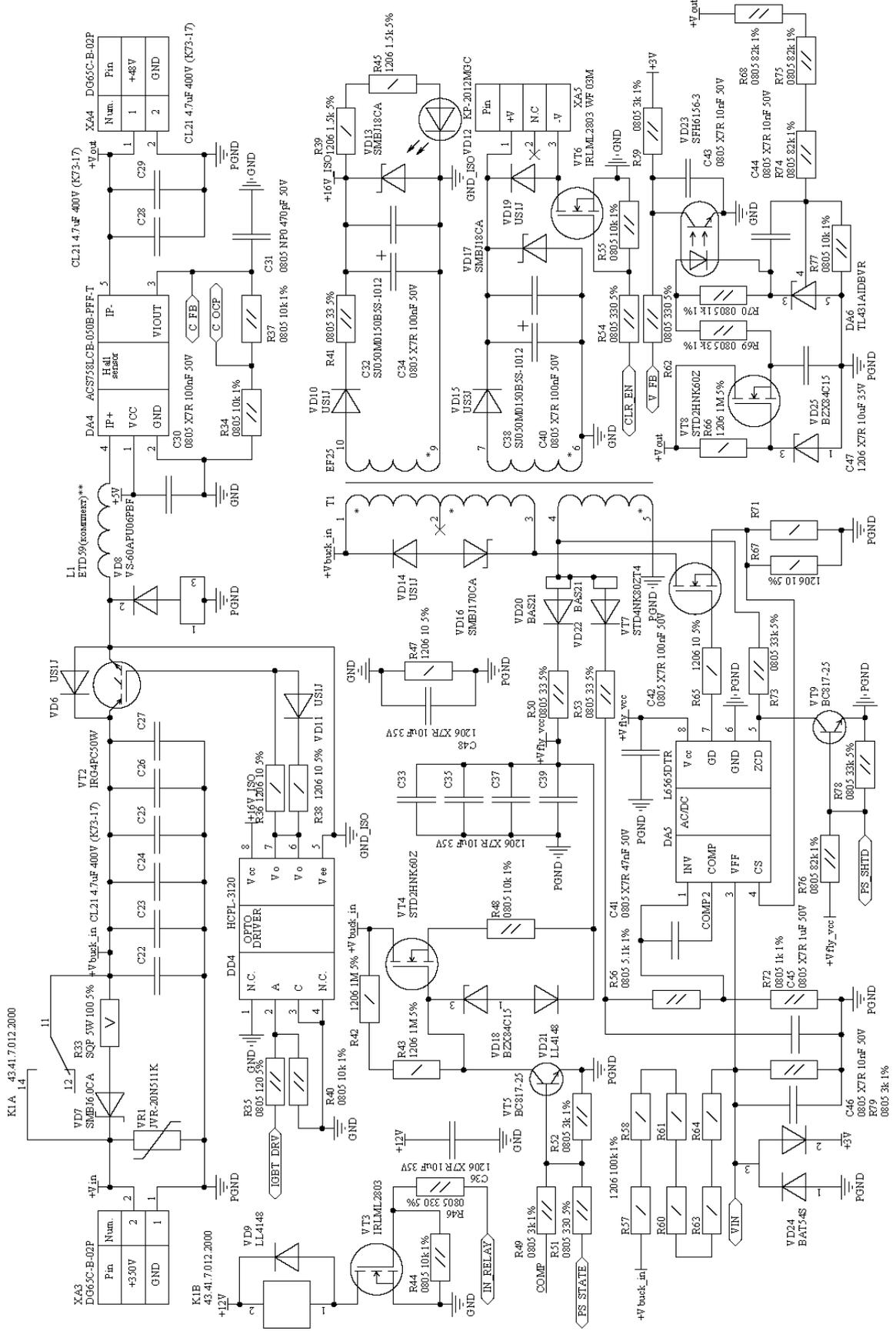


Рисунок А.5 — Схема электрическая принципиальная преобразователя тока, лист 3 из 3