

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт. Энергетический факультет  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент \_\_\_\_\_

Возмилов А.Г.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующая кафедрой

Кирпичникова И.М.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА  
ЮУрГУ – 13.04.02.2018.313.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель

профессор, д.т.н.

Е.В. Соломин

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор

студент группы П-288

А.О. Троицкий

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер

старший преподаватель

Н.Ю. Аверина

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)  
Политехнический институт. Энергетический факультет  
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»  
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
Магистерская программа 13.04.02  
«Комплексное использование возобновляемых источников энергии»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующая кафедрой

\_\_\_\_\_ И.М. Кирпичникова

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

### ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу магистра

\_\_\_\_\_ Троицкого Алексея Олеговича

\_\_\_\_\_ Группа П-288

1 Тема работы Синтез и анализ модели системы управления ВЭУ  
Утверждена приказом по университету от 04.04.2018 г., № 580.  
Срок сдачи студентом законченной работы: 18 июня 2018 г.

2 Исходные данные к работе  
1 ГОСТ Р 54418-2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2013 г.  
2 Мартьянов, А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.С. Мартьянов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – 174 с.

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке  
1 Анализ теоретических аспектов функционирования систем управления ВЭУ;  
1.1 Тенденции и направления развития малой ветроэнергетики;  
1.2 Понятие и виды ветроэнергоустановок. Задача поддержания максимальной мощности ВЭУ  
1.3 Алгоритм заряда свинцово-кислотных аккумуляторов;  
1.4 Понятие и типы систем управления ВЭУ. Методы поиска точки максимальной мощности;  
1.5 Особенности имитационного компьютерного моделирования и его применение к системам управления ВЭУ  
2 Синтез и моделирование системы управления ВЭУ;  
2.1 Разработка структурной схемы;  
2.2 Разработка алгоритма работы системы управления;

- 2.3 Разработка модели системы управления ВЭУ;
- 2.4 Разработка алгоритма оптимизации мощности ВЭУ в Matlab Simulink;
- 3 Моделирование работы системы управления и обработка полученных результатов;
- 3.2 Эмпирическая итерационная оптимизация параметров алгоритма;
- 3.3 Апробация модели системы управления при различных типах изменения скорости ветра
- 4 Графический материал
- 1 Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветра
- 2 Структурная схема автономной системы с использованием ВЭУ в качестве источника электрической энергии
- 3 Блок-схема компьютерной итерационной модели в программе Matlab Simulink
- 4 Блок-схема модуля «Charge Controller»
- 5 Блок-схема алгоритма работы модуля «Controller»
- 6 Диалоговое окно модуля S-Function Builder
- 7 Апробация модели системы управления в условиях постоянной скорости ветра
- 8 Апробация модели системы управления в условиях гармонически изменяющейся скорости ветра;
- 9 Апробация модели системы управления в условиях ступенчато изменяющейся скорости ветра
- 10 Апробация модели системы управления при воздействии скоростей ветра, которые были записаны заранее на метеостанции
- 5 Дата выдачи задания «18» декабря 2017 г.

Руководитель \_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Троицкий А.О. Синтез и анализ модели системы управления ВЭУ – Челябинск: ЮУрГУ, Энергетический, 2018. – 80 с., 46 рис., 4 табл., библиогр. список – 36 наим.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, система управления, моделирование, Matlab Simulink, коэффициент использования энергии ветра, быстроходность, поиск точки максимума мощности, алгоритмы.

Объект исследования – система управления ВЭУ.

Цель работы – разработка компьютерной модели системы управления ВЭУ для эффективного отбора мощности.

Новизна выпускной квалификационной работы заключается в исследовании ранее не применявшегося алгоритма управления модели системы управления ВЭУ для эффективного отбора мощности.

Результаты исследования – составлена структурная схема и алгоритм функционирования системы, разработана компьютерная модель системы управления ветроэнергетической установкой в программе Matlab, алгоритм управления был успешно адаптирован для данной программы. Осуществлена экспериментальная проверка эффективности алгоритма управления ВЭУ.

Работа имеет практическую значимость и может быть использована для практического осуществления в конкретных технических изделиях – контроллерах в автономных энергетических системах и системах, участвующих в распределенной генерации.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ .....	10
1.1 Тенденции и направления развития малой ветроэнергетики .....	10
1.2 Понятие и виды ветроэнергоустановок. Задача поддержания максимальной мощности ВЭУ .....	12
1.3 Алгоритм заряда свинцово-кислотных аккумуляторов .....	20
1.4 Понятие и типы систем управления ВЭУ. Методы поиска точки максимальной мощности.....	24
1.5 Особенности имитационного компьютерного моделирования и его применение к системам управления ВЭУ .....	31
2 СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ .....	43
2.1 Разработка структурной схемы.....	43
2.2 Разработка алгоритма работы системы управления.....	49
2.3 Разработка модели системы управления ВЭУ .....	59
2.4 Разработка алгоритма оптимизации мощности ВЭУ в Matlab Simulink.....	63
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	67
3.1 Эмпирическая итерационная оптимизация параметров алгоритма.....	67
3.2 Апробация модели системы управления при различных типах изменения скорости ветра .....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	78

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

WWEA – World Wind Energy Association;

ВЭУ – ветроэнергетическая установка;

ЛЭП – линия электропередач;

КИЭВ – коэффициент использования энергии ветра;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

АКБ – аккумуляторная кислотная батарея;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭДС – электродвижущая сила.

## ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия является неотъемлемой частью жизнедеятельности человека. Без нее невозможно было бы представить современное функционирование предприятий, медицинских и общеобразовательных учреждений, жилого сектора. Сейчас большая часть электроэнергии производится путём превращения из тепловой энергии, сопутствующей реакциям расщепления сложных органических веществ на более простые. Такие сложные органические вещества (нефть, газ, мазут, уголь и некоторые другие) имеют достаточно высокую удельную теплоту сгорания, что позволяет получать из них достаточно большое количество энергии. Тем не менее, они имеют также и характерные недостатки. Прежде всего, – это их ограниченное количество и то, что они являются невозобновляемыми. Такие ресурсы если и могут восполняться, то в течение больших промежутков времени. Кроме того, процесс сжигания топлива сопровождается выбросами в атмосферу вредных веществ, что ведёт к негативному влиянию на экологию.

Перечисленные выше негативные аспекты невозобновляемых источников энергии привели к появлению устройств, которые используют возобновляемые источники энергии. К ним относятся солнечная, ветряная, гидро-, геотермальная, приливная и некоторые другие виды энергии. Все они, кроме приливной и геотермальной, так или иначе получают путём преобразования из солнечной энергии, которая поступает на поверхность Земли постоянно. Это и позволяет говорить об их способности к восполнению.

Ветроэнергетика является одной из самых перспективных отраслей возобновляемой энергетики. Это подтверждается рядом цифр: по данным WWEA установленная мощность всех ветроустановок в мире в конце 2016 году составляла 486661 МВт, а к середине 2017 года – 511371 МВт [26], что составляет прирост около 5% всего лишь за полгода.

Особое развитие в настоящее время получает малая ветроэнергетика. К ней относятся установки мощностью до 99 кВт (ВЭУ малой мощности) [5]. Малая ветроэнергетика подразумевает установку ветроэнергостановок (ВЭУ) непосредственно возле потребителя (отдельные дома, поселки и другие мелкие потребители) и частичный либо полный отказ от внешней сети ЛЭП. У такой концепции генерации электроэнергии (т.н. распределенная энергетика) существует множество преимуществ, например, существенное снижение потерь при передаче электроэнергии, независимость выработки, большая надежность (если в сети присутствует несколько генераторов электроэнергии) [2].

Малая ветроэнергетика находит достаточно успешное применение в системах распределенной генерации в том числе и в районах, где подключение к сети проблематично или невозможно. Особое место занимают сейчас системы, работающие на переменных частотах вращения ветроколеса, включающие в себя синхронный генератор на постоянных магнитах, трехфазный выпрямитель и преобразователь тока. Такие системы показали лучшую эффективность, чем системы, использующие другие алгоритмы управления (например, системы с постоянной частотой вра-

щения или системы с редукторами). Однако, в таких системах возникает необходимость регулирования в соответствии с изменениями вращения ветроколеса и скоростью ветра. С этой задачей и должна справляться система управления ВЭУ. Применение систем управления – наиболее эффективный метод получения максимума электроэнергии от ВЭУ [10].

Приведенные выше факторы подтверждают актуальность темы и определили ее выбор для разработки в качестве темы выпускной квалификационной работы.

Объектом выпускной квалификационной работы является система управления ВЭУ.

Предметом выпускной квалификационной работы является управление ВЭУ с целью получения максимальной мощности.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели системы управления ВЭУ с эффективным отбором мощности.

Задачами данной работы являются:

- рассмотреть теоретические аспекты работы систем управления ветроустановок;
- разработать структурную схему, алгоритм и математическую модель системы управления автономной энергетической системы, использующей ВЭУ в качестве источника электрической энергии;
- разработать код программы на языке Си для блока управления в компьютерной модели;
- выполнить экспериментальную проверку работоспособности разработанной системы управления.

Цели и задачи работы определили ее структуру: работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений.

В первой главе работы рассмотрены теоретические аспекты работы систем управления ветроустановок в современной ветроэнергетике.

Во второй главе работы была разработана структурная схема автономной энергетической системы с ВЭУ в качестве источника электрической энергии, был разработан алгоритм управления, была преобразована существующая модель энергетической системы с ВЭУ с учётом разработанного алгоритма управления.

В третьей главе работы произведен анализ полученных результатов.

В ходе работ были использованы следующие методы:

- анализ – метод исследования, характеризующийся выделением и изучением отдельных частей объектов исследования. Анализ включает в себя обработку возможных событий, на которые должна реагировать система, и непосредственно способ реагирования; кроме того, анализ включает в себя и исследование результатов компьютерного моделирования;
- синтез – процесс соединения или объединения ранее разрозненных вещей или понятий в целое или набор. Синтез включает в себя создание модели системы и ее апробация;
- компьютерное моделирование. В настоящее время существует множество различных пакетов компьютерного моделирования, которые позволяют создать и отладить системы различного уровня сложности. К одному из самых популярных



таких пакетов относится Matlab Simulink. Он обладает достаточно широким инструментарием, который позволяет осуществить синтез компьютерной модели системы управления и ее отладку.

Работа имеет практическую значимость; алгоритм, примененный в работе, может быть успешно применен в системах управления энергетическими системами распределенной генерации на основе ВЭУ.

В качестве методологической основы исследований была использована диссертационная работа Мартьянова А.С. на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения» [10].

# 1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ

## 1.1 Тенденции и направления развития малой ветроэнергетики

Ветроэнергетика – отрасль энергетики, специализирующаяся на преобразовании энергии ветра, то есть кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в другие виды энергии, главным образом – в электрическую. Энергию ветра относят к возобновляемым источникам энергии, поскольку она имеет свойство восстанавливаться под влиянием поступления солнечного излучения на земную поверхность. В последние десятилетия ветроэнергетика бурно развивается, о чем свидетельствует график изменения установленной мощности в мире по годам (рисунок 1.1).

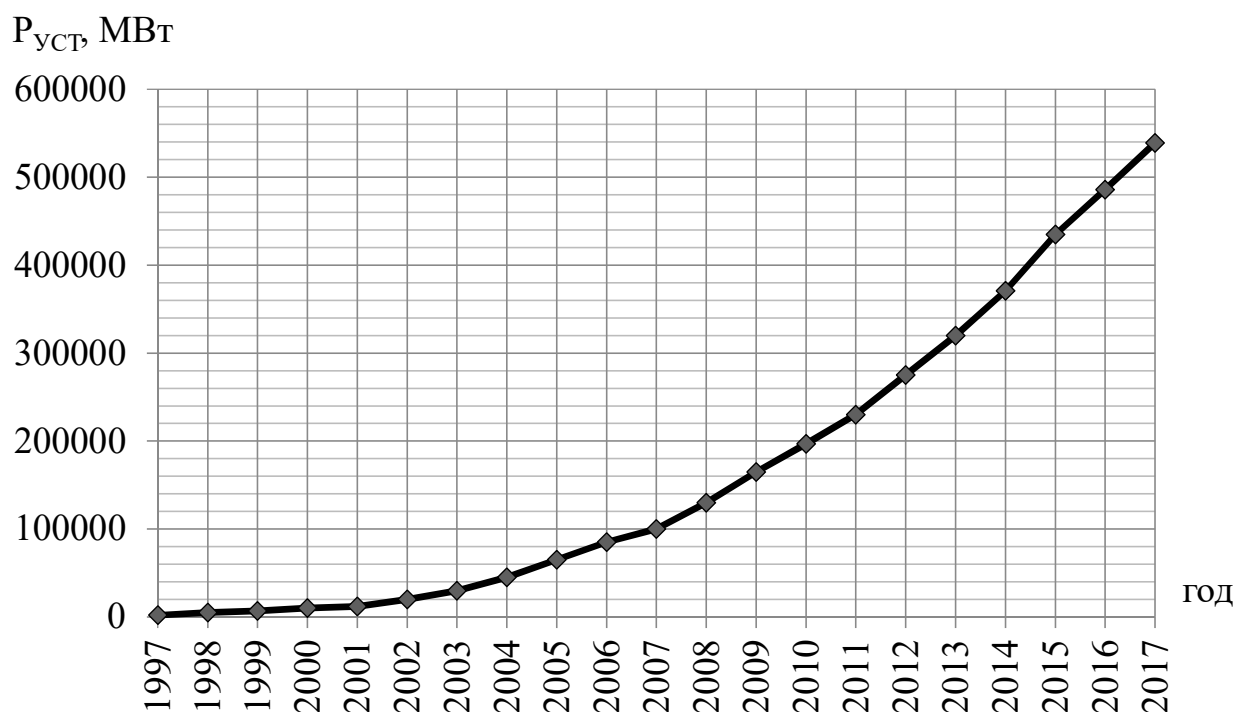


Рисунок 1.1 – Установленная мощность  $P_{уст}$  ветроэлектростанций в мире по оценкам организации WWEA

В большинстве развитых стран государство занимается стимулированием рынка возобновляемых источников энергии в целом и ветроэнергетики в целом. Активно осваивается энергия ветра в развивающихся странах – Индии, Китае, Бразилии, Египте и др. Широкое развитие ввиду постоянства ветров в прибрежной зоне получило строительство ВЭС на шельфе в акваториях в Нидерландах, Дании, Швеции, Англии и других странах [26].

Благодаря внедрению новых научно-технических достижений уже к началу двадцать первого века себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭС, снизилась до 6–7 центов за кВт·ч и практически сравнялась с себестоимостью электро-

энергии ТЭС, а с учетом дополнительных затрат, связанных с экологическими факторами, будет ниже. Удельные капиталовложения, приходящиеся на 1 кВт установленной мощности, на крупных ВЭУ (около 1000 долларов за 1 кВт) меньше, чем на угольных ТЭС. Поэтому развитие ВЭС идет по пути как увеличения единичной мощности ВЭУ, так и их количества в составе ВЭС и соответственно в целом мощности ВЭС. Модульная компоновка ВЭС при увеличении единичной мощности ВЭУ за последние годы до 5 МВт и более создает благоприятные условия для их работы в объединенных энергосистемах, позволяет повысить их надежность и эффективность.

Важнейший показатель – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) – вырос до 25%, а по прогнозам к 2030 г. может достигнуть 30% [23].

Благодаря своей доступности энергия ветра находит также широкое применение в малой ветроэнергетике, в автономных и распределенных системах энергообеспечения потребителей.

Таким образом, развитие ветроэнергетики включает в себя несколько уровней:

- развитие крупных сетей ВЭС, объединяющих большое количество установок большой мощности;
- развитие распределенной генерации, то есть генерации, в которой установки небольшой единичной мощности расположены непосредственно возле потребителя и связаны электрической сетью;
- развитие автономной генерации, при которой система не имеет подключения к внешней сети.

Распределенная генерация в настоящее время является одним из важнейших и перспективных отраслей возобновляемой энергетики в общем и ветроэнергетики, в частности. Это объясняется следующими факторами:

- субсидированием развитыми государствами малой энергетики, введением так называемых «зелёных тарифов», то есть поощрением размещения генерации непосредственно рядом с собственниками;
- высокой надежностью систем распределенной генерации, поскольку выход из строя одной установки не сказывается на стабильности системы в целом;
- нестабильность цен на энергоресурсы.

Автономная энергосистема может применяться в районах, не имеющих возможности подключения к внешней электросети. К таким районам относятся, например, посёлки Сибири, Заполярья, Дальнего Востока.

Вне зависимости от масштаба электросистемы, развитие ветроэнергетики включает в себя:

- применение новых материалов в компонентах ВЭУ (например, применение композитных материалов для лопастей ветроколеса);
- развитие конструктивных параметров ВЭУ, то есть повышение получаемой мощности от единичной установки с фиксированными параметрами путём оптимизации строения ветроколеса;
- развитие силовой электроники, осуществляющей синхронизацию и подключение к внешней сети, преобразование частоты, учет электроэнергии и др.;

– развитие алгоритмов систем управления ВЭУ с целью отбора максимально возможной мощности.

Совершенствование алгоритмов систем управления ВЭУ является одним из самых перспективных направлений развития ветроэнергетики.

Ранее, ввиду требований рынка к низкой стоимости производимой энергии, а, следовательно, и низкой стоимости самой установки, систему управления выполняли максимально простой. Для этого ветроколесо ВЭУ рассчитывают на заданную скорость ветра; частота вращения генератора при этом постоянна. Это позволяло использовать асинхронную машину в качестве генератора, подключив его непосредственно к сети [3] или синхронный генератор на постоянных магнитах, используемый для заряда аккумуляторных батарей [1,15]. Работа на постоянной частоте вращения не позволяет использовать целиком диапазон скоростей ветра и использовать ВЭУ при любых внешних условиях.

В результате развития ВЭУ и увеличения их единичной мощности происходит и совершенствование их конструкции. Так, появляются системы управления, использующие изменение угла установки лопастей ветроколеса. Появляются системы управления, использующие редукторы и коробки передач. Такие системы позволяют существенно расширить диапазон рабочих ветров и несколько увеличить выработку при малых скоростях.

В настоящее время наиболее перспективным и эффективным вариантом является применение электрических преобразователей вместе с разными типами электрических машин.

## 1.2 Понятие и виды ветроэнергоустановок. Задача поддержания максимальной мощности ВЭУ

Ветроэнергоустановка – комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (механическую, тепловую, электрическую и др.) [4].

В основе работы любой ветроэнергоустановки лежит использование перемещающихся воздушных масс, или ветра. Ветер возникает вследствие неравномерного нагрева поверхности планеты солнечным излучением, и, как следствие, возникающей разницы давлений в различных областях и появления конвективных течений. Поэтому можно утверждать, что энергия ветра возникла вследствие преобразования солнечной лучистой энергии в кинетическую энергию движущихся воздушных масс. В глобальном масштабе на эти термические явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра. Кроме этих общих, или синоптических, закономерностей многое в этих процессах определяют местные особенности, обусловленные определенными географическими или экологическими факторами [17].

Ветер чаще всего характеризуется своим непостоянством по скорости и направлению. Тем не менее, на Земле существуют области, где он постоянен во времени либо в течение сезона, либо всего года. В таких областях размещение ВЭУ наиболее выгодно.

Ветер также меняется в зависимости от высоты над землёй. Вблизи поверхности земли скорость ветра снижается ввиду наличия трения между слоями воздуха и землей. Кроме того, вблизи поверхности наблюдаются завихрения воздушных потоков. Скорость ветра снижается и при наличии каких-либо преград искусственного (здания и сооружения), либо естественного характера (холмы, горы и др.). Поэтому целесообразно размещать ВЭУ на некоторой высоте от поверхности земли.

Одно из основных условий при проектировании ветровых установок – обеспечение их защиты от разрушения очень сильными случайными порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, но раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, в 5–10 раз превышающей среднюю, поэтому установки приходится проектировать с очень большим запасом прочности. Кроме того, скорость ветра колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны и переменные гравитационные нагрузки (порядка  $10^7$  циклов за 20 лет эксплуатации) [17].

Согласно ГОСТ Р 51990-2002 [5] ВЭУ классифицируют:

- по виду вырабатываемой энергии;
- по мощности;
- по областям применения;
- по назначению;
- по признаку работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса (ВК);
- по способам управления;
- по структуре системы генерирования энергии.

По виду вырабатываемой энергии ВЭУ подразделяются на механические и электрические. Электрические ВЭУ, в свою очередь, подразделяют на ВЭУ постоянного и переменного тока.

По мощности ВЭУ классифицируют следующим образом:

- большой мощности – свыше 1 МВт;
- средней мощности – от 100 кВт до 1 МВт;
- малой мощности – от 5 до 99 кВт;
- очень малой мощности - менее 5 кВт.

По назначению ВЭУ классифицируются:

- автономные – источники электропитания, не связанные с электрической сетью, отличающиеся сравнительно низкими значениями коэффициента использования установленной мощности);
- гибридные (работа ВЭУ параллельно с независимыми электростанциями соизмеримой мощности (дизель-генераторы, малые ГЭС и др.)) – источники электропитания для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией номинальной мощности;
- сетевые (работа ВЭУ параллельно с мощной электрической сетью) – источники получения и выдачи в электрическую сеть максимально возможной выработанной электроэнергии.

По способу управления вышеуказанный ГОСТ [5] классифицирует ВЭУ следующим образом:

- регулирование ветроколеса;
- регулирование балластными сопротивлениями;
- регулирование преобразователем частоты;
- совместным и отдельным регулированием параллельно работающих электростанций (и преобразователей частоты);

В систему генерирования входят синхронные либо асинхронные генераторы, которые могут быть регулируемые или нерегулируемые, либо машина двойного питания, балластное сопротивление и преобразователь частоты [5].

Ветроустановки также можно классифицировать по двум признакам:

- по принципу действия (основанные на подъемной силе и на разнице моментов);
- по его положению относительно направления ветра (горизонтально-осевые и вертикально-осевые).

У ветроколеса с горизонтальной осью (рисунок 1.2) основной вращающей силой является подъемная сила.

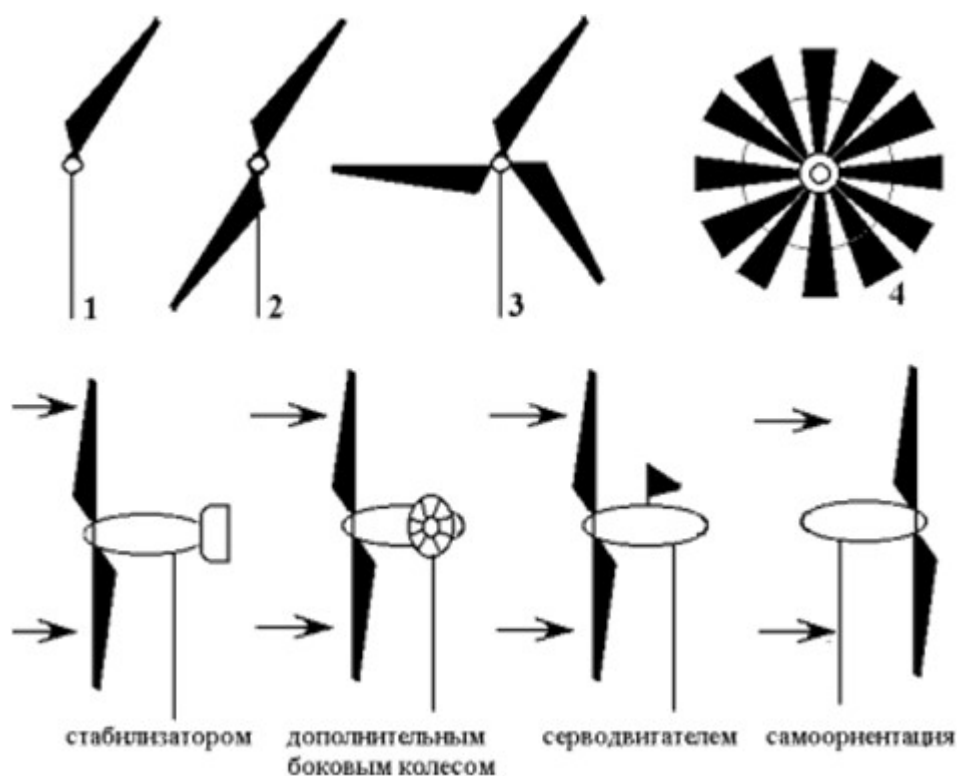


Рисунок 1.2 – Виды ветроколёс в горизонтальной осью: 1 – однолопастная; 2 – двухлопастная; 3 – трехлопастная; 4 – многолопастная и виды технических решений по осуществлению ориентации ветроколеса параллельно направлению ветра

Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней. При переднем расположении ветроколесо должно

иметь аэродинамический стабилизатор или другое устройство, удерживающее его в рабочем положении. При заднем расположении башня частично затеняет ветроколесо и турбулизирует набегающий на него поток. При работе колеса в таких условиях возникают циклические нагрузки, повышенный шум и флуктуации выходных параметров ветроустановки. Направление ветра может изменяться довольно быстро, и ветроколесо должно четко отслеживать эти изменения. Поэтому в ВЭУ мощностью более 50 кВт для этой цели используются электрические серводвигатели.

В ВЭУ обычно установлены двух- и трехлопастные ветроколеса, последние отличаются очень плавным ходом. Электрогенератор и редуктор, соединяющий его с ветроколесом, расположены обычно на вершине опорной башни в поворотной головке. В принципе их удобнее размещать внизу, но возникающие сложности с передачей крутящего момента обесценивают преимущества такого размещения. Многолопастные колеса, развивающие большой крутящий момент при слабом ветре, используются для перекачки воды и других целей, не требующих высокой частоты вращения ветрового колеса [17].

ВЭУ с горизонтальной осью вращения имеют достаточно высокую эффективность. Кроме того, их применение удобно в крупных установках, где механическая прочность достигается увеличением площади поперечного сечения применяемых конструкций. Их размещают там, где ветра имеют преимущественно постоянное направление. В случае непостоянства направления используются сервоприводы, ориентирующие ветроколесо в соответствии с направлением ветра. Однако ВЭУ с горизонтальной осью имеют ряд недостатков, в том числе необходимость подстройки под направление ветра (рисунок 1.1), что существенно усложняет конструкцию и увеличивает стоимость установки в целом. Это существенно затрудняет применение установок данного типа в малой ветроэнергетике. К недостаткам данной конструкции можно отнести также повышенный шум из-за эффекта «срыва потока».

ВЭУ с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема при необходимости позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни [17].

Тем не менее, в малых по мощности ВЭУ применение ветроколеса с вертикальной осью вращения является перспективным, поскольку применение современных материалов и правильный механический расчет и балансировка ветроколеса может свести к приемлемому минимуму колебания ветроколеса.

Существует несколько разновидностей вертикально-осевых ВЭУ:

– ротор Савониуса (рисунок 1.3) вращается силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т. е. отличаются простотой и невысокой стоимостью. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой лопастями ротора. Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает высоким крутящим моментом и используется для перекачки воды. Широкого применения установки такого типа не нашли.

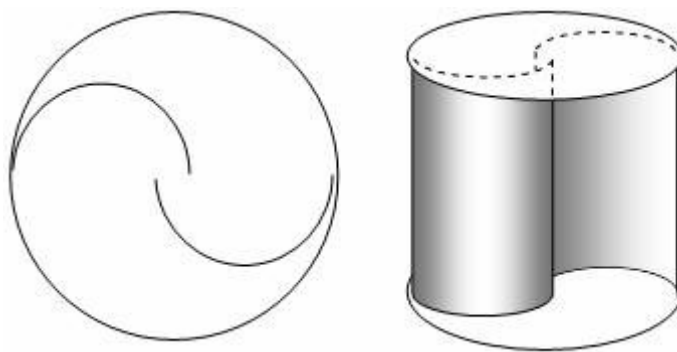


Рисунок 1.3 – Ротор Савониуса

– в роторе Дарье вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль (рисунок 1.4). Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Раскручиваться самостоятельно ротор, как правило, не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

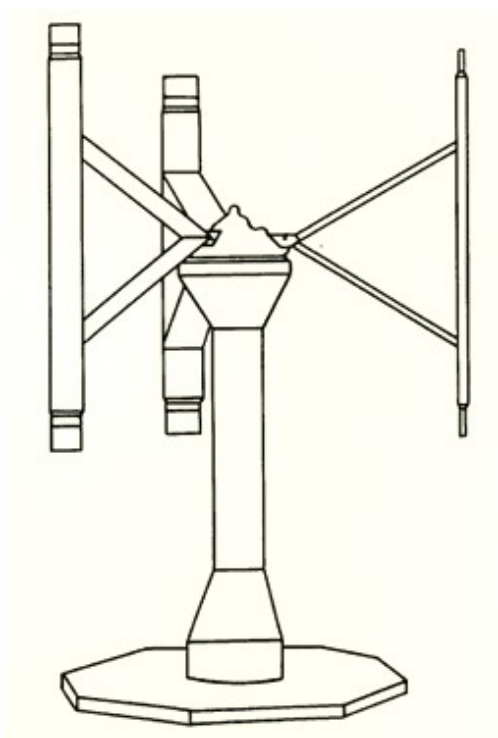


Рисунок 1.4 – Ротор Дарье

– лопасти ветроколеса ротора Масгроува в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении (рисунок 1.5). Существуют различные варианты роторов Масгроува, но все они отключаются при сильном ветре.



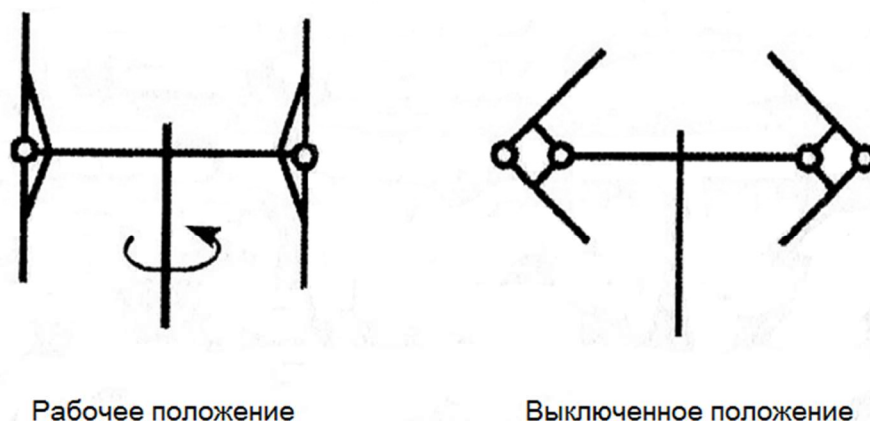


Рисунок 1.5 – Ротор Масгроува в рабочем и выключенном положении

– вращающий момент ветроколеса ротора Эванса (рисунок 1.6) создается подъемной силой, которая достигает максимума, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Раскручиваться самостоятельно такие роторы, как правило, не могут, поэтому для их запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя. Лопасти ротора Эванса в аварийной ситуации (т. е. при слишком сильном ветре) и при управлении имеют возможность поворачиваться вокруг своей вертикальной оси.

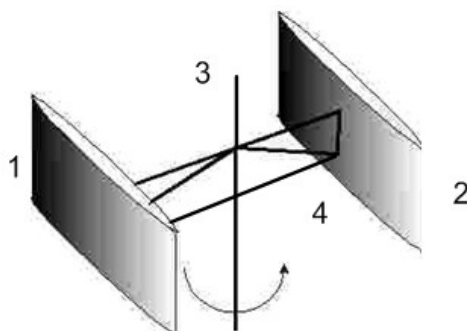


Рисунок 1.6 – Ротор Эванса (1,2 – лопасти, 3 – вертикальный вал, 4 – ось поворота лопастей)

Таким образом, вертикально-осевые ветроустановки различных типов могут применяться в установках малой и очень малой мощностей.

Специфика распределенной генерации с использованием малых ВЭУ часто предполагает их установку непосредственно возле потребителя без какой-либо электрической связи с другими энергетическими системами. Это имеет существенные преимущества перед генерацией крупными установками и ветропарками – снижаются затраты на прокладку линий электропередач от генератора электрической энергии до потребителя. Однако в этом случае качество ветроэнергии (скорость ветра и его направление, резкая переменчивость) может быть существенно хуже,

чем у крупных ветроустановок. В связи с этим возникает проблема наиболее эффективного отбора энергии у ветрового потока при различных скоростях ветра.

Известно, что для каждой определенной скорости ветра существует зависимость мощности ветроколеса от скорости его вращения [10]. Эта зависимость представлена на рисунке 1.7. Видно, что для каждой определенной скорости ветра существует такая оптимальная скорость вращения ветроколеса, при которой мощность максимальна.

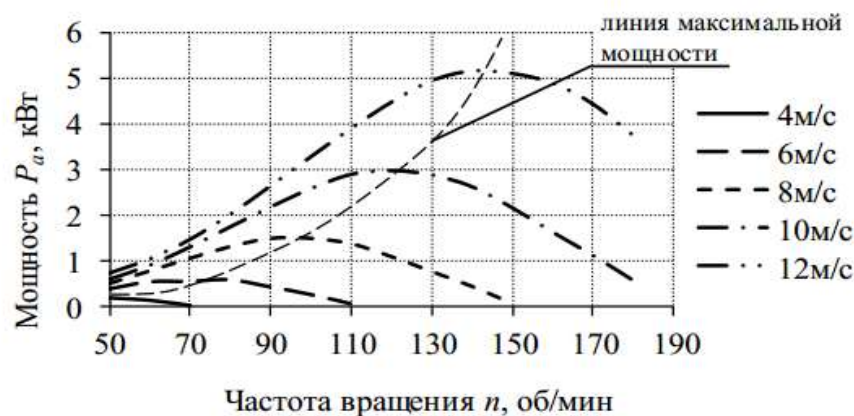


Рисунок 1.7 – Зависимость генерируемой мощности от частоты вращения ветроколеса для разных скоростей ветра

Тем не менее, поскольку кривая мощности индивидуальна для каждой скорости ветра, поэтому, пользуются также и другим графиком, отображающим данную характерную особенность, – зависимостью КИЭВ от быстроходности. Быстроходность ветроколеса – это отношение окружной скорости конца лопастей к невозмущённой скорости набегающего потока:

$$Z = \frac{V_R}{V}, \quad (1.1)$$

где  $Z$  – быстроходность ветроколеса;

$V_R$  – окружная скорость конца лопастей м/с;

$V$  – невозмущённая скорость набегающего потока ветра, м/с.

Быстроходность ветроколеса тесно связана с количеством лопастей, она снижается с увеличением их количества. В зависимости от геометрии ветроколеса ветроустановки бывают тихоходные и быстроходные. Геометрическое заполнение ветроколеса определяется числом лопастей. Тихоходные (многолопастные) ВЭУ с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивают значительную мощность при слабом ветре и небольших оборотах. Быстроходные ВЭУ с малым заполнением ветроколеса развивают максимальную мощность при больших оборотах ветроколеса.

КИЭВ (его также называют коэффициентом мощности) равен части полной мощности ветрового потока, передаваемой ветроколесу:

$$C_p = \frac{P_{ВК}}{P_{ВП}}, \quad (1.2)$$

где  $C_p$  – коэффициент мощности;

$P_{ВК}$  – мощность ветрового потока, воспринимаемая ветроколесом, Вт;

$P_{ВП}$  – полная мощность ветрового потока, Вт.

Полная мощность ветрового потока рассчитывается по формуле:

$$P_{ВП} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}, \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, в среднем равная 1,29 кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения ветроколеса, м<sup>2</sup>.

Таким образом, на основе уравнений (1.2–1.3) можно записать:

$$P_{ВП} = C_p(Z) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}. \quad (1.4)$$

КИЭВ изменяется с изменением быстроходности ветроколеса. Зависимость КИЭВ от быстроходности показана на рисунке 1.8.

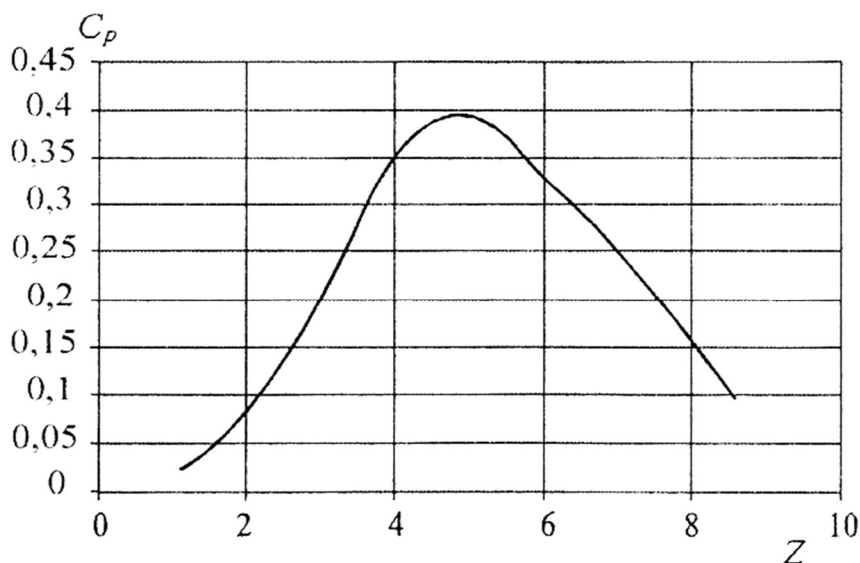


Рисунок 1.8 – Зависимость КИЭВ от быстроходности

На практике такие зависимости зачастую аппроксимируются различными зависимостями, в которых коэффициенты подбираются эмпирически [17].

Как видно, график зависимости имеет характерный пик, который и характеризует максимум мощности. Работа в режимах с неоптимальной быстроходностью будет приводить к резкому снижению мощности, и, следовательно, к снижению

выработки энергии. Поэтому одной из главных задач управления ВЭУ является поддержание такого режима работы ветроустановки, в котором КИЭВ будет максимален.

### 1.3 Алгоритм заряда свинцово-кислотных аккумуляторов

При эксплуатации энергокомплексов, особенно на основе возобновляемых источников, неизбежно встает вопрос накопления электроэнергии. Причем резервный энергетический запас необходим не только для преодоления периодов отсутствия питания от возобновляемых источников (например, в безветрие или отсутствие инсоляции), но в том числе и как бытовой аккумулятор излишков энергии, произведенных, но не использованных потребителем.

Достаточно широкое применение в автономных и гибридных энергетических системах нашли аккумуляторы энергии, преобразующие электрическую энергию в запасенную химическую и, при необходимости, наоборот. Аккумулятор – это многозарядный химический источник тока многократного использования. Он служит для накопления энергии и дальнейшей его эксплуатации в виде автономного источника энергии в электротехнических системах и комплексах. Принцип действия аккумулятора основан на обратимости химических процессов (окислительно-восстановительных реакций). В общем случае химический аккумулятор – это два электрода (положительный катод и отрицательный анод), произведенных из разных металлов и помещенных в раствор электролита или кислоты. Разряженный аккумулятор можно зарядить, пропуская электрический ток в направлении, обратном направлению в процессе разряда.

В настоящее время существует несколько типов аккумуляторов энергии. Они различаются химическими веществами-реагентами, а также химическими реакциями, происходящими в аккумуляторе.

Выделяют следующие типы аккумуляторов:

- железно-воздушные;
- железно-никелевые;
- лантано-фторидные;
- литиево-железно-сульфидные;
- литиево-железно-фосфатные ( $\text{LiFePO}_4$ );
- литиево-ионные (Li-Ion);
- литиево-полимерные (Li-Pol);
- литиево-фторные;
- литиево-хлорные;
- литиево-серные;
- натриево-никелево-хлоридные;
- натриево-серные;
- никелево-кадмиевые (NiCd);
- никелево-металло-гидридные (NiMH);
- никелево-цинковые (NiZn)

- свинцово-водородные;
- свинцово-кислотные (Lead Acid);
- серебряно-кадмиевые;
- серебряно-цинковые;
- цинково-бромные;
- цинково-воздушные;
- цинково-хлорные;
- никель-водородные [13].

Аккумуляторы отличаются также техническими характеристиками, присущими каждому типу. Например, свинцово-кислотные аккумуляторы могут выдавать достаточно большой ток кратковременно, что позволяет применять их для старта двигателей. Именно поэтому такой тип, как правило, используется в автотранспорте. Однако, такие аккумуляторы, как правило, обладают небольшим значением энергетической плотности, поэтому они, как правило, громоздки, что не позволяет применять их в портативной технике. Литий-ионные аккумуляторы, как правило, обладают высоким показателем энергетической эффективности, однако они становятся взрывоопасны при перезаряде, и портятся при очень глубоком разряде. Кроме того, они не способны создавать большие токи во внешней цепи, а при длительном хранении теряют емкость даже при нормальной температуре. При повышенной или пониженной температуре их ёмкость теряется ещё быстрее.

В таблице 1.1 приведены параметры различных типов аккумуляторов.

Таблица 1.1 – Параметры различных типов аккумуляторов

Параметры АБ	Lead-acid	Ni-Ca	Ni-Mh	Li-Ion	Li-Po	LiFePO <sub>4</sub>
Энергетическая плотность, Вт·ч/кг	30–50	45–80	0–120	110–160	100–130	100
Число рабочих циклов до снижения емкости на 80%	200–300	1500	300–500	500–1000	300–500	2000–8000
Минимальное время заряда, ч	8–16	1	3–4	1–2	2–4	0,25
Ток заряда (доля от номинальной ёмкости)	0,1–0,2	0,1–3	0,1–2С	0,1–0,4С	0,1–1С	до 2,8
Саморазряд за месяцы, %	5	20	30	10	10	3
Эффект памяти	Нет	Сильный	Слабый	Нет	Нет	Нет
Напряжение элемента в батарее, В	2	1,25	1,25	3,6	3,6	3,3

В подавляющем большинстве аккумуляторных установок автономных энергосистем используются стационарные свинцово-кислотные аккумуляторы [13]. Их преимущественное применение объясняется целым рядом их достоинств.

- диапазон емкостей аккумуляторов находится в пределах от единиц ампер-часов до десятков килоампер-часов, что позволяет обеспечивать комплектацию батарей любого необходимого резерва.

- между конечными зарядным и разрядным напряжениями при зарядах и разрядах свинцово-кислотных аккумуляторов имеет наименьшее значение из всех электрохимических систем источников тока, что позволяет обеспечивать низкий перепад напряжения на нагрузке во всех режимах работы электропитающей установки.

- свинцово-кислотные аккумуляторы отличаются низкой величиной саморазряда и возможностью сохранения заряда (емкости) при длительном подзаряде.

- свинцово-кислотные аккумуляторы обладают сравнительно низким внутренним сопротивлением, что обуславливает достаточную стабильность напряжения питания при динамических изменениях сопротивления нагрузки.

Вместе с тем свинцово-кислотным аккумуляторам присущи недостатки, ограничивающие сферу их применения и усложняющие организацию их эксплуатации:

- из-за низкой удельной плотности запасаемой энергии свинцово-кислотные аккумуляторы имеют достаточно большие массогабаритные параметры. Однако для стационарного применения этот показатель не имеет главенствующего значения в отличие от применения аккумуляторов для питания мобильных устройств.

- поскольку в установках свинцово-кислотных аккумуляторов происходит газообразование, для обеспечения взрывобезопасности должна быть налажена естественная или принудительная вентиляция - в зависимости от условий применения и типа аккумуляторов. По этой же причине аккумуляторные установки нельзя размещать в герметичных шкафах, отсеках и т.д. [20].

Свинцово-кислотные аккумуляторы требуют определенного алгоритма их заряда. В случае несоблюдения правильного алгоритма заряда возможно закипание электролита (если превышен максимальный ток), что создает повышенную пожароопасность, а также снижение ёмкости аккумулятора и его ресурса в целом. Стоит также отметить, что для свинцово-кислотных аккумуляторов не является критичным факт заряда малыми токами. Это также является их положительным качеством при их использовании в автономных энергосистемах на возобновляемых источниках энергии.

Самый простой и безопасный метод зарядки свинцового аккумулятора - это метод «I-U» (ток - напряжение). Он подразумевает заряд аккумулятора в два этапа.

Первый этап этого метода подразумевает заряд постоянным током, а после достижения заданного напряжения поддерживают на нем постоянное напряжение. Для большинства стационарных свинцовых аккумуляторов максимальный начальный ток заряда не должен превышать  $0,3 \cdot C$ , а наиболее оптимальным является ток в  $0,1 \cdot C$ . Заряд таким током не приведёт к каким-либо возможным негативным последствиям (снижение ресурса работы, ёмкости и др.).

Второй этап подразумевает поддержание постоянного напряжения на клеммах аккумулятора. Максимальное значение напряжения на аккумуляторе не должно превышать 2,3 вольт на каждый элемент аккумулятора. То есть для свинцового аккумулятора с номинальным напряжением 12 вольт, конечное напряжение зарядки

не должно превышать 13,8 вольт. Метод I-U чаще применяется при работе аккумуляторов в буферном режиме, поскольку под напряжением 13,8 вольт современные герметичные свинцовые кислотные аккумуляторы могут находиться на протяжении всего своего ресурса.

При условии соблюдения указанного выше алгоритма работы и тока заряда 10% от ёмкости аккумулятора за 8–9 часов свинцово-кислотный аккумулятор заряжается примерно до 90% своей ёмкости. После перехода к режиму постоянного напряжения, ток зарядки аккумулятора быстро падает, и полная зарядка аккумулятора занимает примерно сутки. Существует также форсированный метод заряда аккумулятора – заряд постоянным током до напряжения 14,5 вольт, а затем отключение зарядного устройства, либо его перевод в режим поддержания напряжения 13,8 вольт. Такой способ заряда можно применять разово в экстренных случаях. Он позволяет зарядить аккумулятор за 6 часов при начальном токе в 20% от ёмкости. Однако в качестве основного такой метод заряда неприемлем, поскольку снижает ёмкость аккумулятора [22].

Описанный выше метод применим для свинцово-кислотных аккумуляторов. В случае изменения типа аккумуляторов в системе управления зарядом необходимо предусмотреть изменения в алгоритме заряда. Так, для гелевых аккумуляторов метод I-U является приемлемым, однако необходимо несколько повысить максимальное значение напряжения на втором этапе заряда (до 14,2–14,8 вольт в зависимости от производителя и конкретного аккумулятора).

Таким образом, метод I-U является достаточно простым, но в то же время эффективным и надёжным способом заряда аккумулятора.

Весьма перспективными в настоящее время являются литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Их преимуществами перед свинцово-кислотными и литий-ионными являются:

- отсутствие потери ёмкости при чрезмерном охлаждении;
- пониженная пожароопасность;
- способность выработки больших токов разряда (до 50 °С);
- могут быть заряжены сильным током за короткое время (быстрый заряд);
- имеют большое число циклов заряд-разряд (2000–8000 до потери 20% ёмкости);
- практически не подвержены потере ёмкости при хранении.

К недостаткам данной технологии аккумуляторов можно отнести следующие особенности:

- большая стоимость при меньшей ёмкости;
- имеют меньшую энергоёмкость;
- не совместимы с устройствами, использующими Li-Ion-элементы из-за другого диапазона напряжений – 2–3,65 вольт;
- необходимость строгого соблюдения диапазона напряжений – 2–3,65 В [12].

Как следствие из последнего пункта, данные аккумуляторы требуют сложного алгоритма заряда, что также можно отнести к их недостаткам. Тем не менее, в настоящее время разработаны алгоритмы капельного и быстрого заряда, отслеживающие температуру батареи и не допускающие её перегрева [16].

#### 1.4 Понятие и типы систем управления ВЭУ. Методы поиска точки максимальной мощности

Система управления в общем техническом смысле – это совокупность управляемого объекта и устройства управления, действие которой направлено на поддержание или улучшение работы объекта [14]. В ветроэнергетике система управления – это система, которая на основе полученных от соответствующих приборов данных о состоянии ветроагрегата и/или условий окружающей среды регулирует работу ВЭУ, удерживая контрольные параметры в эксплуатационных пределах [6]. Практически все источники возобновляемой энергии, а в частности, и ВЭУ, не могут поддерживать выработку электроэнергии на постоянном уровне ввиду непостоянства потоков энергии и их зависимости от многих факторов. Поэтому зачастую система управления зачастую выполняет не только задачу по поддержанию параметров ВЭУ в эксплуатационных диапазонах, но и задачу по поиску и отслеживанию оптимального режима ВЭУ, в котором возможен отбор максимально возможной мощности.

Существует множество различных вариантов автономных и гибридных энергосистем с ВЭУ малой и очень малой мощности, предложенные различными авторами и реализуемые на практике. Системы управления в них также будут различными.

Простейшим вариантом автономной ВЭУ являются системы, работающие на постоянной частоте вращения [18]. В этом случае ротор ветроколеса подключен напрямую или через мультипликатор к генератору. С изменением скорости ветра будет изменяться и частота вращения ветроколеса, а, следовательно, и частота вращения генератора, следовательно, и уровень его напряжения. Генератор подключается к трехфазному выпрямителю, а выпрямитель – к аккумуляторной батарее, которая необходима здесь в качестве накопителя электрической энергии (рисунок 1.9).

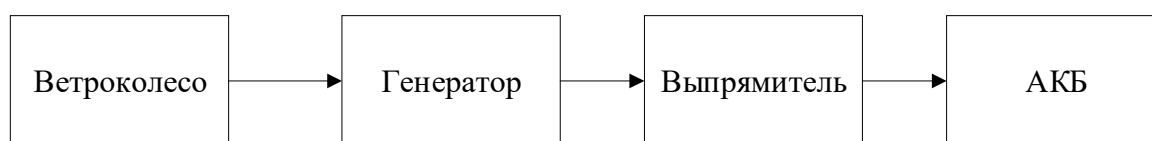


Рисунок 1.9 – Схема системы, работающей на постоянной частоте вращения

Увеличение скорости вращения ветроколеса ведет к увеличению тока заряда аккумулятора и, следовательно, электромагнитного момента, что не позволяет ветроколесу разогнаться выше определенных оборотов вращения. С другой стороны, снижение скорости ветра ведет к снижению тока заряда аккумулятора и снижению электромагнитного момента. Таким образом, достигается стабилизация. В таких системах отсутствует внешнее управление, а сама система стремится к балансу автоматически. Несмотря на простоту и, следовательно, надёжность конструкции, такие системы применяются в настоящее время достаточно редко вследствие их ограниченной эффективности. Помимо этого, возникает необходимость в применении



специальных защитных средств, которые ограничивают работу установки в режимах, отличных от номинальных.

Другим вариантом, несколько более сложным с точки зрения реализации, являются системы, которые позволяют переключать обмотки генератора, тем самым добиваясь ступенчатого регулирования на различных скоростях ветра (рисунок 1.10) [19]. С ростом оборотов увеличивается центробежная сила, что позволяет использовать механические устройства, переключающие обмотки автоматически и напрямую. Аналогично, возможно применение анемометров, которые осуществляют переключение обмоток. Такие механические устройства, как правило, ненадежны, что серьезно снижает надёжность установки в целом по сравнению с системами, работающими на постоянных частотах вращения, приводя к необходимости дополнительной эксплуатации и ремонта. Тем не менее, такие системы более эффективны, поскольку позволяют эффективно работать на различных скоростях ветра. Потребность в применении дополнительных ограничителей оборотов и устройств торможения остаётся.

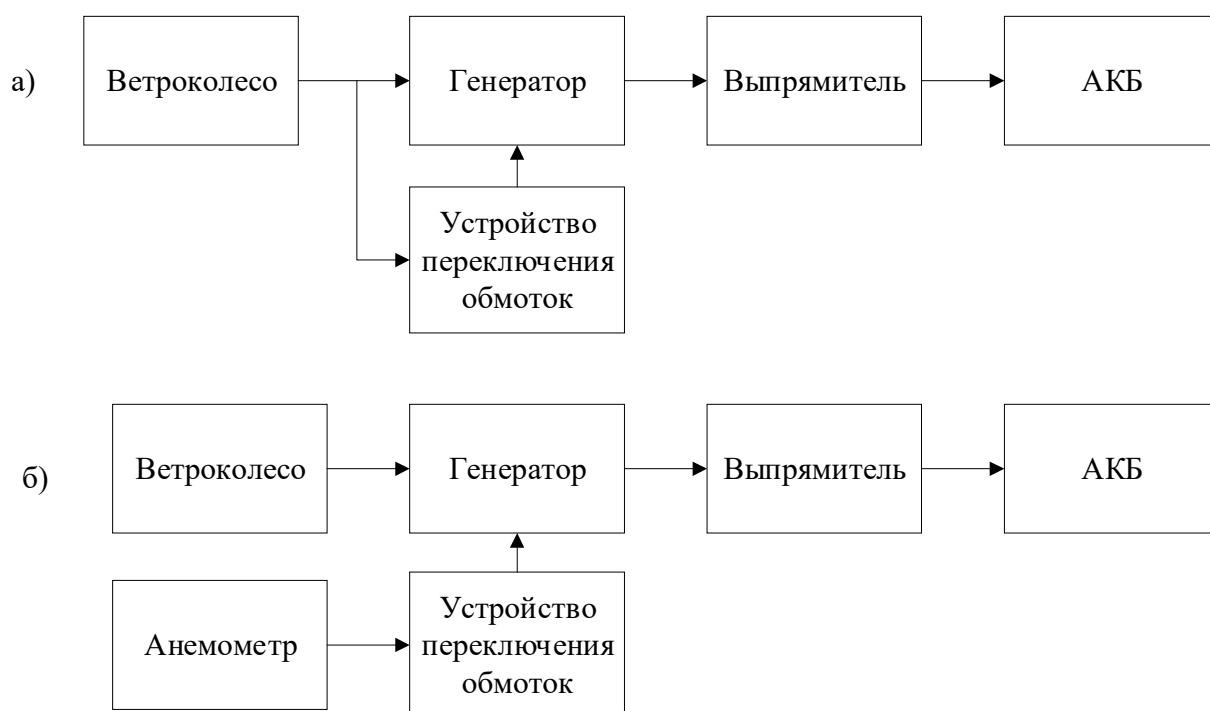


Рисунок 1.10 – Схема системы с переключением обмоток:

а) – с применением электромеханических устройств; б) – с применением анемометра

Еще одним способом управления мощностью ВЭУ является применение устройств механической передачи между валом ротора ветроколеса и валом генератора (рисунок 1.11) [8]. Этот способ схож с предыдущим ступенчатостью регулирования, а также наличием вспомогательных механических устройств, поэтому недостатки предыдущего способа существуют и здесь. Кроме того, возникают дополнительные механические потери в устройстве передачи.



Рисунок 1.11 – Схема системы с коробкой передач (редуктором)

Принципиально другим способом управления является способ регулирования аэродинамических характеристик ветроколеса путём изменения установочного угла лопасти или других геометрических характеристик [7]. Здесь также, как и в случае с механическим переключением обмоток может быть применены механические устройства, меняющие угол атаки, но в отличие от того метода, регулирование здесь является плавным, и, значит, более точным и эффективным (рисунок 1.12). Тем не менее, применение механических устройств ведет к значительному усложнению конструкции ветроколеса, существенному снижению надежности и повышению стоимости установки. Помимо этого, возникает необходимость в получении регулировочной зависимости мощности ветроустановки от угла установки лопасти. Кроме того, существенным недостатком является также узкий диапазон регулировки: на больших скоростях ветра необходима достаточно большая жесткость пружин, однако при высоких скоростях ветра слишком большая жесткость пружин не позволит осуществить сложение лопастей и торможение ветроколеса.

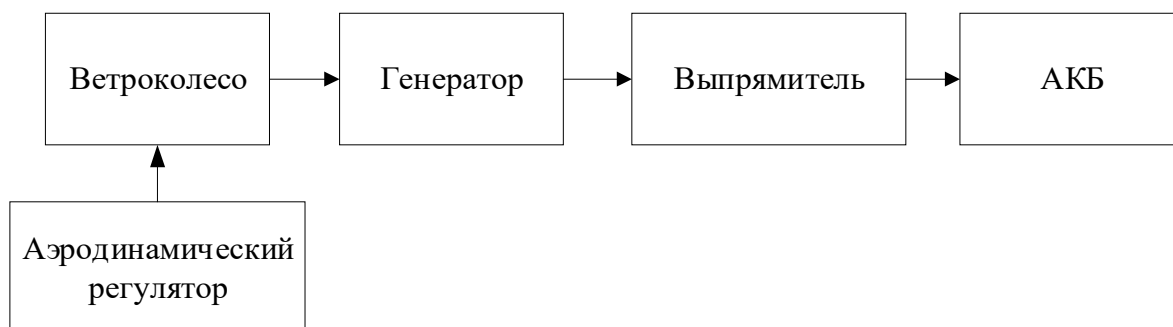


Рисунок 1.12 – Схема системы с аэродинамическим регулятором

Наиболее эффективными и распространенными в настоящее время системами являются ВЭУ, работающие на переменных скоростях вращения и содержащие электрический преобразователь [10]. Его применение позволяет осуществлять управление без каких-либо вспомогательных механических регуляторов, хотя зачастую используются механические или электромеханические устройства, производящие аварийное торможение в случае необходимости. В то же время, такое регулирование является достаточно плавным, чтобы говорить о его высокой эффективности на различных скоростях ветра. С другой стороны, возникает потребность в применении электрического преобразователя, выполненного из качественных и надежных элементов. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 1.13.

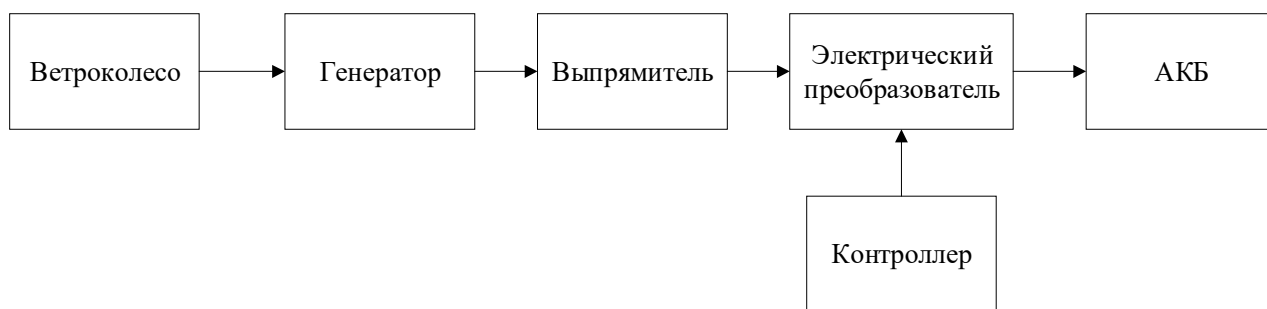


Рисунок 1.13 – Схема системы с электрическим преобразователем

В качестве генератора в таких системах может быть использован синхронный генератор на постоянных магнитах, а в качестве преобразователя – ШИМ-преобразователь на IGBT транзисторе, показавший свою высокую эффективность в различных системах. ШИМ-преобразователем управляет контроллер – отдельное устройство, которое, опираясь на измерения различных величин тем или иным образом влияет на преобразователь (например, изменяя коэффициент заполнения ШИМ-преобразователя), пытаясь выйти на оптимальный режим.

Понятию максимальная мощность соответствует точка максимальной мощности (рисунок 1.6). Существует несколько способов отслеживания точки максимальной мощности. Их можно разделить на две категории – использующие механические датчики и не использующие их [29].

К методам, использующим механические датчики, относится метод по отслеживанию максимальной быстроходности [10]. Как было отмечено ранее (рисунок 1.1), КИЭВ  $C_p$  функционально связан с быстроходностью  $Z$ . Метод, использующий отслеживание быстроходности, напрямую регулирует скорость ветроколеса или его момент для того, чтобы поддерживать значение быстроходности оптимальным, измеряя при этом текущие скорости ветра и ветроколеса (рисунок 1.14). На рисунке обозначены:  $\omega_G$  – частота вращения генератора, об/мин;  $V$  – невозмущённая скорость набегающего потока, м/с.

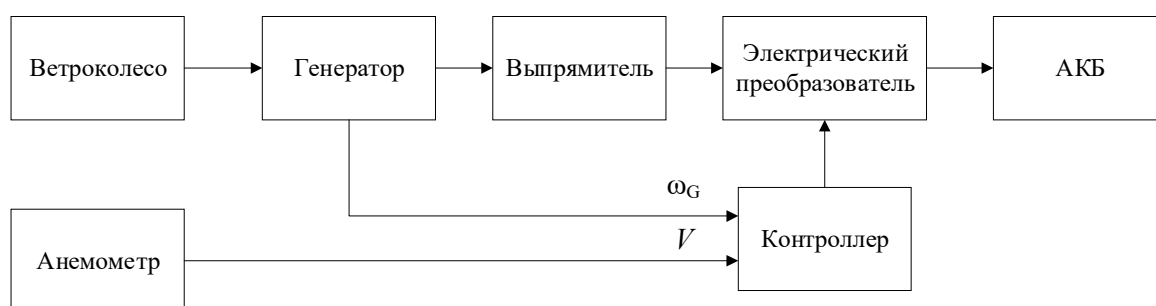


Рисунок 1.14 – Схема системы с контролем быстроходности

Существенным недостатком методов контроля является необходимость применения анемометра, который должен быть расположен на одной высоте с ветроколесом (чтобы обеспечивать достаточно точные измерения ветра, поскольку они

различны на различных высотах от уровня земли), однако в то же время – на некотором удалении от него, чтобы возмущения ветрового потока, которые возникают рядом с ветроколесом, не искажали результаты измерений. Кроме того, установка дополнительных устройств негативно сказывается на надёжности системы в целом и её удорожании. Помимо этого, возникает проблема получения зависимости мощности от скорости ветра и частоты вращения для различных типов ветроколес, а значит, такое решение не будет универсальным.

Альтернативой методу контроля быстроходности является метод обратной связи по мощности [21]. Такой метод подразумевает получение данных о текущей мощности и частоте вращения генератора. По заранее заданной кривой, полученной экспериментально, математическим моделированием или процессом «тренировки» системы управления, рассчитывается текущее отклонение между текущей и оптимальной мощностью. Далее оно используется для управления электрическим преобразователем (рисунок 1.15). Основным недостатком данного метода заключается в том, что необходимо заранее получить кривую мощности, что не всегда возможно с достаточной степенью точности.

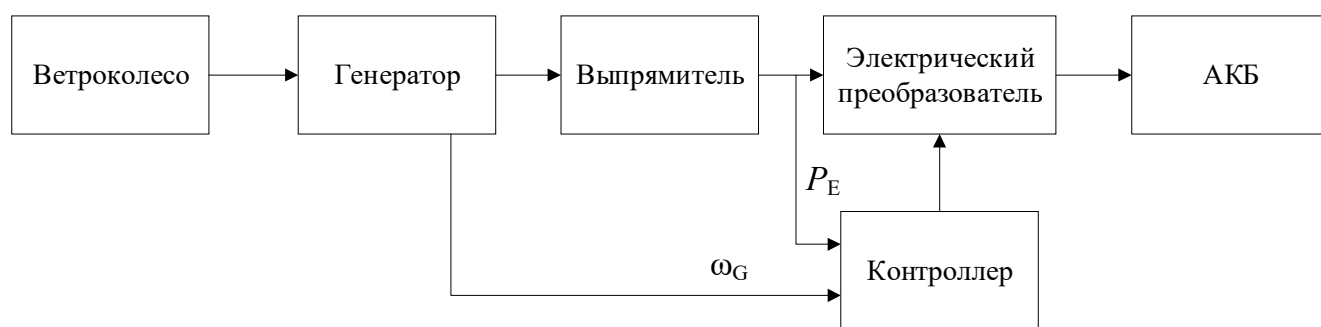


Рисунок 1.15 – Схема системы с обратной связью по мощности

Другими методами отслеживания максимальной точки являются методы, не использующие механические датчики. Их также называют «методы поиска максимума» [34]. Как было отмечено ранее, для каждой определенной скорости ветра существует такая оптимальная скорость вращения ветроколеса, при которой мощность максимальна. Это говорит о том, что функция зависимости мощности от скорости вращения ветроколеса имеет одну точку максимума. Условие максимума для данной функции – это равенство нулю производной механической мощности вращения ветроколеса по времени:

$$\frac{dP_{\text{ВК}}}{dt} = 0. \quad (1.5)$$

Этот факт используется во всех подобных алгоритмах. Схемы таких систем подобны схеме на рисунке 1.15.

Один из таких алгоритмов управления использует принцип поиска, запоминания и повторного использования [33]. Алгоритм начинает свою работу без какой-

либо информации об объекте управления – системе ВЭУ. В процессе обучения алгоритм находит точки максимума, соответствующие различным скоростям ветра, по условию максимума функции и сохраняет их параметры в память для дальнейшего использования. Это выполняется до тех пор, пока не будет собрано достаточное количество информации о характеристиках системы. После этого процесс получения максимальной мощности является оптимизированным. Такой процесс тренировки также называют обучением напрямую. К недостаткам этого способа относятся необходимость обучения, а значит, и неэффективность работы в этом режиме, достаточно большая сложность, что может быть важным при реализации алгоритма на конечных устройствах контроллеров.

Другой метод основан на прямом регулировании коэффициента заполнения ШИМ исходя из сравнения текущих измерений электрической мощности генератора с предыдущими [30]. Коэффициент заполнения выражается следующим образом:

$$D = \frac{\tau}{T},$$

где  $D$  – коэффициент заполнения;

$\tau$  – время импульса, с;

$T$  – период цикла, с.

Регулируя коэффициент заполнения, можно изменять напряжение на выходе ШИМ-преобразователя, а значит, и ток нагрузки. Несмотря на то, что изменение скорости ветра может происходить достаточно быстро и в широких пределах, механическая мощность на валу ветрогенератора меняется достаточно медленно из-за инертности ветроколеса. В данном методе коэффициент заполнения изменяется по следующему соотношению:

$$D_k = D_{k-1} + C_1 \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta D_{k-1}}, \quad (1.6)$$

где  $D_k$  и  $D_{k-1}$  – коэффициент заполнения в  $k$ -ом отсчёте и предшествующий ему коэффициент заполнения соответственно;

$\Delta P_{k-1}$  – изменение мощности между отсчётами, Вт;

$\Delta D_{k-1}$  – изменение коэффициента заполнения между отсчётами;

$C_1$  – шаг изменения, 1/Вт.

Ещё одним методом поиска экстремума является метод, основанный на предельном цикле [32]. Поиск точки максимальной мощности осуществляется с помощью интегрального звена, которое управляет током электрического преобразователя системы, подключенной к внешней сети, путём регулирования постоянного напряжения электрического преобразователя. Опорный ток увеличивается до тех пор, пока выполняется условие максимума. Если он увеличивается и дальше, постоянное напряжение электрического преобразователя не может оставаться посто-

янным, поскольку условие баланса мощности в этом случае не соблюдается. Поэтому постоянное напряжение начинает снижаться и, если оно ставится меньшим некоторого порогового значения, управляющее воздействие интегратора меняет знак, уменьшая опорный ток. В этом случае возникают нелинейные колебания вокруг точки максимума, которые называют предельным циклом. Из-за этих колебаний система автоматически стремится к точке максимума; при этом система управления не использует какие-либо данные о генераторе и ветроколесе.

Другой перспективной разработкой в области методов поиска экстремума функции мощности является применение изменяющегося шага изменения скорости вращения ветроколеса [36]. Вместо постоянного шага изменения используется шаг, пропорциональный отношению изменения мощности к изменению скорости вращения:

$$\Delta\omega_k = K \cdot \frac{\Delta P_{k-1}}{\Delta\omega_{k-1}}, \quad (1.7)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, может быть получен эмпирически;

$\Delta\omega_{k-1}$  – изменение частоты вращения между текущим и предыдущим отсчётом, рад/с;

$\Delta\omega_k$  – новое изменение частоты вращения, рад/с.

Таким образом, частота вращения будет изменяться быстрее, если текущая мощность далека от точки максимальной мощности. Однако, чем текущая мощность ближе к экстремуму, тем изменение будет происходить медленнее.

Ещё одним методом контроля точки максимальной мощности является метод, в котором в качестве входного параметра используется мощность, а в качестве управляемого параметра – момент [31]. Оптимальное значение момента применяется в цепи управления моментом в синхронных генераторах на постоянных магнитах с управлением моментом. В этом случае контроллер не нуждается в дополнительных данных о скорости ветра.

Существуют методы, совмещающие несколько различных подходов к поиску максимальной мощности. Одним из них является подход, совмещающий контроль быстроходности и поиск экстремума функции мощности [27,28]. На первом этапе точка максимума отслеживается по приблизительной оптимальной быстроходности. Когда измеряемая скорость ветра стабилизируется, дальнейший поиск действительной точки максимума производится классическим методом поиска экстремума. Когда действительный пик достигнут, в память заносятся соответствующие значения оптимальной скорости генератора и соответствующая ей скорость ветра; после этого корректируется оптимальное значение быстроходности. Когда скорость ветра изменяется, в дальнейших расчётах используется уже скорректированное значение быстроходности. Преимуществом перед простым методом отслеживания быстроходности является отсутствие необходимости в предварительном получении характеристик ветроколеса, однако остальные недостатки сохраняются. Кроме того, такие алгоритмы показывают худшую эффективность, чем классические алгоритмы, отслеживающие быстроходность.

Ещё одним совмещенным методом является метод, который включает в себя преимущества двух алгоритмов: контроля точки максимума по характеристике «мощность – скорость вращения» и метод поиска экстремума [15]. Этот алгоритм измеряет скорость вращения генератора и вычисляет оптимальный крутящий момент  $M_{\text{опт}}$ . Действительное значение крутящего момента  $M_{\text{действ}}$  также измеряется. В нормальных условиях, когда разница  $\Delta M$  между  $M_{\text{опт}}$  и  $M_{\text{действ}}$  невелика, применяется так называемый метод возмущения и наблюдения, основанный на вычислении мощности, игнорируя характеристику  $M - \omega$ . Если разница  $\Delta M$  стала по каким-либо причинам (например, резкие порывы ветра, неправильная инициализация программы из-за недостоверных данных с датчиков) достаточна велика, то коэффициент заполнения выставляется в соответствии с данной характеристикой.

В ВЭУ очень малой мощности применение данных алгоритмов вполне оправдано ввиду достаточно высокой эффективности. При достаточно большой частоте дискретизации вычисления точки максимальной мощности и измерения отклонений такие методы дают малые колебания вырабатываемой мощности [29].

### 1.5 Особенности имитационного компьютерного моделирования и его применение к системам управления ВЭУ

Модель – это физический или абстрактный образ моделируемого объекта, удобный для проведения исследований и позволяющий адекватно отображать интересующие исследователя физические свойства и характеристики объекта.

Моделирование представляет собой процесс замещения объекта исследования некоторой его моделью и проведение исследований на модели с целью получения необходимой информации об объекте [9].

Моделирование является мощным средством анализа и синтеза сложных объектов, процессов и явлений. Решение многих сложных научных и технических задач значительно упрощается при моделировании, т.е. замещении одних объектов другими, обеспечивающими отражение наиболее существенных для исследователя свойств и особенностей замещаемых объектов.

В настоящее время моделирование находит широкое применение в автоматике, вычислительной и измерительной технике, радиотехнике и связи, математике и других областях науки и техники.

Моделирование состоит в выявлении основных свойств исследуемого процесса, построении моделей и их применении для прогнозирования поведения природы. Критерием правильности моделирования является практика.

Ценность методов моделирования состоит в том, что они позволяют существенно сократить и облегчить натурный эксперимент, который обычно дорог, сложен и связан с аварийными состояниями, а также увеличить достоверность математического описания и расчетов. Моделью может являться реальное техническое устройство и абстрактное математическое описание, отображающее природу. Применение технических средств придает моделированию экспериментальный характер, а модельное математическое описание теоретически раскрывает характер явления [11].

Компьютерное моделирование – это моделирование, при котором математическая модель системы представлена в виде программы на ЭВМ.

Компьютерное моделирование можно разделить на три вида:

- численное моделирование – вычислительный эксперимент заключается в численном решении некоторых математических уравнений при заданных значениях параметров и начальных условиях;
- статистическое моделирование – это вид компьютерного моделирования, позволяющий получить статистические данные о процессах в моделируемой системе.
- имитационное моделирование – вид компьютерного моделирования, для которого характерно воспроизведение на ЭВМ (имитация) процесса функционирования исследуемой системы. При этом имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени, что позволяет получить информацию о состоянии системы в заданные моменты времени. При имитационном моделировании эксперимент либо многократно повторяется, чтобы изучить и оценить последствия каких-либо действий на реальную обстановку, либо проводится одновременно со многими другими похожими объектами, но поставленными в разные условия [9].

При моделировании систем управления чаще всего применяется именно имитационное моделирование, позволяющее отслеживать различные параметры и режимы работы системы, поскольку возникает задача отслеживания работы системы в течении какого-либо промежутка времени [10].

Полезной, а зачастую критически важной особенностью модели зачастую является поддержка языков программирования высокого уровня, что позволяет перенести программный код из модели на контроллер системы управления. Этим функционалом обладает пакет программ для математических расчётов Matlab и его надстройка Simulink.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Simulink позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени. Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать весь спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в среду MATLAB, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и научную графику [24]. Функционал среды Simulink может быть расширен благодаря такому встроенному инструменту как блоки S-function. S-function – это описание блока Simulink на языке высокого уровня (поддерживается собственный одноименный язык среды Matlab, а также широко распространенные при решении инженерных задач C, C++, FORTRAN). Блоки S-function, как и остальные блоки Sim-



ulink, могут работать в непрерывных, дискретных и смешанных системах [25]. Моделирование с использованием программного пакета Matlab Simulink является в настоящее время одним из самых популярных методов проверки работоспособности систем управления. Так, известна компьютерная модель имитационного моделирования различных вариантов ветроэнергетических установок, рассмотренных в пункте 1.2, выполненная в среде Matlab Simulink (рисунок 1.16) [10].

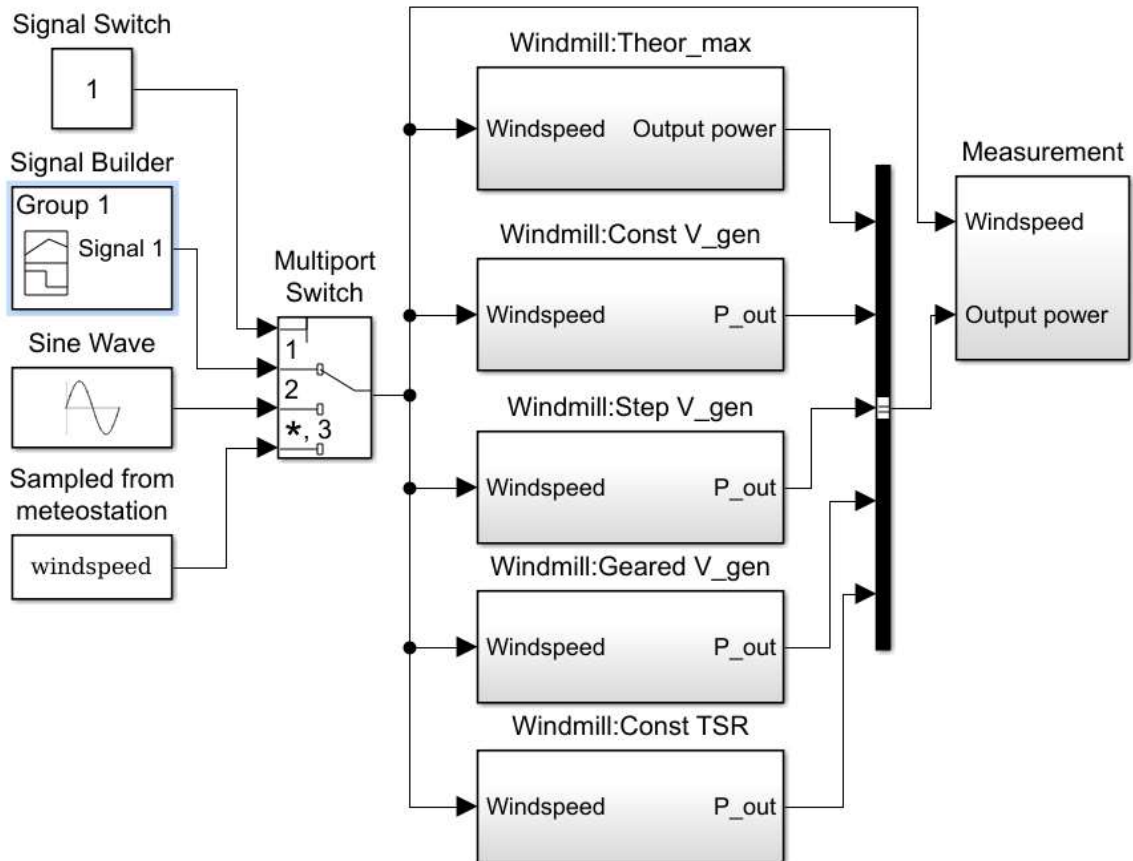


Рисунок 1.16 – Компьютерная модель ветроэнергетической установки для имитационного моделирования, выполненная в среде Matlab Simulink

Как видно из рисунка 1.16, возмущающее воздействие в системе – это скорость ветра. Функция скорости ветра от времени может быть выбрана:

- нарастающе-затухающей или постоянной (блок «Signal Builder»)
- синусоидальной («Sine Wave»);
- представлять собой некий набор записанных ранее значений («Sampled from meteostation»).

Далее сигнал поступает в блоки, имитирующие различные системы ВЭУ:

- ВЭУ, работающая при постоянной частоте вращения ветроколеса (блок «Const V\_gen»);
- ВЭУ, работающая при фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения обмоток генератора (блок «Step V\_gen»);

- ВЭУ, работающая при фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения передаточного отношения мультипликатора (блок «Geared V\_gen»);
- ВЭУ, работающая при переменной частоте вращения и использующая электрический преобразователь с регулятором мощности (блок «Const TSR»);
- блок «Theor\_max» имитирует идеальную систему, в которой получаемая мощность максимальна (параметры системы всегда находятся в точке максимальной мощности MPP ветроэнергетической установке).

Каждый блок, имитирующий ту или иную систему, включает в себя модуль ветродвигателя (блок «Windmill»), модуль электрического генератора (блок «Alternator») и модуль блока управления (блок «Charge Controller»).

Блок-схема модели ветродвигателя приведена на рисунке 1.17. Блок имитирует работу ветродвигателя по следующему уравнению:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_A - M_{ЭМ} - M_C, \quad (1.8)$$

где  $J$  – момент инерции системы, является конструктивным параметром,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения ветроколеса,  $\text{рад/с}$ ;

$M_A$  – аэродинамический момент системы,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

$M_{ЭМ}$  – электромеханический момент системы, который создаётся электрическим генератором,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

$M_C$  – момент сопротивления и потерь учитывающий трение и другие потери,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

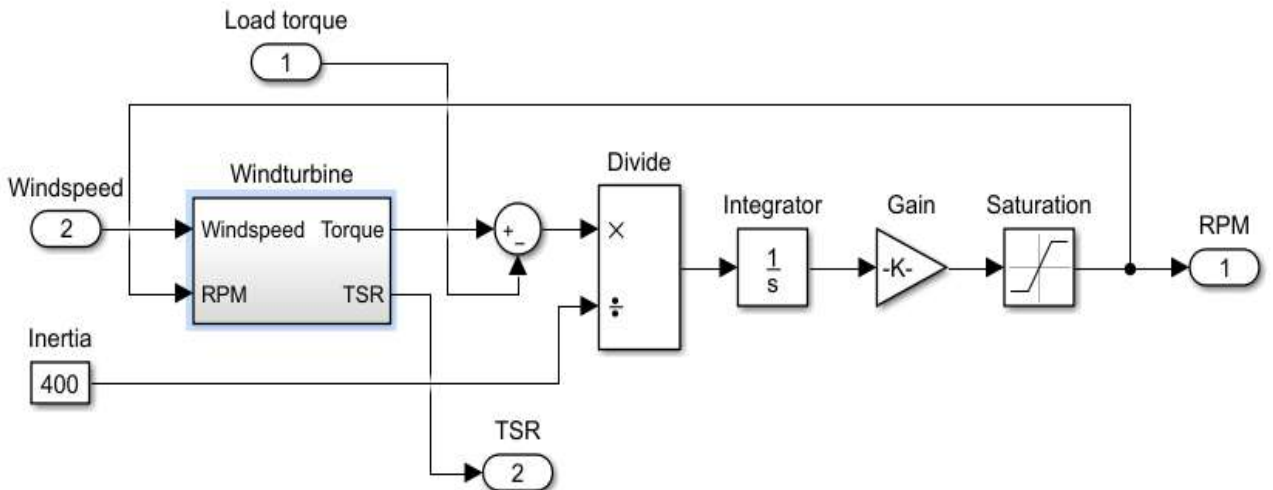


Рисунок 1.17 – Блок-схема модели ветродвигателя

Блок «Windturbine» имитирует работу ветроколеса ВЭУ. Входными данными для него являются скорость ветра и частота вращения ротора ветроколеса, а выходными – аэродинамический момент  $M_A$  и текущая быстроходность (рисунок 1.18).

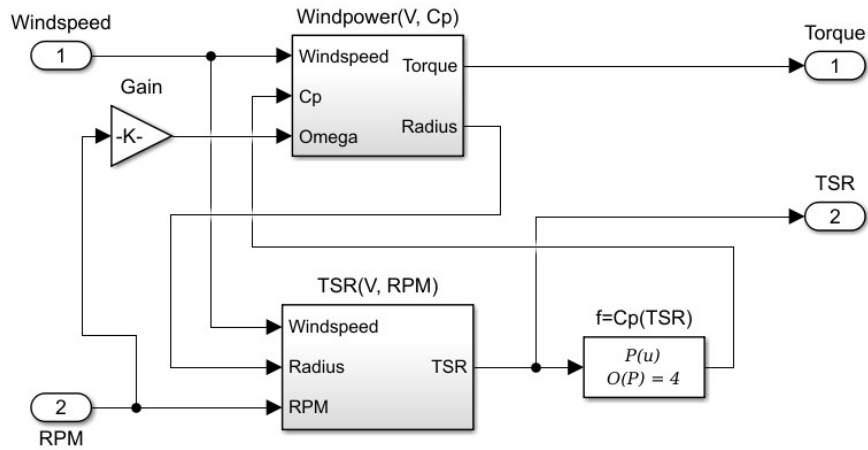


Рисунок 1.18 – Блок-схема ветроколеса ВЭУ

В блоке «Windpower» производится расчёт аэродинамического момента следующим образом (рисунок 1.19):

$$M_A = C_P(Z) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega}, \quad (1.9)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $S$  – ометаемая площадь, м<sup>2</sup>.

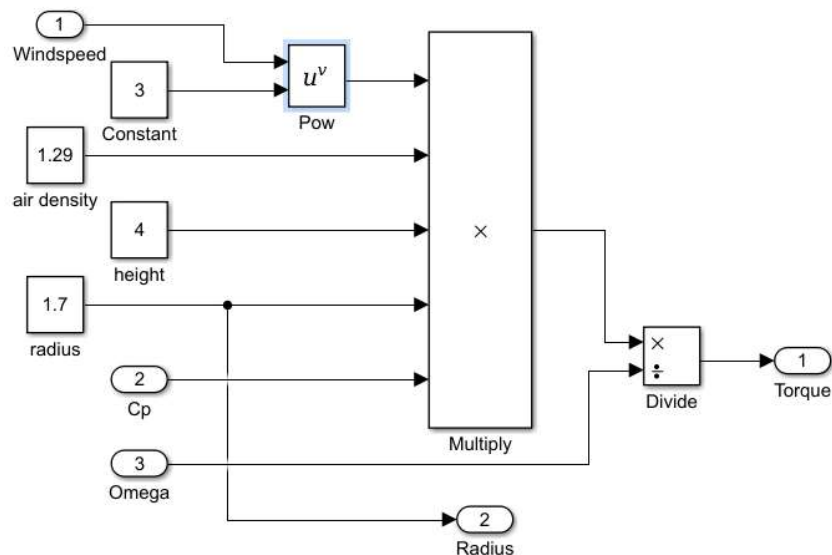


Рисунок 1.19 – Блок-схема вычисления аэродинамического момента

Расчёт производится по геометрическим размерам ВЭУ с вертикальной осью вращения, произведенной ООО «ГРЦ-Вертикаль» (модель ВЭУ-3).

В блоке «TSR» производится расчёт текущей быстроходности по уравнению (1.1) (рисунок 1.20).

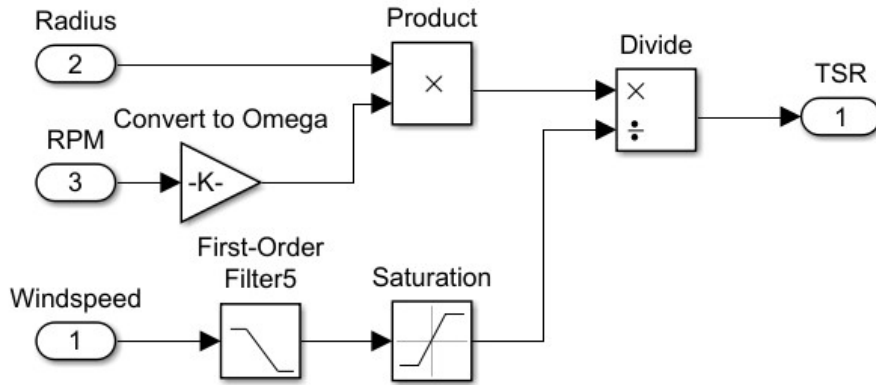


Рисунок 1.20 – Блок-схема расчёта быстроходности

В рассматриваемой работе КИЭВ аппроксимируется и вычисляется по текущей быстроходности с помощью зависимости следующего вида:

$$C_p(Z) = \left( \frac{c_1}{Z} - c_2 \right) \cdot e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4, \quad (1.10)$$

где  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – безразмерные коэффициенты, которые подбираются эмпирически для заданной конструкции ветроколеса; как и в случае геометрическими размерами ветроколеса, коэффициенты были подобраны для ВЭУ с вертикальной осью вращения.

Результатом вычисления модуля «Windmill» является угловая скорость вращения ветроколеса; кроме того, в системе с отслеживанием быстроходности используется текущая рассчитанная быстроходность.

Блок «Alternator» имитирует работу электрического генератора ВЭУ. ЭДС обмоток генератора вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2 \cdot p \cdot \omega \cdot t); \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2 \cdot p \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2 \cdot p \cdot \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \end{cases} \quad (1.11)$$

где  $e_A, e_B, e_C$  – ЭДС соответствующей фазы генератора, В;

$k$  – коэффициент конструкции генератора, может быть определен как аналитически, так и измерением характеристик реального объекта, В·с/рад;

$2 \cdot p$  – число пар полюсов;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора генератора, рад/с;

$t$  – текущий момент времени с начала отсчёта, с.

Напряжение фазной обмотки:

$$u = e - r \cdot i - L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (1.12)$$

где  $e$  – ЭДС, В;

$r$  – активное сопротивление фазной обмотки, Ом;

$i$  – ток фазной обмотки, А;

$L$  – индуктивность фазной обмотки, Гн.

Индуктивное сопротивление было принято равным нулю с целью снижения влияния параметров электрической машины на результаты экспериментов.

Электрохимический момент, создаваемый генератором, рассчитывается исходя из ЭДС, тока обмотки и текущей угловой скорости вращения ротора:

$$M_{\text{эм}} = \frac{e \cdot i}{\omega}. \quad (1.13)$$

Таким образом, входными параметрами блока являются угловая скорость вращения ветроколеса и ток в обмотке, определяемый блоком «Charge Controller». Блок «Alternator» вычисляет текущее значение ЭДС в обмотках генератора, величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмоток, а также тормозной электрохимический момент, возникающий в генераторе при работе на заданную нагрузку. Выходными параметрами модуля является напряжение и тормозной момент на валу генератора. Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей на постоянной частоте вращения, приведена на рисунке 1.21.

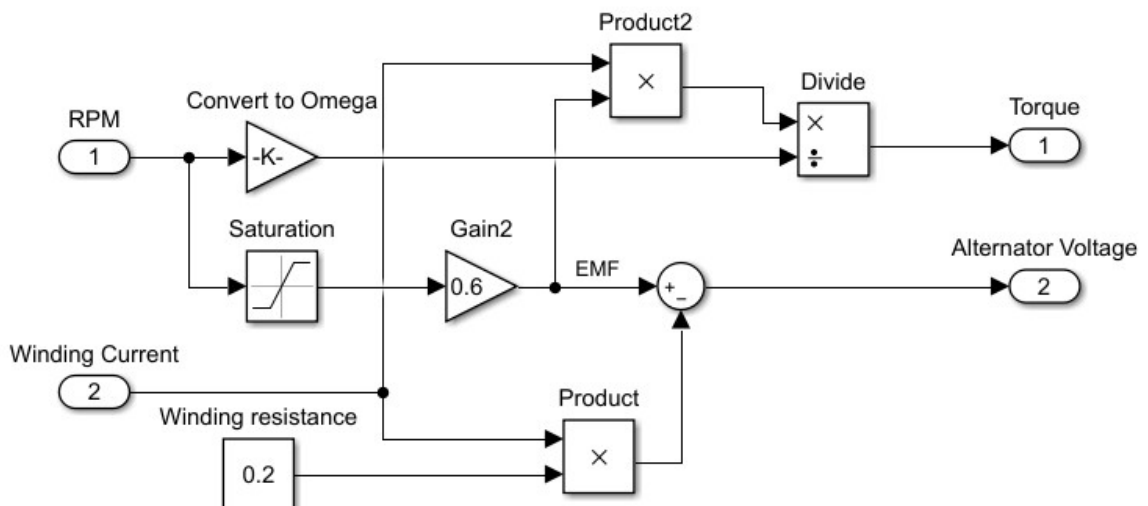


Рисунок 1.21 – Блок-схема генератора ВЭУ, работающей на постоянной частоте вращения

Система с ВЭУ, работающая на фиксированных частотах вращения путём переключения обмоток генератора, обладает отличительной особенностью: для переключения обмоток генератора используется входной сигнал «Step» от блока «Windmeter», в зависимости от которого в модели применяются те или иные величины параметров обмоток. Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающая на фиксированных частотах вращения путём переключения обмоток генератора, приведена на рисунке 1.22.

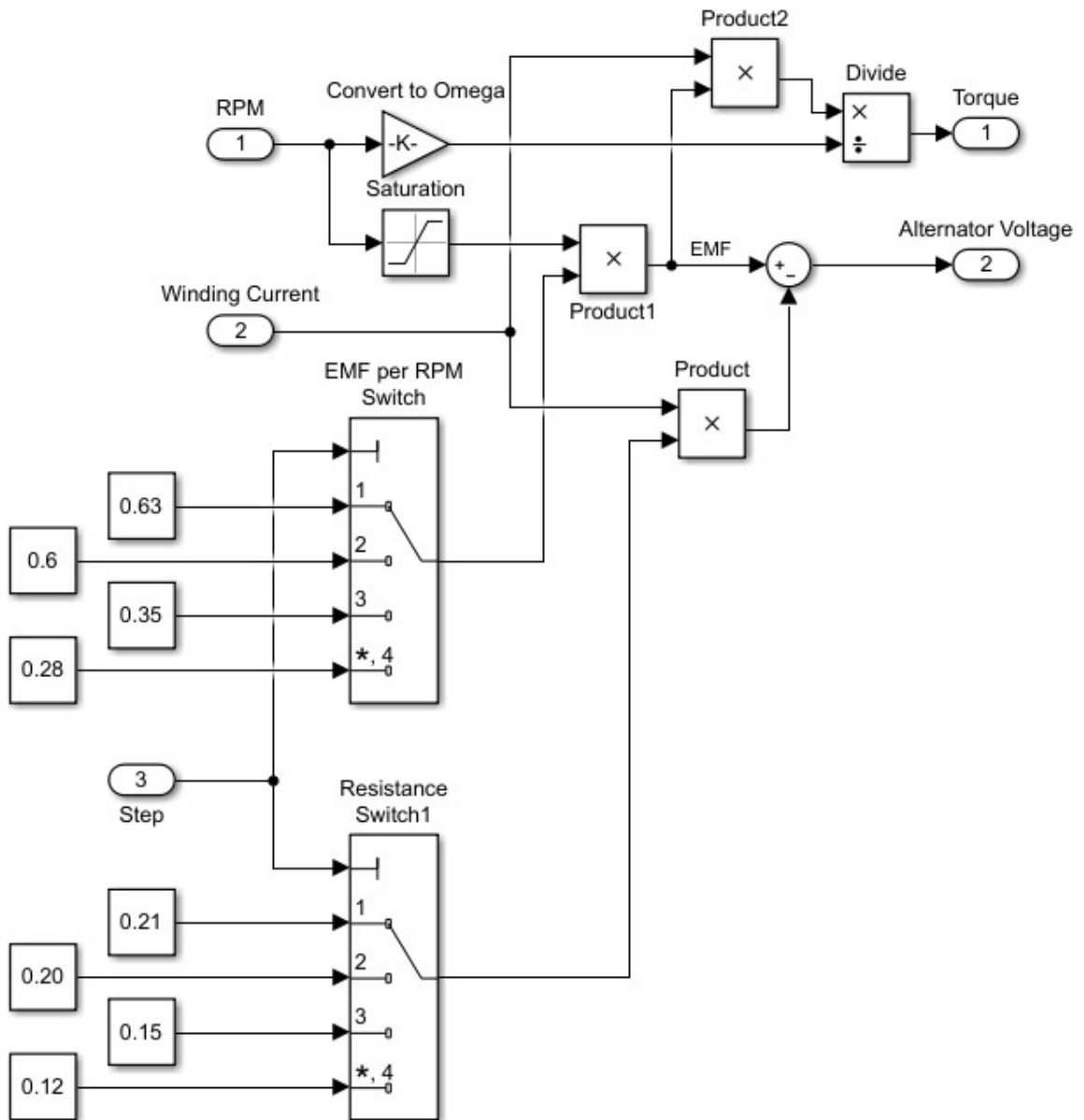


Рисунок 1.22 – Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей на фиксированных частотах вращения путём переключения обмоток генератора

Модель системы с ВЭУ, работающей при фиксированных частотах вращения ветроколеса переключением передаточного отношения мультипликатора, включает в себя блок, имитирующий работу коробки передач. Переключение передаточных чисел осуществляется напрямую измерителем скорости ветра (блок

«Windmeter»). Рассчитанный таким образом крутящий момент и угловая скорость передаются в блок «Alternator», блок-схема модели которого приведена на рисунке 1.23.

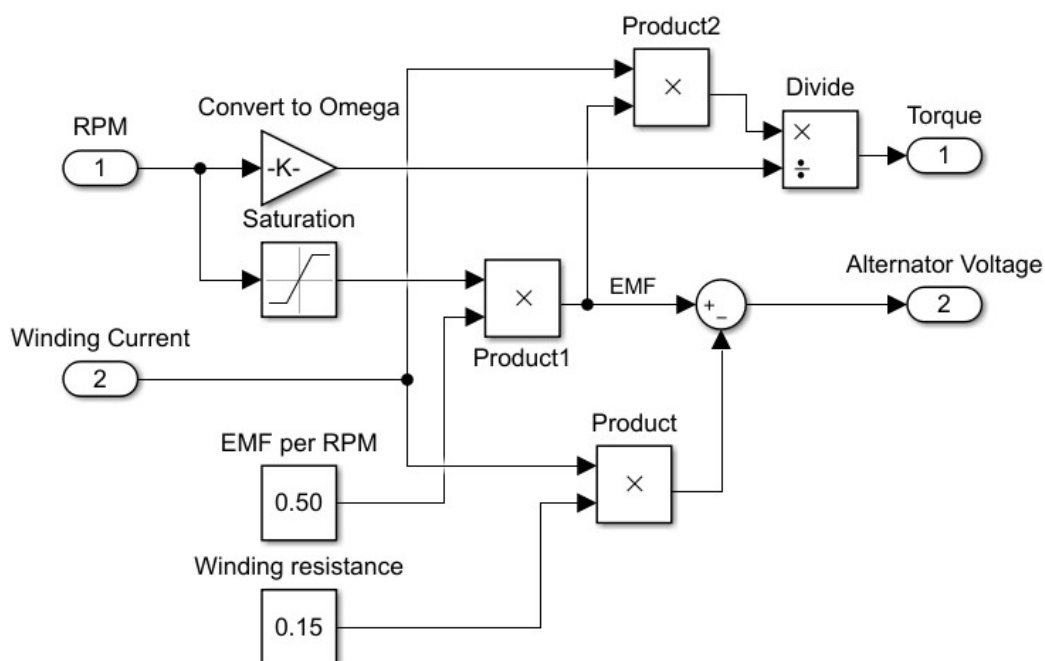


Рисунок 1.23 – Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей при фиксированных частотах вращения ветроколеса путем переключения передаточного отношения мультипликатора

Блок «Alternator» модели системы, работающей на переменных частотах вращения (рисунок 1.24), схож по принципу работы с аналогичным ему блоком в системе с ВЭУ, работающей на постоянной частоте вращения.

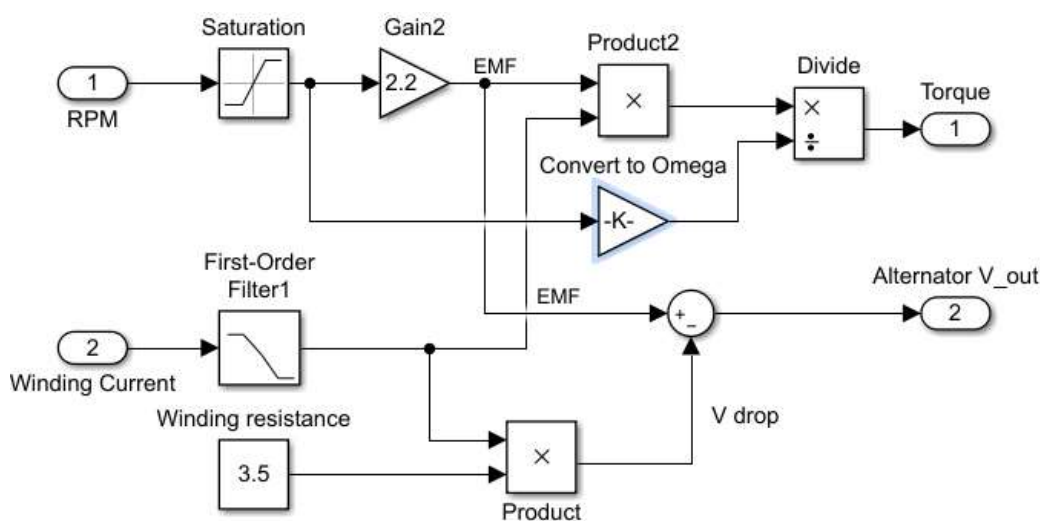


Рисунок 1.24 – Блок-схема модели генератора ВЭУ, работающей на переменных частотах вращения

Блок «Charge Controller» в системе с постоянной частотой вращения и системах с фиксированными частотами вращения представляет из себя модуль, который имитирует работу контроллера заряда аккумуляторной батареи. В этом модуле ток заряда аккумуляторной батареи рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{ЗАР}} = \frac{U_{\text{ГЕН}} - U_{\text{АКБ}}}{R},$$

где  $U_{\text{ГЕН}}$  – выпрямленное напряжение генератора, В;

$U_{\text{АКБ}}$  – напряжение аккумуляторных батарей, В. Для устранения влияния процесса заряда аккумуляторной батареи на систему в целом, и, как следствие, изменения тока заряда, принято постоянным и равным 48 вольт;

$R$  – внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, Ом. Также принято постоянным и равным 0,01 Ом.

Блок-схема модуля контроллера заряда для систем с постоянной и фиксированными частотами вращения приведена на рисунке 1.25.

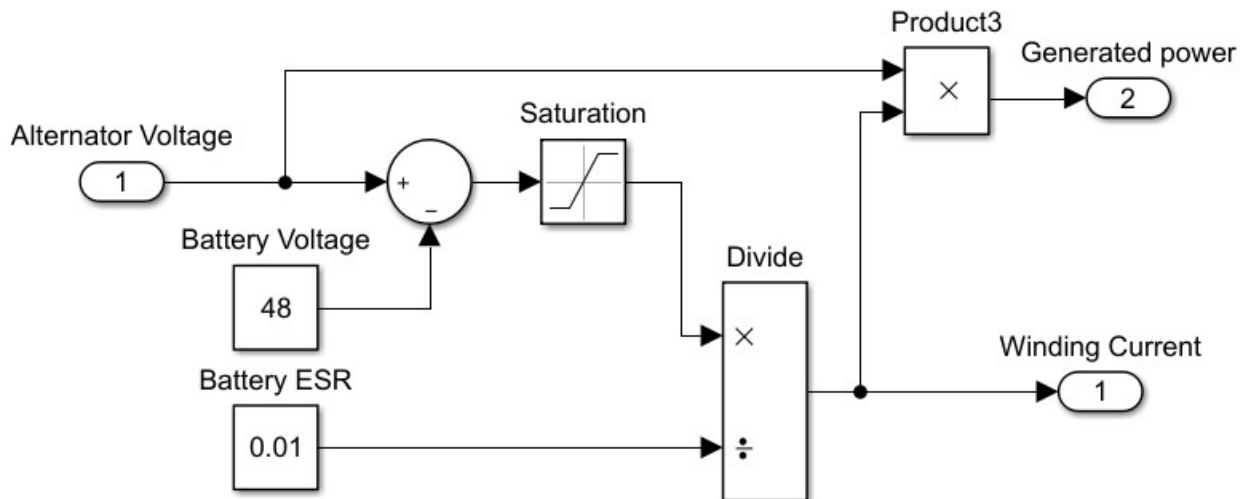


Рисунок 1.25 – Блок-схема модели контроллера ВЭУ, работающего на постоянных и фиксированных частотах вращения

В системе с отслеживанием быстроходности модуль «Controller» имитирует работу контроллера заряда аккумуляторной батареи и системы управления, обеспечивающей необходимые режимы работы ВЭУ, при этом происходит регулирование зарядного тока аккумуляторной батареи с помощью путем моделирования электрического преобразователя. Блок-схема контроллера приведена на рисунке 1.26. В этой модели ток в аккумуляторной батарее напрямую зависит от напряжения генератора, поскольку напряжение и сопротивление аккумуляторной батареи считаются неизменными. Это упущение позволяет исключить влияние электрохимических процессов, проходящих в батареях. Однако стоит заметить, что это упущение ведет к существенным отклонениям от реальных условий.



Кроме того, применение электрического преобразователя и контроллера позволяет ограничивать ток заряда аккумуляторных батарей при высоких оборотах (блок «Rectifier»).

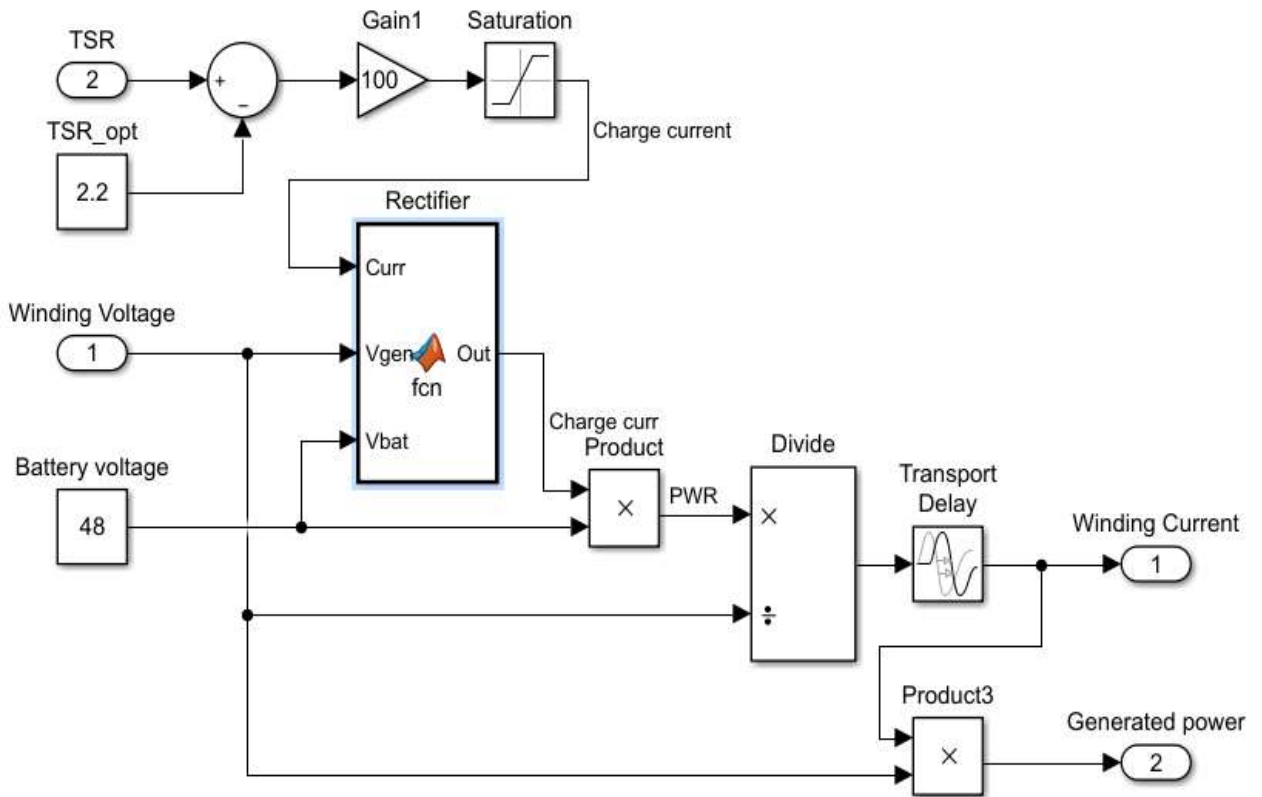


Рисунок 1.26 – Блок-схема модели контроллера ВЭУ, работающей на переменных частотах вращения

В процессе исследования в рассматриваемой работе каждая система по отдельности была подвергнута различным типам изменения скорости ветра (нарастающе-затухающей, синусоидальной, представляющей собой набор записанных ранее значений); кроме того, было проведено сводное тестирование различных типов систем. Измерения проводились в блоке «Measurement», где были рассчитаны интегральный и средний КИЭВ по следующим соотношениям:

$$C_{\text{СРЕДН.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{ЭЛ}i}}{P_{\text{А}i}}}{n},$$

где  $C_{\text{Средн.}}$  – среднее значение КИЭВ;

$P_{\text{ЭЛ}i}$  –  $i$ -ое мгновенное значение полученной электрической мощности, Вт;

$P_{\text{А}i}$  –  $i$ -ое мгновенное значение аэродинамической мощности, Вт;

$n$  – количество измерений.

$$C_{\text{РИНТ}} = \frac{\int P_{\text{Эл}}(t)dt}{\int P_{\text{Аи}}(t)dt},$$

где  $C_{\text{РИНТ}}$  – интегральное среднее значение КИЭВ.

Результаты сводного тестирования показали, что наибольшей эффективностью при изменяющихся скоростях ветра обладает модель, работающая на переменных частотах вращения. Её показатели оказались близки к идеализированной системе, которая постоянно находится в точке максимума (блок «Theor\_max»).

### Выводы по разделу 1

В разделе 1 были рассмотрены теоретические аспекты функционирования систем управления ВЭУ. Были рассмотрены:

- задача поддержания максимальной мощности и необходимость её решения;
- понятие систем управления ВЭУ, их типы и роль в выполнении задачи поддержания максимальной мощности ВЭУ;
- методы поиска точки максимальной мощности (с использованием и без использования механических датчиков);
- имитационное моделирование как один из основных инструментов при проектировании систем управления ВЭУ;
- модель Мартьянова А.С. имитационного моделирования различных методов регулирования мощности ВЭУ.

Для дальнейшей разработки модели системы управления в качестве методов поиска максимальной мощности был выбран метод поиска экстремума функции мощности, который не нуждается в дополнительных датчиках, контролирующих скорость ветра. В качестве основы дальнейших исследований была выбрана модель имитационного моделирования различных методов регулирования мощности Мартьянова А.С. Поскольку данный алгоритм работает при переменных скоростях ветра и при этом не нуждается в задействовании таких дополнительных устройств как мультипликатор и устройство ступенчатого переключения обмоток генератора, то для дальнейшей разработки была выбрана система, использующая контроль быстроходности (модуль «Const\_TSR»). Тем не менее, дальнейшей проработки требует модуль контроля заряда и системы управления ВЭУ, которая должна выполнять поиск точки максимальной мощности.

## 2 СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЭУ

### 2.1 Разработка структурной схемы

Как уже было отмечено ранее, ВЭУ, работающие на переменной частоте вращения, показывают наилучшую эффективность по сравнению с другими системами. В условиях изменяющейся скорости ветра, и, как следствие, и скорости вращения ротора генератора, изменяется частота и амплитуда напряжения генератора. Поэтому в таких системах как правило возникает потребность в согласовании токов и напряжений различной формы. С этой целью применяются различные технические устройства, которые для наглядности представляют в виде структурной схемы, которая показывает взаимосвязь устройств между собой. Это позволяет осуществить их согласование, подобрать необходимые устройства, а также оценить, какие именно устройства подлежат контролю со стороны системы управления.

ВЭУ, работающая на переменных частотах вращения, как правило состоит из следующих компонентов (рисунок 1.7):

- ветродвигатель – устройство, преобразующее кинетическую энергию набегающих потоков воздуха в механическую энергию вращения. Включает в себя ветроколесо и другие вспомогательные компоненты;
- электрический генератор – устройство, преобразующее механическую энергию вращения ротора в электрическую;
- выпрямитель и электрический преобразователь – устройства, преобразующие параметры электрической энергии;
- аккумуляторная батарея – устройство, используемое для запасания энергии в химическом или каком-либо другом виде.

Наиболее распространенным в настоящее время типом ветроколеса являются горизонтально-осевые установки. Они имеют достаточно высокий КИЭВ – около 0,45. Кроме того, их применение удобно в крупных установках, где механическая прочность достигается увеличением площади поперечного сечения применяемых конструкций. Как правило, их размещают там, где ветра имеют преимущественно постоянное направление. В случае непостоянства направления используются дополнительные приводы, ориентирующие ветроколесо в соответствии с направлением ветра. Необходимость подстройки под направление ветра существенно усложняет конструкцию и увеличивает стоимость установки в целом. Это существенно затрудняет применение установок данного типа в малой ветроэнергетике. К недостаткам данной конструкции можно отнести также повышенный шум из-за эффекта «срыва потока».

ВЭУ с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема при необходимости позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни.

Принципиальными недостатками таких установок являются:

- гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за часто возникающих в них автоколебательных процессов;
- пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора
- необходимость запуска ветроколеса в двигательном режиме из «мертвого положения» [17].

Тем не менее, моделирование и расчёт колебательных процессов, происходящих в вертикально-осевых ВЭУ, а также применение современных материалов устраняет существующие недостатки и делает такой тип ветроколес перспективным, а применение определенного угла атаки позволяет решить проблему страгивания.

Синхронные генераторы на постоянных магнитах всё чаще применяются при разработке новых систем ВЭУ. Их выбор зачастую оправдан, поскольку они обладают высокой эффективностью, большей удельной мощностью на единицу массы, доступностью высокоэффективных магнитных материалов по относительно низкой цене и возможностью установки турбин с меньшим диаметром в системах с прямым приводом. В настоящее время проводится множество исследований систем с синхронными генераторами на постоянных магнитах, которые являются достаточно надёжными, устойчивыми к износу, компактными, тихими и дешёвыми. Как правило, такие системы применяются в системах с прямым приводом, то есть без коробки передач или других устройств регулирования помимо электрического преобразователя [35].

Поскольку энергия, получаемая от возобновляемых источников энергии, обладает ярко выраженным непостоянством, то в автономных системах, использующий возобновляемые источники энергии широко применяются устройства запаса энергии. Такие устройства позволяют сглаживать пики выработки и потребления энергии. В большинстве случаев в качестве накопителей используются химические аккумуляторы, однако возможны и другие устройства запасания энергии – например, маховики или суперконденсаторы.

Поскольку в настоящее время существующие и наиболее распространенные химические аккумуляторы рассчитаны на постоянное напряжение, возникает проблема согласования переменного трёхфазного напряжения с напряжением аккумуляторов. Поэтому в ВЭУ малой и очень малой мощности часто применяется преобразование переменного напряжения обмоток трёхфазного генератора сначала в постоянный ток с целью заряда аккумуляторов. В качестве выпрямителей могут применяться как управляемые (выполненные на тиристорах, либо транзисторах), так и неуправляемые выпрямители (выполненные на диодах). Одним из часто применяемых выпрямителей является мост Ларионова, который часто выполняют на диодах (рисунок 2.1). По сравнению с мостом, выполненном на транзисторах и тиристорах, он более прост, поэтому не требует дополнительной системы управления, а также является куда более надёжным средством преобразования формы напряжения.

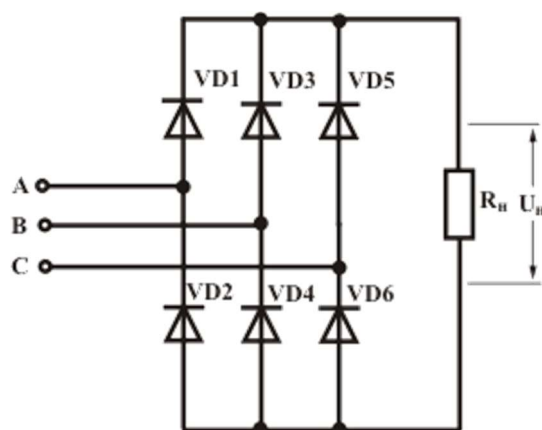


Рисунок 2.1 – Трёхфазный выпрямитель с использованием диодов

Выпрямленное напряжение фактически не является постоянным, в нём всегда будут присутствовать пульсации. Для их устранения применяют конденсаторные фильтры, способствующие усреднению напряжения и снижению пульсаций.

После фильтра напряжение становится близким к постоянному, однако его амплитуда может быть достаточно высокой, что может вызвать значительные токи заряда аккумуляторных батарей, которые негативно сказываются на работе устройств-накопителей энергии. Поэтому рационально использовать ШИМ для конвертации одного уровня напряжения в другой. Для генерации ШИМ используется силовой транзистор, работающий в ключевом режиме, и система его управления. При подаче системой управления напряжения на вывод базы транзистора, он открывается и пропускает ток, который в дальнейшем заряжает ШИМ-фильтр, состоящий из индуктивности и ёмкости. При снятии напряжения с вывода базы транзистора он закрывается, и ток перестаёт протекать.

Устройством, которое преобразует постоянное напряжение аккумуляторной батареи в переменное напряжение потребителей, является инвертор. В настоящее время выпускаются инверторы различными входными напряжениями, обычно кратными 12 В (номинальному напряжению аккумуляторной батареи). С увеличением напряжения батарей уменьшается потребляемый ток (при одной и той же мощности), поэтому в полностью автономных энергосистемах обычно применяют напряжение аккумуляторов (и как следствие, и инверторов) 48 В.

При высоких скоростях ветра, характерных, например, некоторым приморским и северным регионам, установка может быть раскручена до скоростей, на которых начинается её ускоренное разрушение. На таких скоростях могут проявляться резонансные явления, усиливаются вибрации, что приводит к износу подшипников, искривлению мачты, поломке лопастей и другим неисправностям. Для недопущения раскручивания ветроколеса выше некоторой определённой скорости в структуре ВЭУ должен быть предусмотрен тормоз.

Кроме того, устройств торможения может быть несколько для повышения надёжности, в аварийных ситуациях и для снижения нагрузки на отдельное устройство торможения.

Управление режимами работы установки осуществляет микроконтроллер. Для обеспечения нормальной работы устройства управления ВЭУ, необходимо получить данные о следующих параметрах:

- температура обмоток генератора. В случае перегрева генератора возможен повышенный износ изоляции обмоток, а также их контакт между собой, что недопустимо. Поэтому необходимо отключить нагрузку генератора для прекращения протекания тока, который и является причиной перегрева генератора;
- частота вращения генератора может быть определена непосредственно (используя различные варианты датчиков, например, датчики Холла) либо рассчитана на основе конструктивных параметров генератора;
- текущее напряжение аккумуляторной батареи, необходимое для определения степени её заряда и необходимости отключения нагрузки (для предотвращения переразряда), либо прекращения заряда постоянным током и поддержания постоянного напряжения;
- ток, поступающий с фильтра ШИМ и ток, выдаваемый на нагрузку постоянного напряжения (за исключением аккумуляторных батарей) для правильной оценки текущего тока заряда аккумуляторных батарей и информирование потребителя;
- текущее значение напряжения после фильтра для правильного определения коэффициента заполнения ШИМ-сигнала;
- для алгоритмов векторного управления генератором могут применяться наблюдатели за текущим углом поворота ротора.

Эти данные микроконтроллер получает с помощью датчиков. Датчики преобразуют входное воздействие (температуру, напряжение, ток и др.) в аналоговый, либо цифровой сигнал, который подается на входы микроконтроллера, и далее им обрабатывается. Исходя из полученного значения, микроконтроллер должен осуществить какое-либо действие, либо продолжить выполнение остальной части программы.

Поскольку чаще всего микроконтроллеры оперируют достаточно низкими диапазонами напряжений (например, до 3,3 В), то они не могут осуществлять непосредственное управление цепями. Для согласования уровней напряжений микроконтроллера и внешней (по отношению к нему) цепи применяются промежуточные звенья – устройства согласования (УС). Помимо основной функции – непосредственно согласования различных уровней напряжения, они могут осуществлять также гальваническую развязку, т.е. передачу электрической энергии без электрического контакта между ними, либо передачу лишь логического сигнала (оптопары). Это повышает надёжность системы, поскольку выход из строя одного из устройств согласования не ведет к выходу из строя других частей системы. Микроконтроллер для обеспечения своей работы требует источник питания определенного напряжения. Поэтому в структурной схеме необходимо предусмотреть источник питания, осуществляющий преобразование напряжения аккумуляторных батарей к напряжению питания микроконтроллера. Питания требуют также и устройства согласования, и датчики. Структурная схема электрической системы ВЭУ приведена на рисунке 2.2.

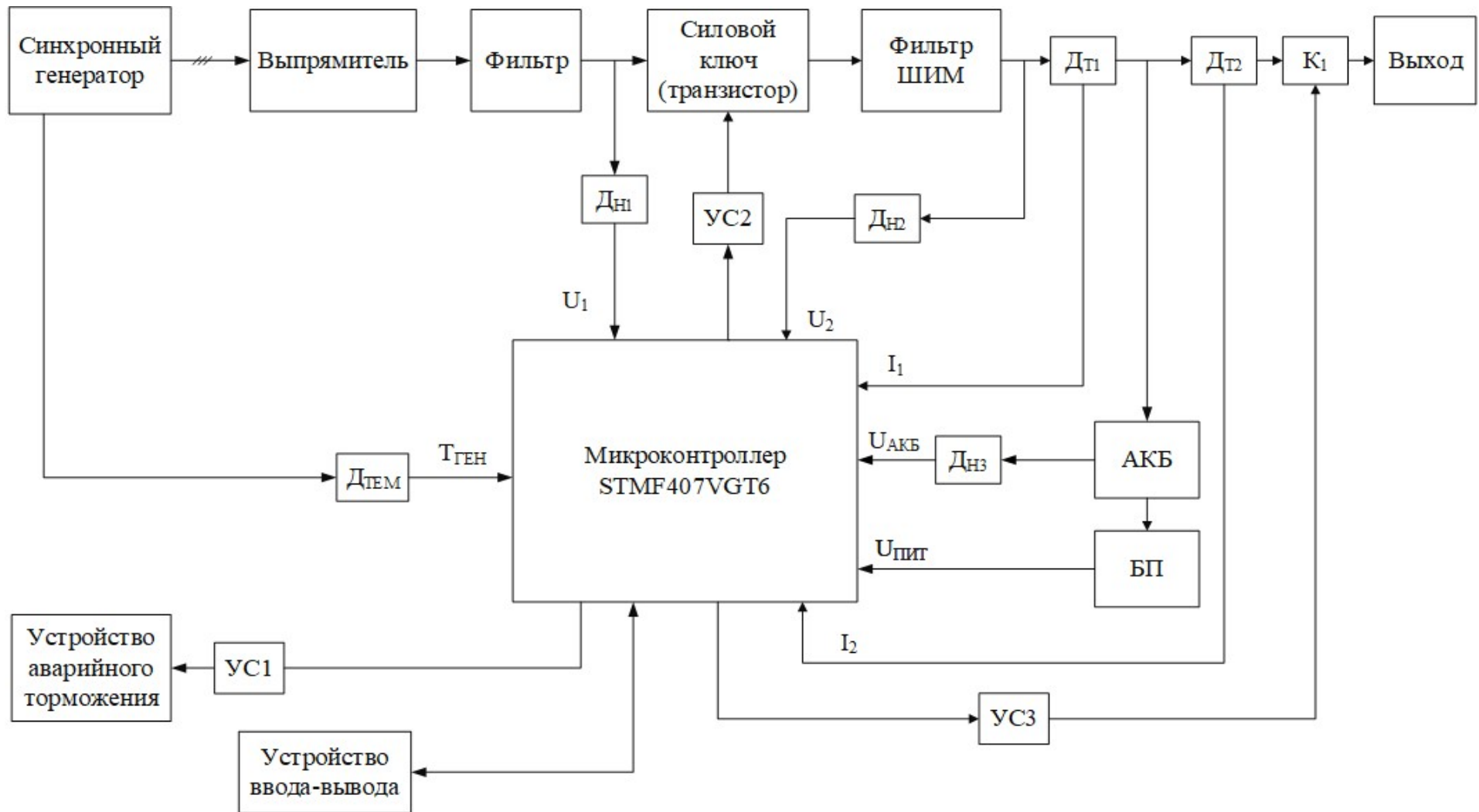


Рисунок 2.2 – Структурная схема автономной системы с использованием ВЭУ в качестве источника электрической энергии

Основными элементами структурной схемы являются:

- синхронный генератор на постоянных магнитах;
- неуправляемый выпрямитель, представляющий из себя трехфазный диодный мост;
- фильтр выпрямителя, необходимый для фильтрации пульсаций;
- силовой ключ (транзистор), с помощью которого осуществляется регулирование отбора мощности нагрузки с помощью изменения коэффициента заполнения ШИМ;
- устройство аварийного торможения. Оно может представлять собой, например, электромеханический тормоз;
- фильтр ШИМ, необходимый для интегрирования ШИМ-импульсов;
- датчики тока  $D_{T1}$ ,  $D_{T2}$ , измеряющие токи, поступающие на нагрузку целиком и во внешнюю цепь соответственно. Осуществляют пропорциональное преобразование уровня тока в напряжение, лежащее в допустимом для микроконтроллера диапазоне;
- датчики напряжений  $D_{H1}$ ,  $D_{H2}$ , необходимые для оценки коэффициента заполнения ШИМ, которые также осуществляют пропорциональное снижение уровня напряжений в допустимый диапазон;
- датчик напряжения  $D_{H3}$ , необходимый для получения информации о напряжении на аккумуляторной батарее;
- устройства согласования УС1, УС2, УС3, УС4;
- блок питания БП, необходимый для питания микроконтроллера и периферии датчиков и устройств согласования. При необходимости в функционал БП может быть включено резервное питание. Эта функция необходима в случае разряда аккумуляторов. В этом случае питание микроконтроллера и периферии осуществляется за счёт аварийной аккумуляторной батареи, встроенной в блок питания;
- датчик температуры, который также может быть выполнен в различных технических исполнениях – в виде медной обмотки, меняющей своё сопротивление с изменением её температуры, либо в виде терморезисторов. Помимо основного устройства, реагирующего на изменение температуры, датчики должны быть включать в себя устройство, преобразующее ток, проходящий непосредственно через датчик, в пропорционально соответствующий уровень напряжения;
- к выходу данной системы может быть подключен инвертор, имеющий номинальное входное сопротивление 48 В, либо нагрузка постоянного тока. В случае отсутствия у инвертора защитного отключения при снижении напряжения ниже заданного, в структурной схеме предусматривается ключ  $K_1$ , размыкающий нагрузку с целью недопущения переразряда аккумуляторных батарей;
- с целью информирования персонала на структурной схеме ВЭУ предусмотрен дисплей. На нём выводится актуальная информация о текущем состоянии датчиков. Помимо этого, с помощью кнопок будет возможно регулирование констант алгоритма работы микроконтроллера.



## 2.2 Разработка алгоритма работы системы управления

Разработанный алгоритм работы системы управления оперирует следующими параметрами, вычисляя или получая их от датчиков:

- выпрямленное напряжение  $U_1$ ;
- напряжение после ШИ-модулятора  $U_2$ ;
- ток, поступающий с ШИ-модулятора (суммарный ток, поступающий на нагрузку – аккумуляторы и выход)  $I_1$ ;
- ток, поступающий на выход (например, в инвертор)  $I_2$ ;
- ток заряда аккумуляторных батарей  $I_3$ ;
- напряжение на аккумуляторных батареях  $U_{АКБ}$ ;
- температура генератора  $T_{GEN}$ ;
- мощность генератора  $P$ .

Постоянные величины:

- прибавка к напряжению  $\Delta U$ , необходимая для компенсации просадки напряжения генератора при подключении нагрузки;
- минимально-допустимое напряжение на аккумуляторных батареях, при которых ещё возможна их работа без деградации  $U_{АКБMIN}$ ;
- максимально-допустимое напряжение на аккумуляторных батареях, при которых ещё возможна их работа без деградации  $U_{АКБMAX}$ ;
- максимальное напряжение после фильтра ШИМ  $U_{2MAX}$ ;
- максимально допустимое выпрямленное напряжение  $U_{1MAX}$ ;
- значение абсолютной погрешности зарядового тока, допустимой при заряде аккумуляторов  $\Delta I$ ;
- ёмкость аккумуляторной батареи, исходя из которой рассчитывается допустимый ток заряда,  $C$ ;
- некоторое предзаданное  $U_{TH2}$ , которое несколько превышает  $U_{MIN}$  и служит одним из условий подключения нагрузки;
- максимальная температура генератора  $T_{GENMAX}$ ;

Управляемые (изменяемые) величины:

- коэффициент заполнения ШИМ  $D$ ;
- шаг приближения коэффициента заполнения ШИМ к оптимальному или допустимому значению –  $\Delta D$ .

Исходя из структурной схемы (рисунок 2.2), алгоритм работы микроконтроллера должен осуществлять несколько функций:

- заряд аккумуляторных батарей с ограничением максимального тока заряда;
- не допускать выхода установки в режим с оборотами выше определенных, осуществлять экстренное торможение в случае необходимости. Поскольку структурная схема не имеет датчика частоты, то алгоритм опирается на напряжение генератора, которое, в свою очередь, зависит от частоты вращения ротора генератора;
- не допускать перегрева установки, при перегреве осуществлять установку коэффициента заполнения  $D$  равным 0 и остановку всей ВЭУ электромеханическим тормозом;

- торможение осуществлять постепенно, то есть не скачкообразным перебро- сом фронта, а с помощью ШИМ, в течение некоторого времени увеличивать коэф- фициент заполнения;
- при низких напряжениях на аккумуляторной батарее отключать выход нагрузки ключом  $K_1$  и переходить в особый режим питания от резервного источ- ника и ожидания появления требуемого по уровню напряжения  $U_1$ , не допускать «мерцания» нагрузки при отключении и подключения дополнительных мощностей вследствие неодинаковости напряжения аккумуляторных батарей при разных под- ключенных мощностях;
- не допускать перезаряда аккумуляторных батарей;
- не допускать превышения напряжения  $U_2$  максимального порогового напря- жения, характерного для инвертора;
- осуществлять диагностику внешней цепи на обрыв.

В таблице 2.1 сведены возможные аварийные ситуации и необходимые дей- ствия микроконтроллера

Таблица 2.1 – Возможные ситуации и необходимые действия микроконтроллера

Возможная ситу- ация	Необходимые действия	Примечание
$T_{GEN} > T_{GENMAX}$	$D = 0$ , электромеханический тормоз	Перегрев генератора
$U_1 > U_{1MAX}$	Электромеханический тормоз	Превышена допустимая частота враще- ния. Программа ввиду отсутствия дат- чика частоты ориентируется на $U_1$ .
$U_{AKB} > U_{AKBMAX}$	Выставить $D = \frac{U_{AKB}}{U_1}$	Полный заряд аккумуляторных батарей
$U_{AKB} < U_{AKBMIN}$	Отключить нагрузку	Полный разряд аккумуляторных батарей
$U_2 > U_{2MAXINV}$	Выставить $D = D - \Delta D$ , если $D \geq \Delta D$ , иначе отключить нагрузку и $D = 0$	Превышено допустимое напряжение на выходе, или повреждение линии
$U_1 > 0, D > 0,$ $U_2 = 0$	Электромеханический тормоз	Обрыв цепи

Обобщенно предлагаемый алгоритм можно представить в виде нескольких ча- стей:

- предварительные действия;
- анализ аварийных ситуаций датчиков и составных частей автономной си- стемы;
- расчёт коэффициента заполнения  $D$  в соответствии с текущими внешними условиями;
- анализ необходимости подключения или отключения нагрузки («Настройка LOAD»);
- применение  $D$ , а также остановка ветроколеса и коммутация нагрузки при необходимости.

Блок-схема обобщенного алгоритма представлена на рисунке 2.3.

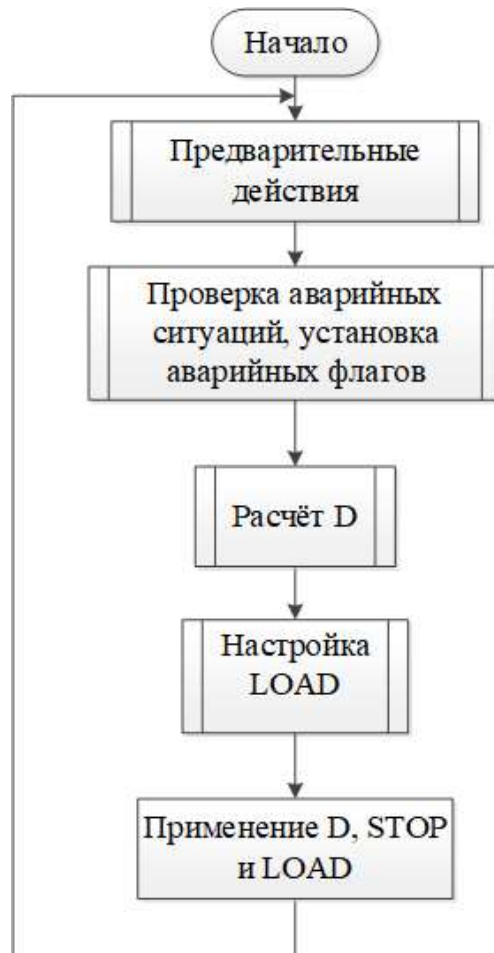


Рисунок 2.3 – Обобщённое представление алгоритма

В ходе первого этапа («предварительные действия») производятся инициализация системы управления и запуск вспомогательных устройств. Сюда относятся опрос датчиков (получение массива данных от них), сортировка и выбор среднего значения (методами медианной фильтрации, осреднения и др.) для осуществления фильтрации от помех. Полученные значения с датчиков сохраняются и считаются действительными только в данном цикле.

В ходе проверки аварийных ситуаций компонентов автономной энергосистемы осуществляется анализ на принадлежность текущих данных, получаемых от датчиков, заданному диапазону, в котором полученные данные считаются подтвержденными, то есть датчики считаются работоспособными. Затем осуществляется диагностика состояния внешних устройств и производится анализ на необходимость изменения управляющего воздействия. Это осуществляется проверкой текущих данных датчиков и выставления специальных флагов (специальных ячеек в памяти), по которым в дальнейшем программа ориентируется при осуществлении управляющих воздействий, показанных в таблице 2.1.

Блок-схемы анализа аварийных ситуаций датчиков и составных частей автономной системы приведенных на рисунках 2.4 и 2.5.

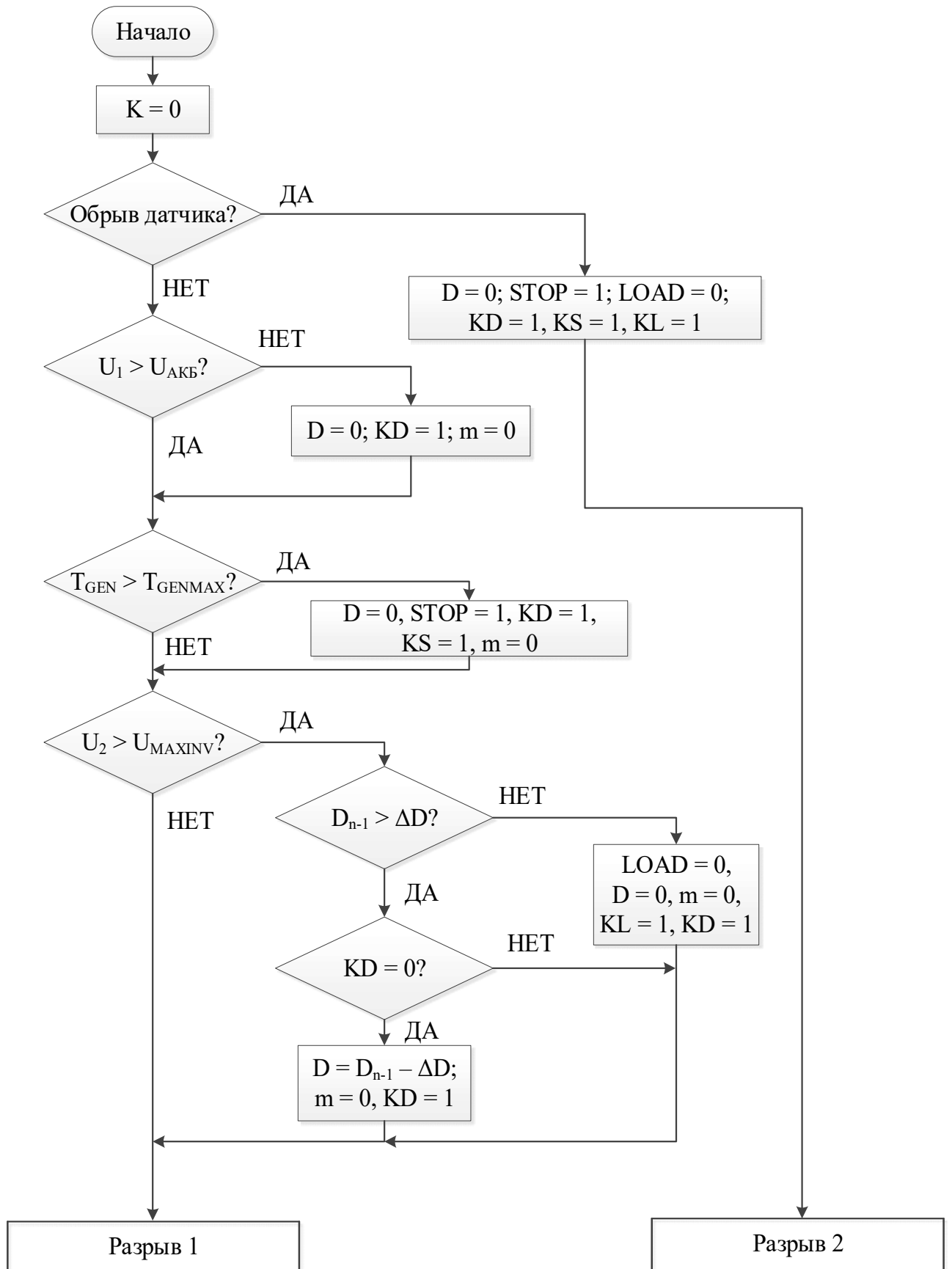


Рисунок 2.4. – Блок-схема алгоритма анализа аварийных ситуаций (начало)

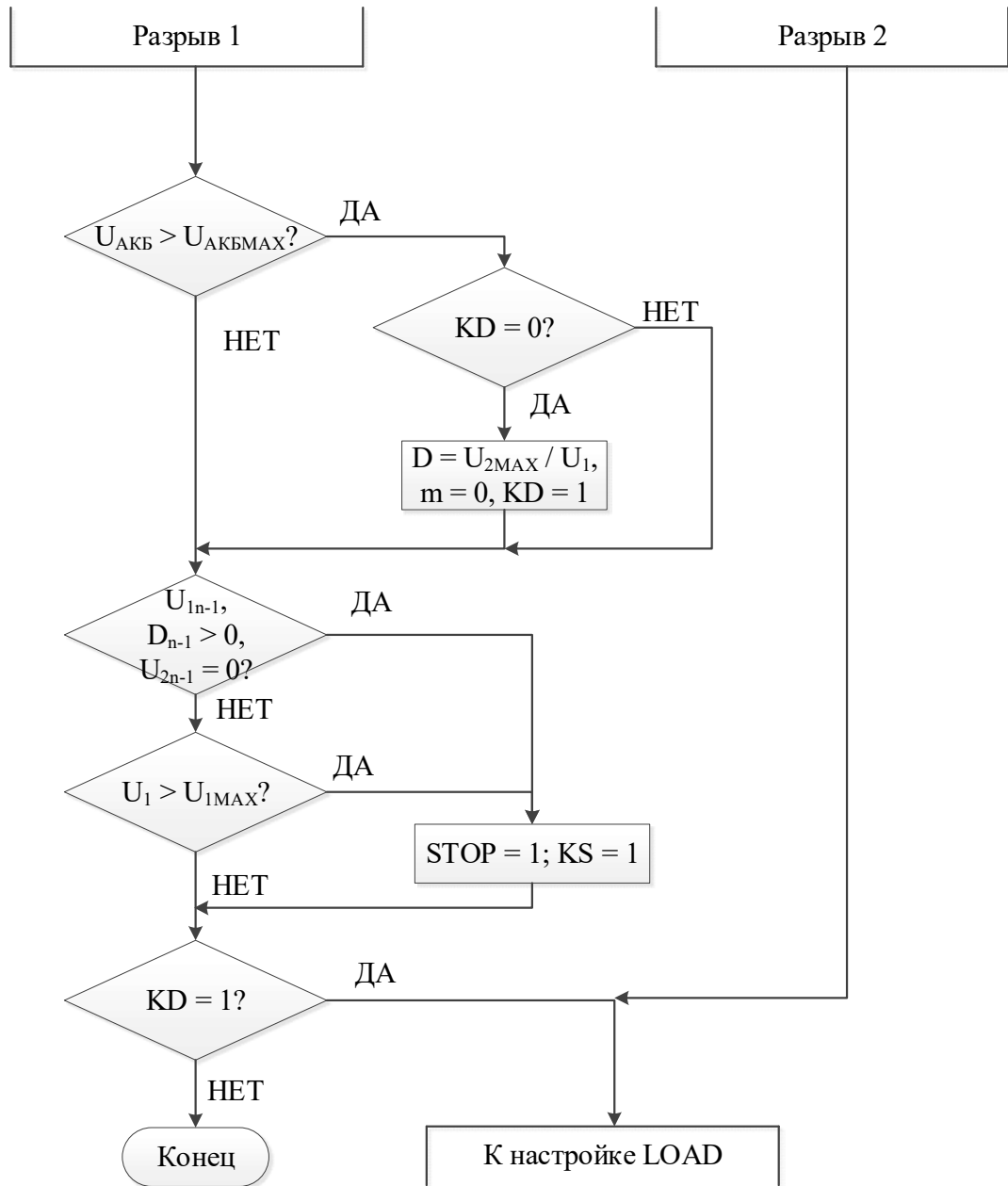


Рисунок 2.5. – Блок-схема алгоритма анализа аварийных ситуаций (продолжение)

В данных схемах предусмотрены следующие обозначения флагов, характеризующих требуемые действия от системы управления:

- действие STOP обозначает, что необходимо остановить установку электро-механическим тормозом. Ему соответствует флаг KS, который сигнализирует о том, что в ходе работы алгоритма понадобилось остановить установку;
- действие LOAD обозначает подключение нагрузки ( $LOAD = 0$ , если нагрузка отключена и  $LOAD = 1$ , если наоборот). Соответственно, флаг KL обозначает, что в ходе работы алгоритма понадобилось изменить текущее состояние нагрузки (подключенное или отключенное);

– флаг KD сигнализирует о том, что коэффициент заполнения  $D$  был изменен (например, выставлен равным 0 в какой-либо аварийной ситуации); соответственно, нет необходимости в его дальнейшем изменении (например, в ходе расчёта в дальнейшем).

Третий этап, расчёт коэффициента заполнения  $D$ , начинается с определения, в каких условиях в данный момент находится система. Согласно первому закону Кирхгоффа, ток заряда аккумулятора  $I_3$  будет равен разности тока от генератора  $I_1$  и тока в нагрузку  $I_2$ :

$$I_3 = I_1 - I_2. \quad (2.1)$$

Известно, что оптимальное значение тока заряда составляет:

$$I_3 = 0,1 \cdot C, \quad (2.2)$$

где  $C$  – суммарная ёмкость аккумуляторной батареи, А·ч [13].

Таким образом, сопоставляя вычисленное по формуле (2.1) значение тока  $I_3$  с идеальным, вычисленным по формуле (2.2), в алгоритме выполняется изменение коэффициента заполнения  $D$ :

– если  $I_3 > 0,1 \cdot C + \Delta I$ , то это означает, что при данном выставленном  $D$  ВЭУ вырабатывает больше, чем нужно нагрузке и аккумулятору для его заряда. В этом случае необходимо снизить коэффициент заполнения.  $\Delta I$  здесь – погрешность, допустимая при заряде аккумуляторов, её применение позволяет осуществить гистерезис при переходе из одного режима в другой;

– если  $0,1 \cdot C - \Delta I < I_3 < 0,1 \cdot C + \Delta I$ , коэффициент заполнения  $D$  не изменяется, поскольку все токи находятся в оптимальных диапазонах.

– если  $I_3 < 0,1 \cdot C - \Delta I$ , то это означает, что при данном выставленном  $D$  аккумулятор заряжается недостаточно большим током, либо разряжается. В этом случае необходимо проверить, найдена ли точка максимума. Если точка найдена, то это говорит о неоптимальных внешних условиях, то есть энергии ветра недостаточно для работы энергосистемы; в этом случае управляющее воздействие не изменяется. В противном случае вызывается алгоритм поиска точки максимума, который начинается с вычисления текущего значения мгновенной электрической мощности, которое рассчитывается как активная мощность:

$$P_{эл} = I_1 \cdot U_2. \quad (2.3)$$

Далее производится сравнение электрической мощности с предыдущим значением. Если текущее значение мощности превышает предыдущее измеренное (мощность возрастает, то есть  $P_n > P_{n-1}$ ), то это говорит о правильности выбранного управляющего воздействия, а значит, его следует оставить неизменным, то есть принять  $\Delta D_n = \Delta D_{n-1}$ . В противном случае, то есть если мощность не возрастает (мощность убывает или остается прежней, то есть  $P_n \leq P_{n-1}$ ), управляющее воздействие изменится. Мощность может убывать, если установка вращается слишком

быстро для данной скорости ветра, что может произойти, например, в случае снижения скорости ветра либо прохождения точки максимума мощности. В этом случае изменится и напряжение генератора, по которому и ориентируется предлагаемый алгоритм. Тогда для попадания в точку максимума необходимо снизить ток нагрузки генератора на величину  $\Delta I_n$ . Это изменение предлагается выбрать пропорциональным соотношению предыдущей и текущей измеренной мощности, то есть:

$$\Delta D = k \cdot \frac{P_{n-1}}{P}. \quad (2.4)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  может быть получен итерационным путём – последовательным моделированием с различными значениями  $k$  и последующим сравнением результатов.

Наоборот, возрастание скорости ветра приведет к тому, что увеличится и напряжение генератора. Если при этом мощность снизилась, то алгоритм управления увеличивает ток на величину  $\Delta D_n$ , которая также вычисляется по формуле (2.4).

Кроме того, в алгоритме предусмотрены следующие ограничения:

- для того, чтобы ветроколесо могло раскрутиться и выйти на нормальный режим работы, в алгоритме предусмотрено минимальное напряжение  $U_{\text{MIN}}$ , при котором управляющий ток будет снижаться на величину  $\Delta D_n$  в любом случае, независимо от анализа предыдущей ситуации. Напряжение  $U_{\text{MIN}}$  также может быть найдено итерационным путём, как и коэффициент  $k$ . Таким образом, результирующий ток будет вычисляться следующим образом:

$$D = D_{n-1} + \Delta D. \quad (2.5)$$

Формулы (2.4) и (2.5) сходны с формулами (1.6) и (1.7); разница состоит в том, что управляемым параметром является коэффициент заполнения, а не скорость вращения; помимо этого, в данном алгоритме предлагается регулирование, пропорциональное соотношению мощностей текущего и предыдущего отсчетов.

- введены дополнительные граничные значения  $I_{\text{MIN}}$  и  $I_{\text{MAX}}$ , по достижении которых ток не будет больше снижаться или увеличиваться. Минимальная граница была задана равной 0, а максимальная – равная 10 ампер из примерных характеристик генератора, применяемых для модели ВЭУ-3 вертикально-осевых установок производства «ГРЦ-Вертикаль».

- флаг КР необходим для фиксации точки максимума. Если  $КР = 1$ , то продолжается наблюдение за ростом мощности; однако если в текущем отсчете рост мощности не наблюдался, а  $КР = 1$ , это означает, что была найдена точка максимума согласно условию (1.5). Если точка максимума была найдена, то выставляется равным 1 соответствующий флаг  $m$ . В противном случае производится обычная проверка изменения напряжения генератора.

Блок-схема алгоритма расчета коэффициента заполнения  $D$  приведена на рисунках 2.6 и 2.7.

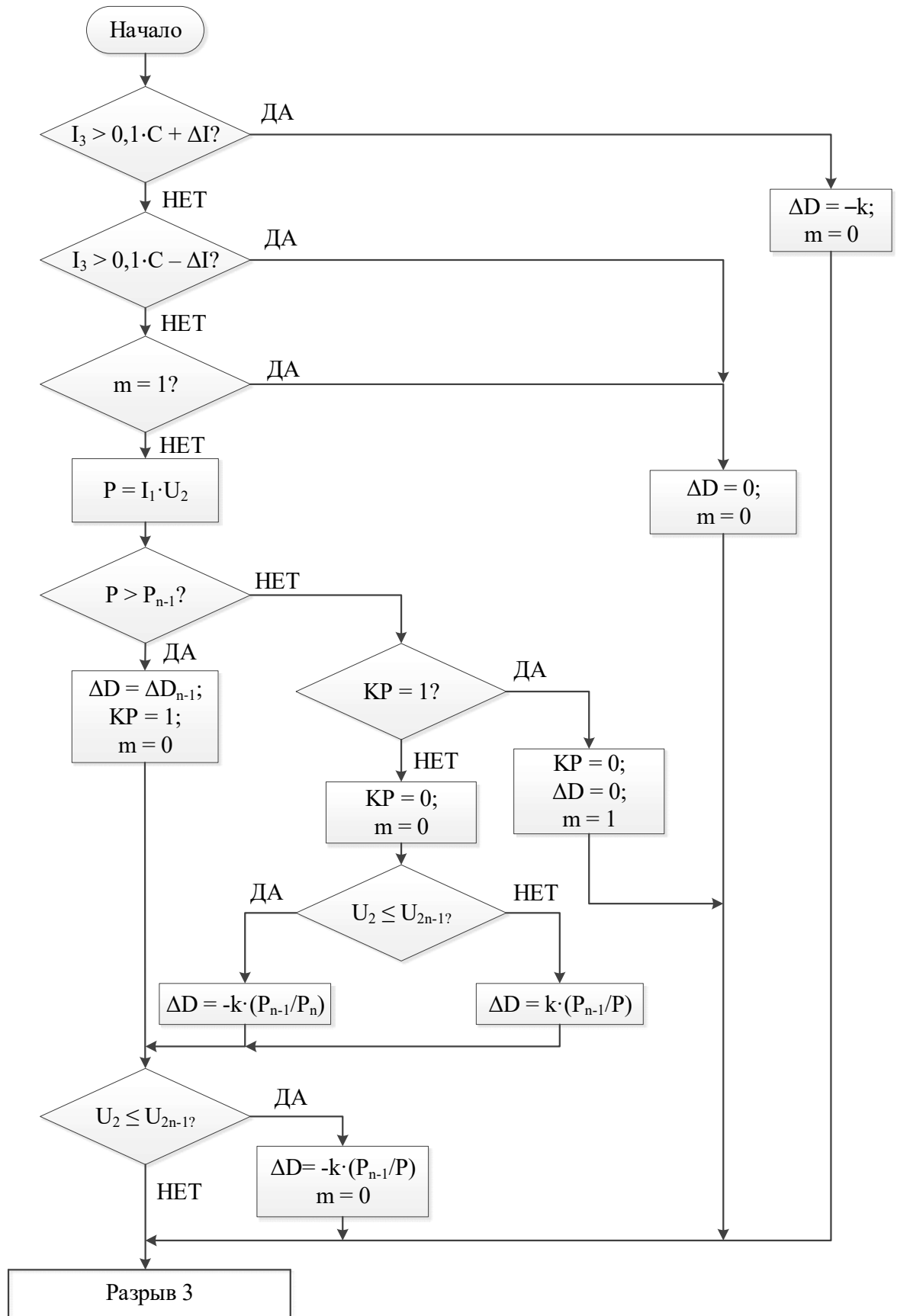


Рисунок 2.6. – Блок-схема алгоритма расчета коэффициента заполнения  $D$  (начало)



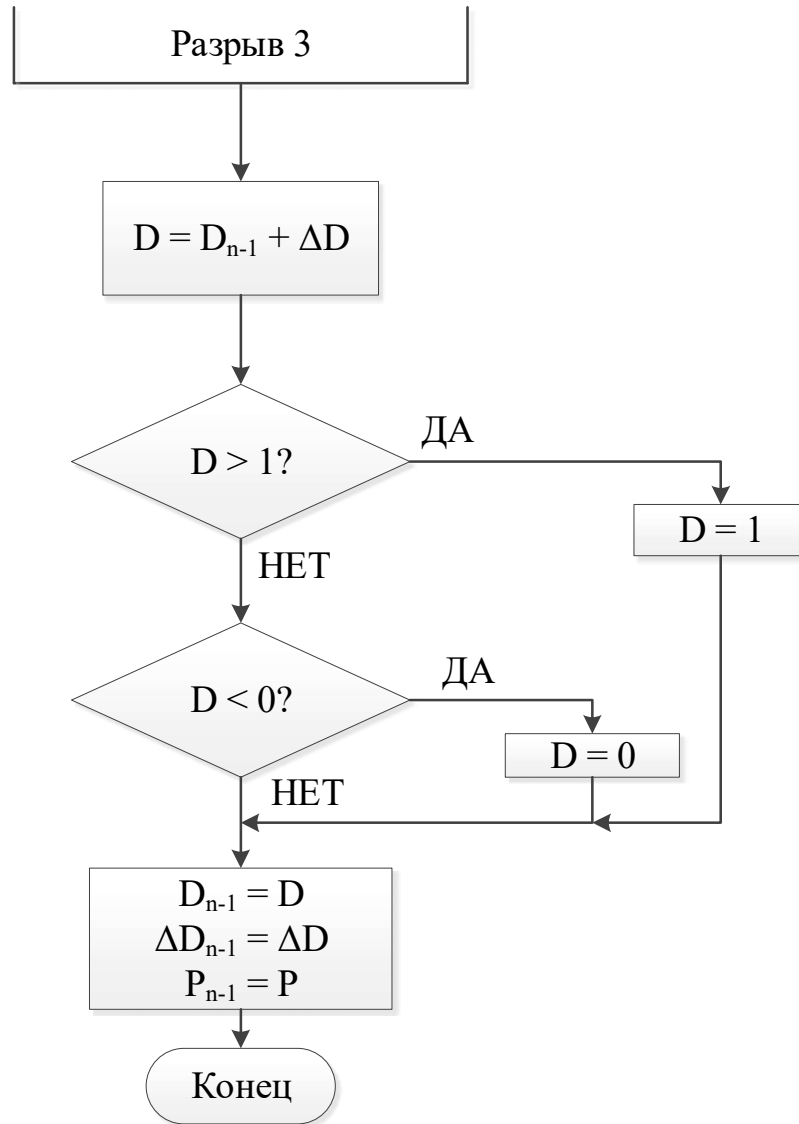


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма расчета коэффициента заполнения  $D$   
(продолжение)

Анализ необходимости выполнения включения или отключения ключа  $K1$ , который отключает и подключает нагрузку, требуется для эффективного использования аккумуляторных батарей и максимально возможного продления их ресурса. В случае если аккумуляторы разряжены ниже некоторого предела, необходимо отключить нагрузку, которая коммутируется ключом  $K1$  с целью недопущения последующего разряда. Блок питания (БП на структурной схеме – рисунок 2.2) получает питание от резервного источника питания. Необходимо также учитывать, что при отключении нагрузки напряжение аккумуляторных батарей повысится. Такое повышение может вызвать повторную коммутацию цепи с последующим снижением напряжения. В результате нагрузка будет подключаться и отключаться, пока не разрядит аккумулятор. Для устранения таких мерцаний предлагается алгоритм, который адаптивно подстраивается под изменения напряжения аккумуляторных батарей (рисунок 2.8).

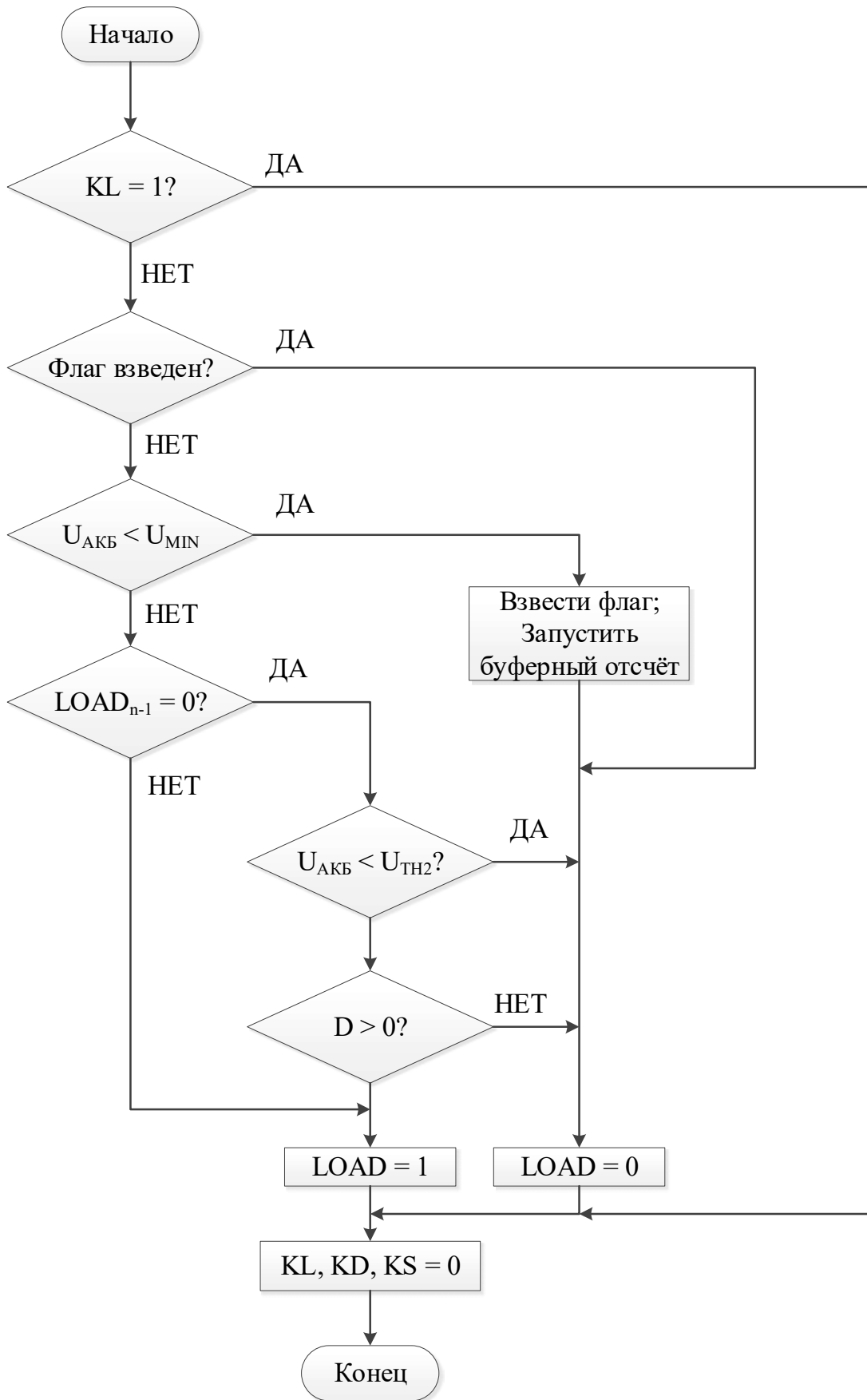


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма анализа необходимости подключения и отключения нагрузки

В ходе работы этой части алгоритма сначала производится проверка на факт взведения индикаторного флага запуска таймера. Таймер необходим для создания защитного «буферного» времени, в течение которого нагрузка не может быть подключена. Если флаг взведен, нагрузка отключается. Если флаг не взведён, то производится сравнение текущего напряжения аккумуляторной батареи  $U_{\text{АКБ}}$  с минимально допустимым  $U_{\text{MIN}}$ . Запускается отсчёт некоторого определенного «буферного» времени, взводится индикаторный флаг запуска таймера, затем размыкается ключ  $K_1$ . Если напряжение аккумуляторной батареи выше минимума, то производится проверка на включение нагрузки (включена ли нагрузка сейчас). Если нагрузка отключена, то производится две проверки: сравнение текущего напряжения аккумулятора с некоторым базовым предзаданным  $U_{\text{TH2}}$  и анализ текущего выставленного значения коэффициента заполнения  $D$ , поскольку подключать нагрузку целесообразно при достаточном заряде аккумулятора, а также при наличии заряда аккумулятора внешним источником (в данном случае – генератор ВЭУ). В случае невыполнения хотя бы одного из указанных выше условий нагрузка будет отключена.

После успешного выполнения сравнения, если напряжение на установке не выше  $U_{\text{MAX}}$ , система управления ожидает появления выпрямленного напряжения  $U_1$ , которое должно быть больше напряжения на аккумуляторах. Как только такое напряжение появляется (силы ветра достаточно, чтобы раскрутить установку до нужного предела), активируется ШИМ.

Как видно, предлагаемый в работе алгоритм позволяет оптимально и гибко подстраиваться под изменения внешней среды (подключение и отключение нагрузки, изменение скорости ветра и др.), а также производить диагностику подключенных к энергосистеме устройств. Применение этого алгоритма позволяет производить многосторонний анализ состояния сети в целом. Такой подход к подключению и отключению нагрузки может быть применен в различных устройствах систем с автономной генерацией электроэнергии, где разряд аккумулятора может проявляться достаточно часто, например, в инверторах или отдельных контроллерах.

### 2.3 Разработка модели системы управления ВЭУ

Для проверки работоспособности предлагаемого алгоритма была разработана компьютерная имитационная модель системы ВЭУ в программе Matlab Simulink на основе модели Мартьянова А.С, рассмотренной в пункте 1.4.

Основной отличительной особенностью предлагаемой модели от модели-аналога является система управления, выполненная в блоке S-function, который выполняет код, написанный на языке высокого уровня (в данном случае – Си), а также переработанная система расчета КИЭВ.

Схема модели ВЭУ целиком, выполненная в программном пакете Matlab Simulink, представлена на рисунке 2.9.

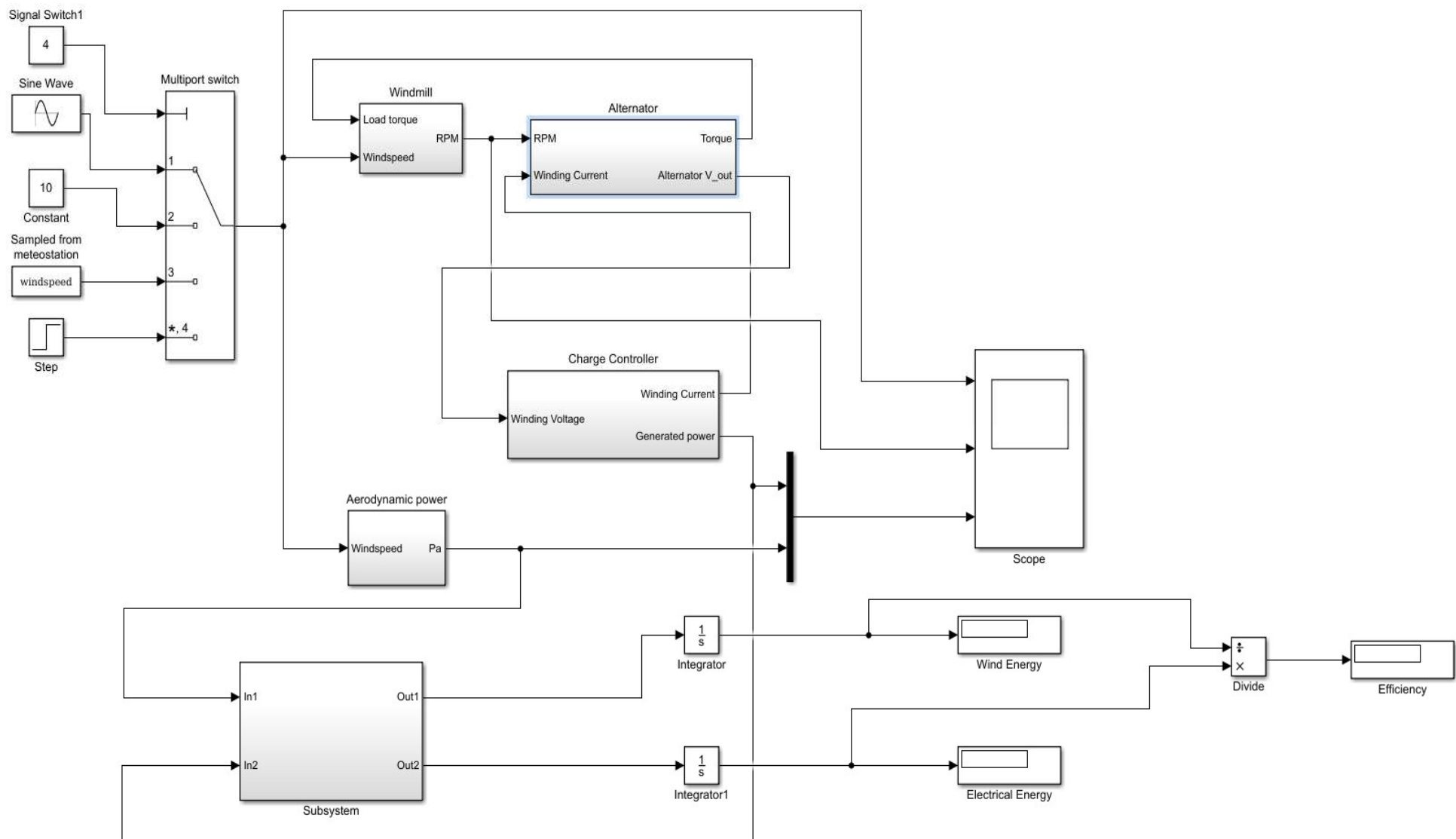


Рисунок 2.9 – Модель системы управления в программном пакете Matlab Simulink

Как и прототип, разработанная модель содержит три основных модуля, имитирующих работу ВЭУ:

- модуль «Windmill» имитирует работу ветродвигателя по уравнениям (1.8–1.10). Возмущающим воздействием для этого блока будет являться сигнал, имитирующий скорость ветра. Функция скорости ветра от времени может быть выбрана постоянной («Constant»), синусоидальной («Sine Wave»), ступенчато изменяющейся («Step») или представлять собой некий набор записанных ранее значений («Sampled from meteostation»). Помимо скорости ветра входным воздействием также является электромеханический момент, создаваемый нагрузкой – электрическим генератором. Выходным воздействием является угловая частота вращения. Блок-схема модуля представлена на рисунках 1.11–1.14;

- модуль «Alternator» имитирует работу электрического генератора по формулам (1.11-1.13). Входными воздействиями являются угловая скорость вращения и ток обмотки, рассчитываемый в блоке «Charge Controller». Блок-схема модуля приведена на рисунке 1.18;

- модуль «Charge Controller» имитирует работу контроллера заряда и системы управления ВЭУ. Входным воздействием на модуль является напряжение обмотки; исходя из него осуществляется подбор тока методом Р&О поиска точки максимума мощности. Помимо этого, в модуле рассчитывается также извлекаемая электрическая мощность. Для упрощения системы в целом блок управляет напрямую током обмотки; это позволяет исключить влияние механизмов заряда и разряда аккумуляторной батареи, а также исключить управление коэффициентом заполнения ШИМ и напряжением низкого уровня системы. Это позволяет проверить эффективность алгоритма Р&О без влияния других второстепенных факторов.

Блок-схема модуля «Controller» представлена на рисунке 2.10.

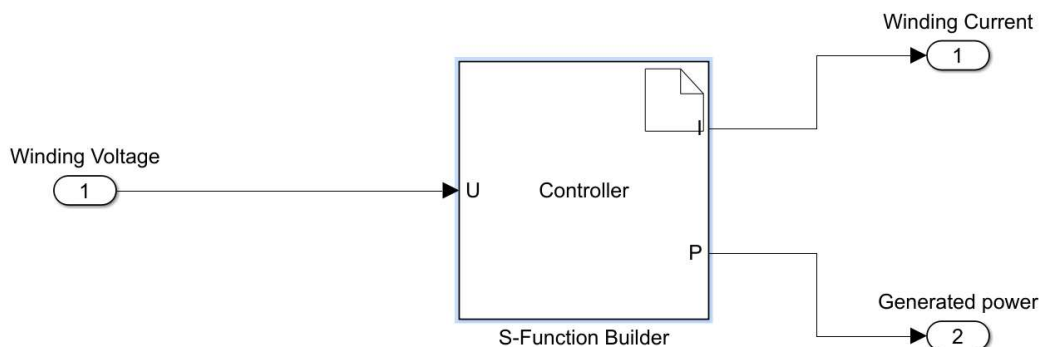


Рисунок 2.10 – Блок-схема модуля «Charge Controller»

Как видно, модуль представляет из себя только один блок S-Function Builder, который осуществляет управления током обмотки. Использование блока S-Function позволяет использовать языки высокого уровня (в частности, Си) для написания программного кода алгоритма управления по принципу Р&О поиска максимальной мощности. Как видно, также производится расчёт текущей мощности.

В блоке «Aerodynamic power» производится расчёт полной аэродинамической мощности ветра, проходящей через ветроколесо известного размера (модель ВЭУ-3 производства «ГРЦ-Вертикаль») по формуле (1.3). Рассчитанное значение используется в блоке «Score», а также для последующих расчётов КИЭВ. Блок-схема этого модуля представлена на рисунке 2.11.

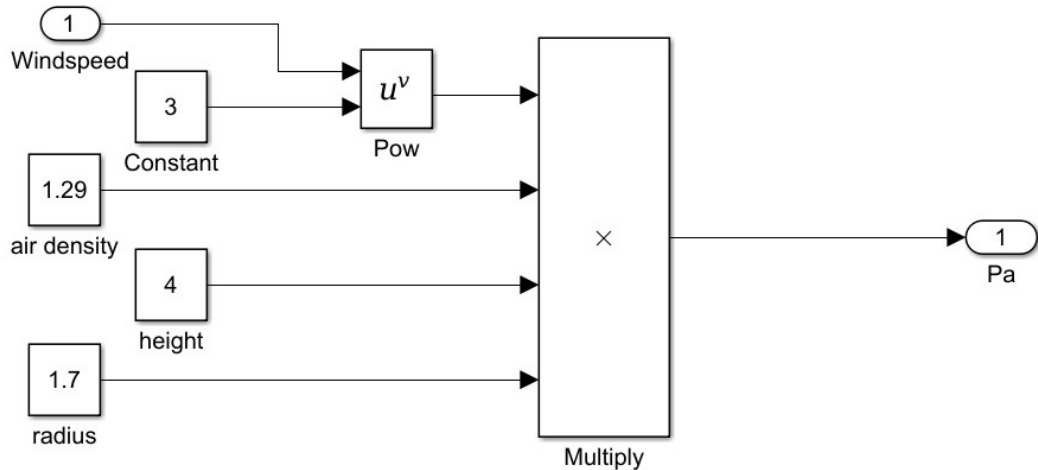


Рисунок 2.11 – Блок-схема модуля «Aerodynamic power»

Для того, чтобы не учитывать первоначальное время запуска ветроколеса, в течение которого электрический КИЭВ не отражает эффективность алгоритма, так как ВЭУ только выходит на нормальный режим работы, в блоке «Subsystem» отсекается этот временной участок (выбран эмпирически – от 0 до 300 отсчетов). Блок-схема модуля «Subsystem» приведена на рисунке 2.12.

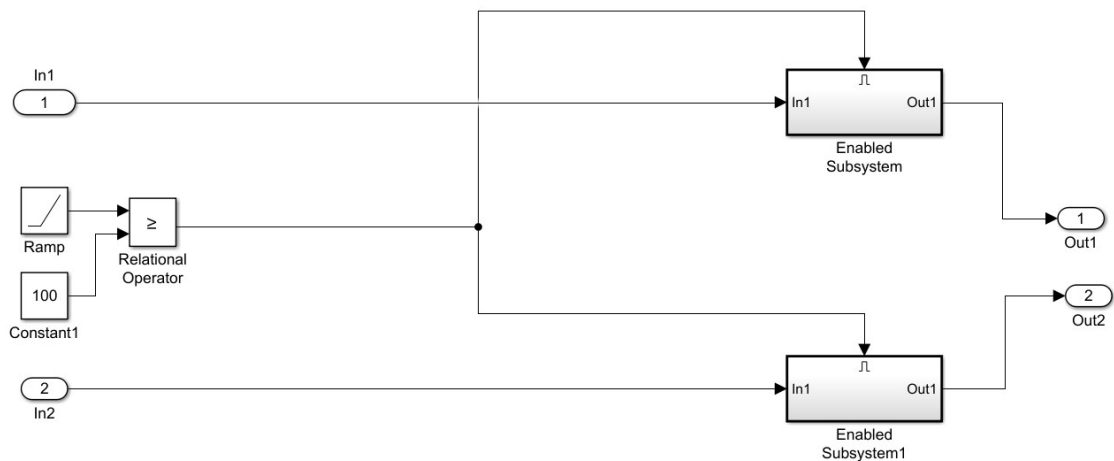


Рисунок 2.12 – Блок-схема модуля «Subsystem»

В модели предусмотрены также два блока отображения информации об энергии. Блок «Wind Energy» отображает суммарную энергию ветрового потока, про-

шедшего через ометаемую площадь ветроколеса. Суммарная энергия будет представлять собой интеграл мгновенной мощности ветрового потока по времени моделирования:

$$E_{\text{ВП}} = \int_0^t P_{\text{ВП}}(t) dt. \quad (2.6)$$

Блок «Electrical Energy» отображает количество электрической энергии, выработанной ВЭУ за период моделирования:

$$E_{\text{ЭЛ}} = \int_0^t P_{\text{ЭЛ}}(t) dt. \quad (2.7)$$

Эти блоки отображения позволяют оценивать эффективность алгоритма, а также осуществлять настройку параметров алгоритма. Эффективность алгоритма может быть оценена по электрическому КИЭВ – отношению полученной электрической энергии к полной энергии ветрового потока за данный промежуток времени:

$$\eta_{\text{ЭЛ}} = \frac{E_{\text{ЭЛ}}}{E_{\text{ВП}}}. \quad (2.8)$$

Учитывая (1.2), электрический КИЭВ можно представить в следующем виде:

$$\eta_{\text{ЭЛ}} = C_p \cdot \eta_{\text{ГЕН}},$$

где  $\eta_{\text{ГЕН}}$  – КПД генератора, учитывающее потери в обмотках.

Данная разновидность КИЭВ может быть использована для анализа эффективности работы алгоритма поиска максимальной мощности.

## 2.4 Разработка алгоритма оптимизации мощности ВЭУ в Matlab Simulink

Как было описано ранее, блок контроллера заряда в качестве входного параметра получает информацию только о напряжении генератора. Для проверки непосредственно самого принципа управления, вместо коэффициента заполнения  $D$  был выбран ток генератора в качестве параметра управления, поскольку, как уже было отмечено ранее, конечным объектом управления в электрических преобразователях, используемых в таких системах ВЭУ, является ток нагрузки генератора. В результате был разработан алгоритм управления, составлена его блок-схема, а затем разработан программный код на языке Си, который был применен в блоке S-Function Builder. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.13.

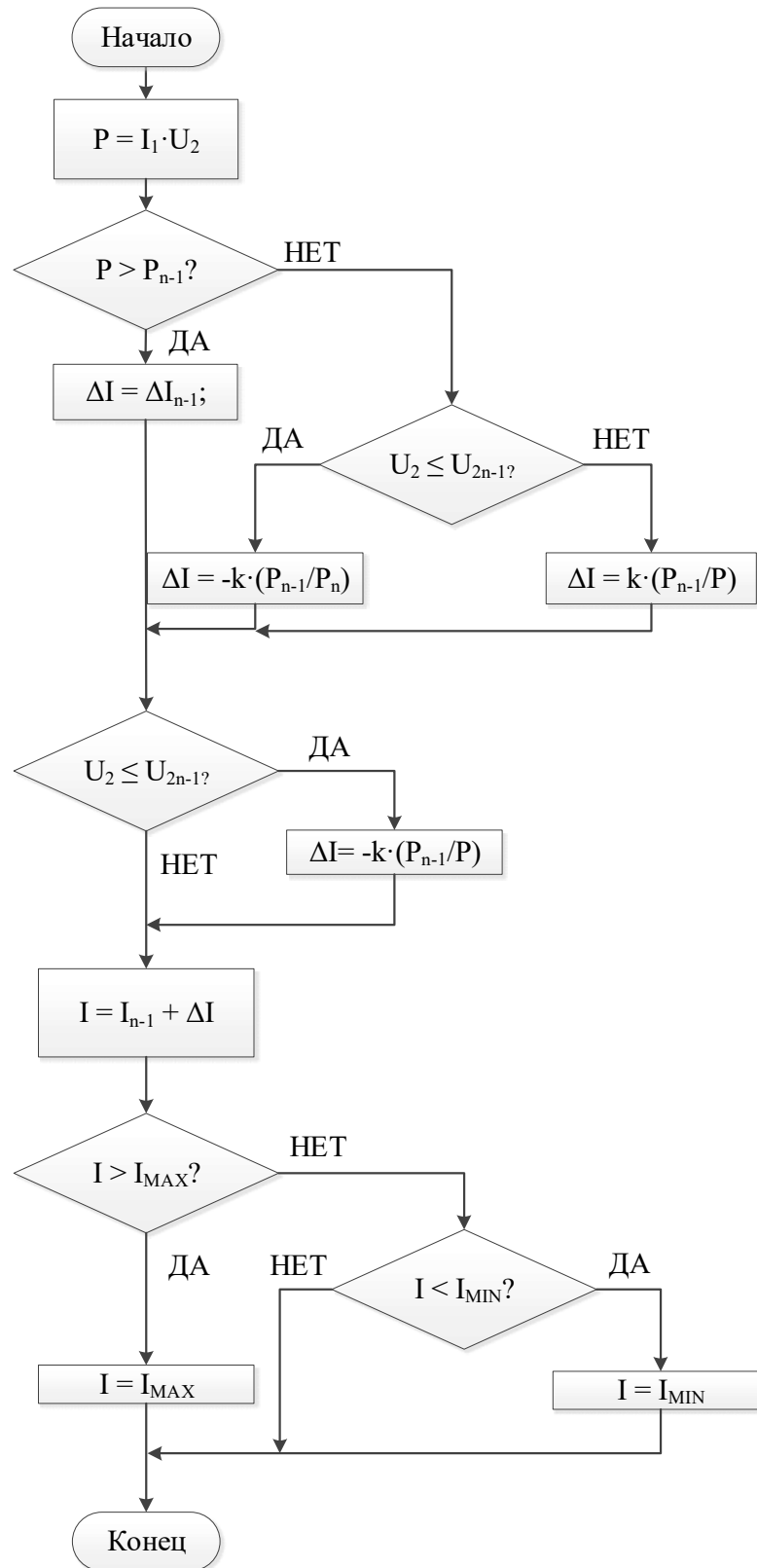


Рисунок 2.13 – Блок-схема алгоритма работы модуля «Controller»

Разработанный алгоритм управления оперирует со следующими параметрами:

- текущее и предыдущее значения напряжения  $U_n$  и  $U_{n-1}$ , получаемое от блока, моделирующего генератор;



- текущее и предыдущее значения изменения тока  $\Delta I_n$  и  $\Delta I_{n-1}$ , которое рассчитывается в ходе анализа текущей ситуации;
- текущее и предыдущее значения электрической мощности  $P_n$  и  $P_{n-1}$ , вычисляемое по соотношению 2.3;
- текущее и предыдущее значения тока  $I_n$  и  $I_{n-1}$ , которое задаётся самим алгоритмом;
- коэффициент пропорциональности между отношением предыдущей и текущей мощностью и необходимым изменением тока  $k$ ;
- минимально допустимое значение напряжения выпрямленного напряжения, при котором эффективна работа установки  $U_{MIN}$ ;
- минимально и максимально допустимое значения тока  $I_{MIN}$  и  $I_{MAX}$ .

Для реализации данного алгоритма был создан программный код на языке Си в блоке «S-Function Builder». На рисунке 2.14 показано диалоговое окно программы с реализованным кодом алгоритма.

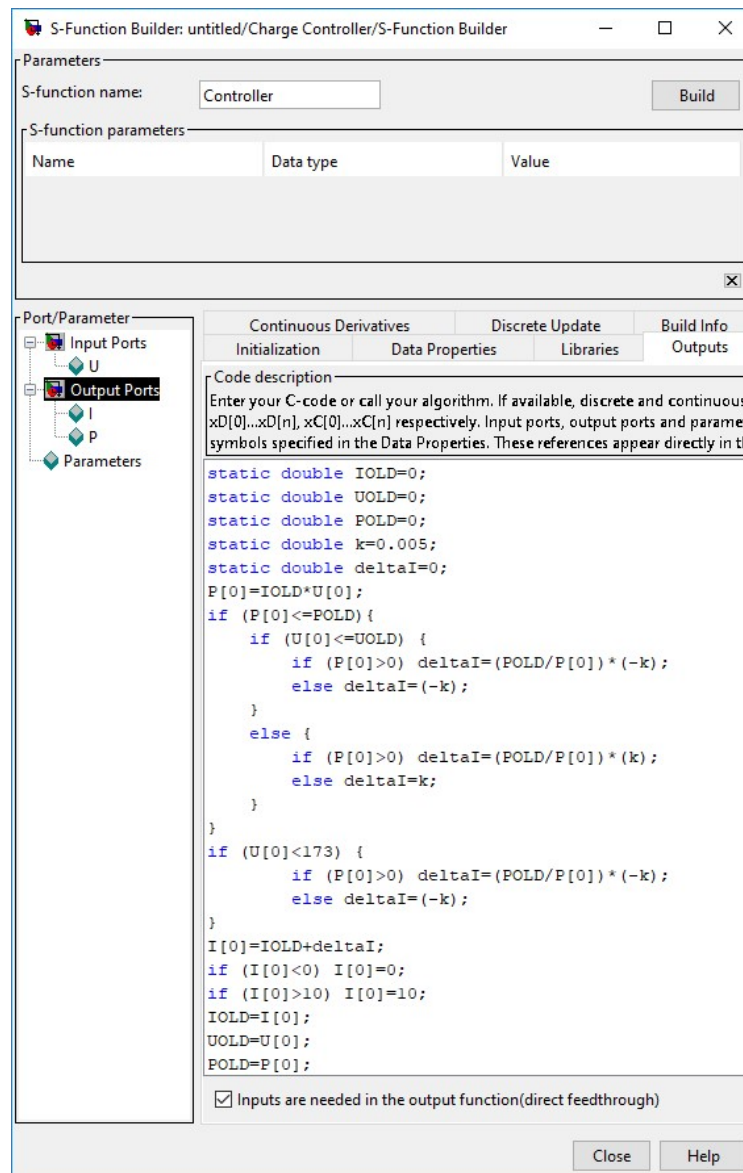


Рисунок 2.14 – Диалоговое окно блока «S-Function Builder»

Как видно, данное диалоговое окно предусматривает сигнал «U» в качестве входного параметра, а сигналы «I» и «P» – в качестве выходных. Эти три параметра используются как порты ввода и вывода, поэтому в коде программы дополняются символами «[0]». 0 обозначает одномерный массив размером 1, то есть одну ячейку памяти. Параметрам IOLD, UOLD, POLD соответствуют параметры  $I_{n-1}$ ,  $U_{n-1}$ ,  $P_{n-1}$ , то есть данным из предыдущего цикла. В первом цикле они приняты равными 0. Тип переменной static требуется для сохранения этих параметров после прекращения работы блока в цикле.

В конце каждого цикла работы программы производится сохранение текущих параметров в переменные IOLD, UOLD, POLD.

## Выводы по разделу 2

В разделе 2 была успешно разработана структурная схема системы с целью дальнейшей разработки алгоритма. В качестве базового аналога была переработана модель Мартьянова А.С. системы с ВЭУ, где осуществляется контроль быстроходности. Далее в этой системе была изменена система управления, которая была заменена на блок «S-Function Builder».

Был разработан алгоритм управления, который осуществляет изменение тока генератора пропорционально отношению текущей мощности и мощности предыдущего отсчета. Алгоритм, как и алгоритмы-аналоги, рассмотренные в пункте 1.3, осуществляет поиск точки максимума функции мощности. Разработанный алгоритм был перенесен на язык высокого уровня Си и применен в блоке «S-Function Builder». Таким образом, был завершён синтез модели системы управления ВЭУ.

Для анализа разработанного принципа управления и модели системы управления необходимо осуществить поиск оптимальных параметров разработанного алгоритма, а также осуществить моделирование полученной системы при различных условиях и на различных скоростях ветра.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1 Эмпирическая итерационная оптимизация параметров алгоритма

С целью оптимизации работы алгоритма было осуществлен эмпирический итерационный подбор оптимальных параметров алгоритма –  $U_{\text{MIN}}$  и  $k$ . В таблице 3.1 приведены сводные результаты подбора: электрический КИЭВ  $\eta_{\text{эл}}$ , вычисляемый по формуле (2.8), был сопоставлен с коэффициентом  $k$ , примененным в данной конкретной итерации. В качестве входного воздействия на систему в целом была выбрана подборка скоростей ветра, сделанная на метеостанции с целью оптимизации алгоритма в действительных условиях.

Таблица 3.1 – Результаты итераций подбора коэффициента  $k$

$k, 1/\text{В}$	0	0,0005	0,0010	0,0020	0,0025	0,0027	0,0030	0,0050	0,0100
$\eta_{\text{эл}}$	0	0,2568	0,2963	0,3287	0,3305	0,3306	0,3301	0,3244	0,3220

По таблице 3.1 построен график, отражающий зависимость электрического КИЭВ  $\eta_{\text{эл}}$  от коэффициента пропорциональности  $k$  (рисунок 3.1).

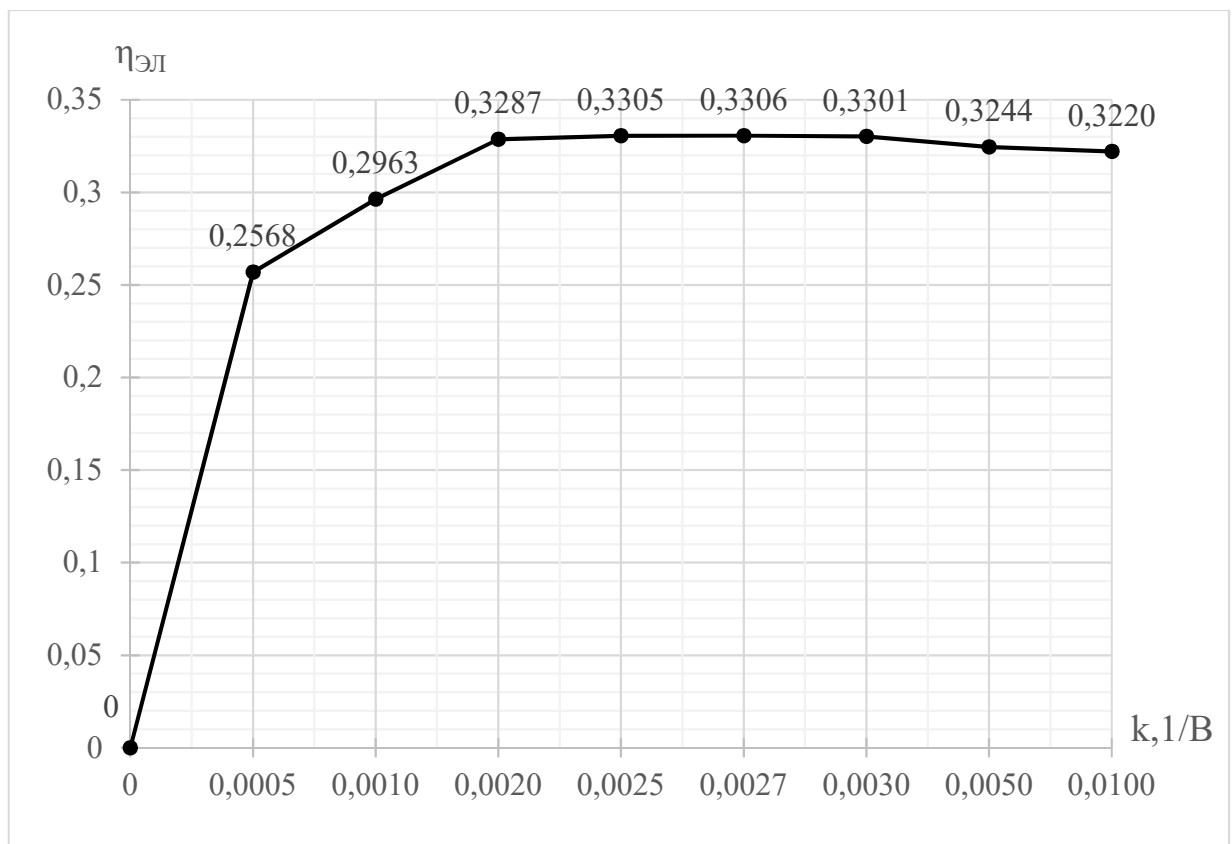


Рисунок 3.1 – Зависимость электрического КИЭВ от коэффициента пропорциональности  $k$

Как видно из графика, максимумом этой функции будет являться значение  $k = 0,0027$ .

Аналогично осуществим поиск точки максимума для различных значений второго параметра –  $U_{\text{MIN}}$ . В таблице 3.2 приведены сводные результаты итерационной эмпирической оптимизации: электрический КИЭВ  $\eta_{\text{ЭЛ}}$ , вычисляемый по формуле (2.8), был сопоставлен с минимальным пороговым напряжением  $U_{\text{MIN}}$ , примененным в данной конкретной итерации.

Таблица 3.2 – Результаты итераций подбора коэффициента  $U_{\text{MIN}}$

$U_{\text{MIN}}, \text{В}$	0	100	150	170	173	190	200	250	300
$\eta_{\text{ЭЛ}}$	0,0016	0,1590	0,2947	0,3208	0,3220	0,3171	0,3061	0,1954	0,0771

По таблице 3.2 построен график, отражающий зависимость электрического КИЭВ  $\eta_{\text{ЭЛ}}$  от порогового напряжения  $U_{\text{MIN}}$  (рисунок 3.2).

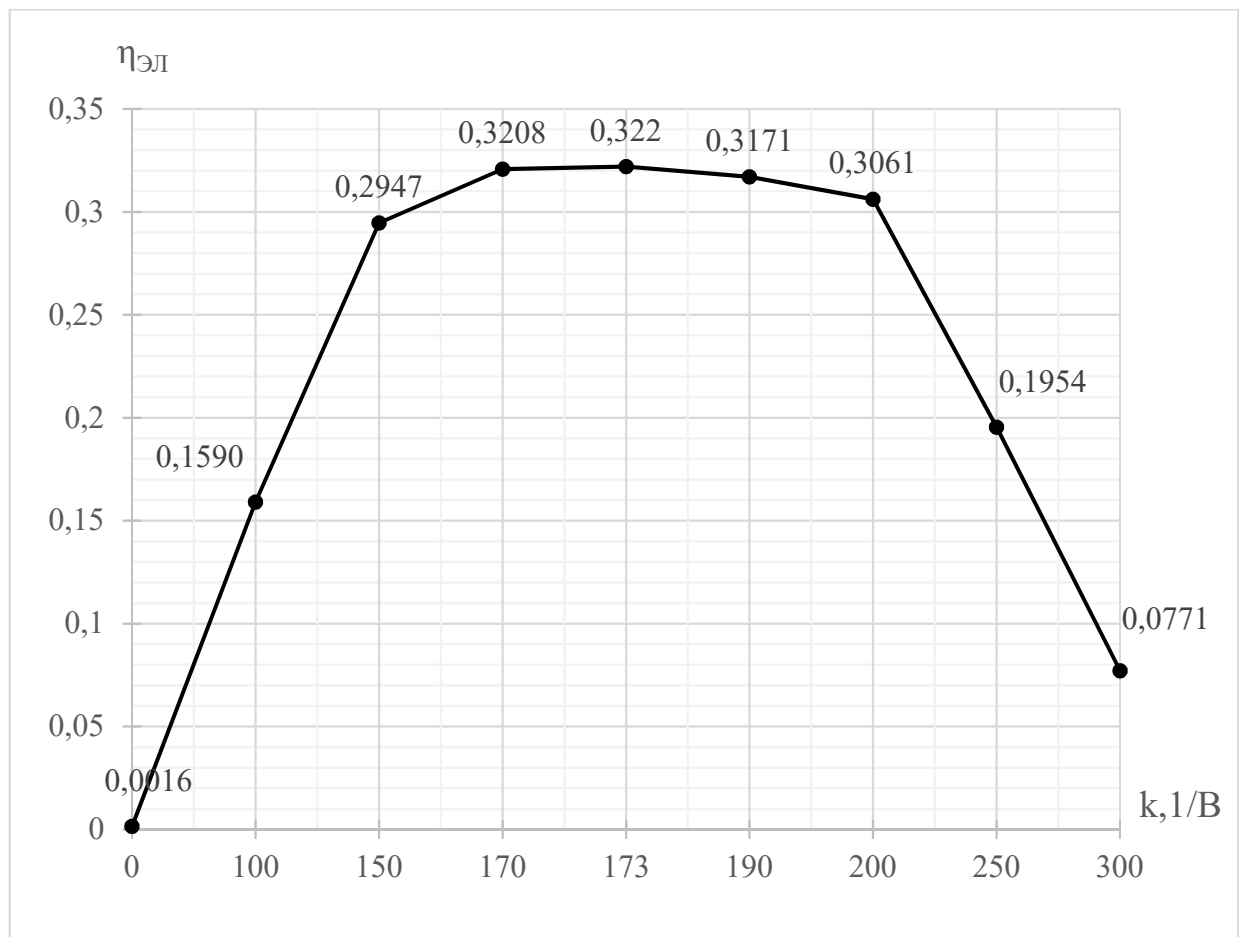


Рисунок 3.2 – Зависимость электрического КИЭВ от порогового напряжения  $U_{\text{MIN}}$

Как видно из графика, максимумом этой функции будет являться значение  $U_{\text{MIN}} = 173 \text{ В}$ .

### 3.2 Апробация модели системы управления при различных типах изменения скорости ветра

Для выбранных в пункте 3.1 параметров алгоритма проведем его апробацию при различных типах изменения скорости ветра.

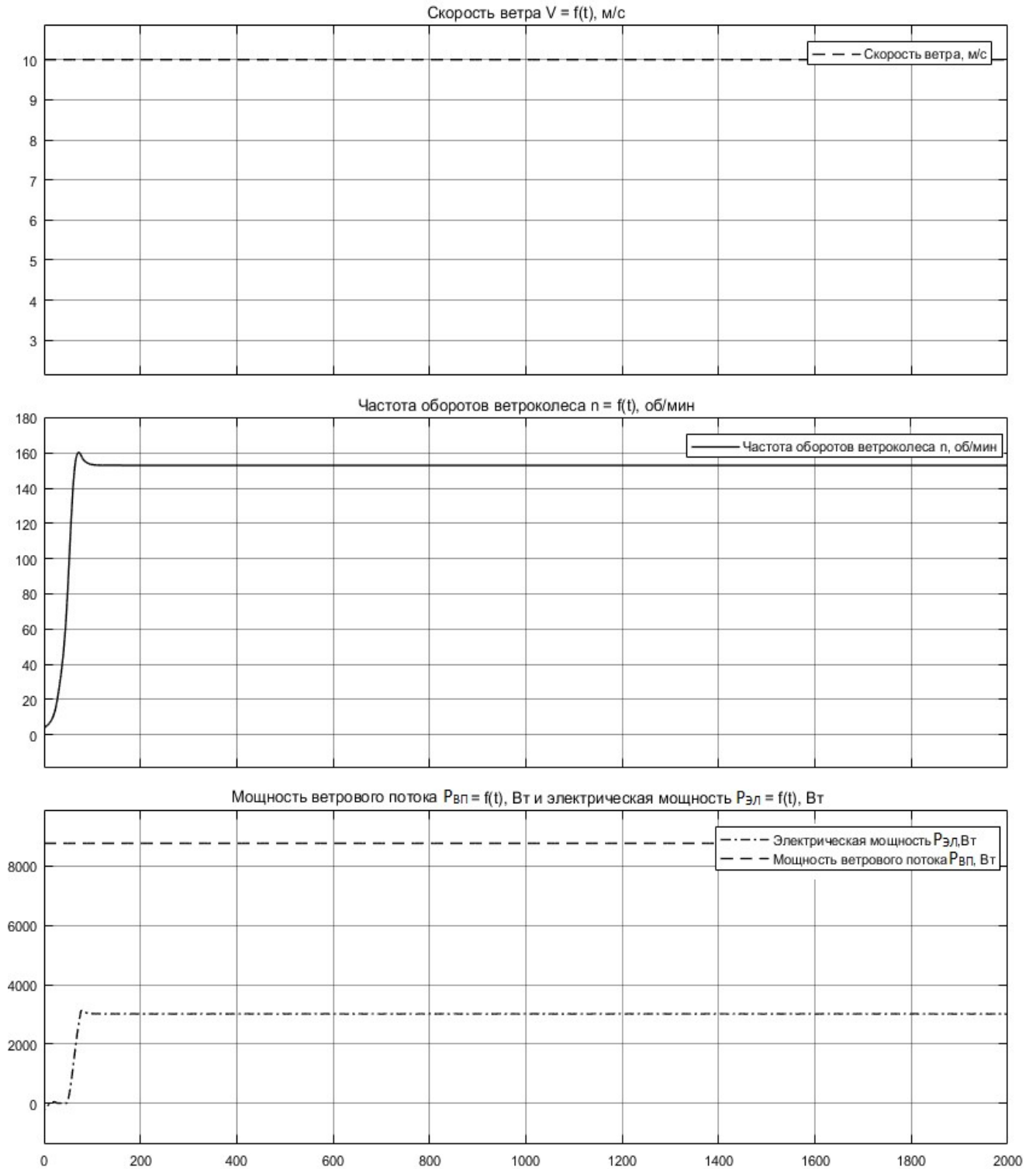


Рисунок 3.3 – Апробация модели системы управления в условиях постоянной скорости ветра

На рисунке 3.3 приведены графики зависимости скорости ветра (верхний график), частоты оборотов ветроколеса (средний график), мощности ветрового потока  $P_{ВК}$  и электрической мощности  $P_{ЭЛ}$  (нижний график) от времени. Графики были получены с помощью блока «Score» описанной ранее модели для постоянной скорости ветра. Время симуляции было выбрано равным 2000 отсчётам; значение скорости ветра принято постоянным и равным 10 м/с.

На графиках частоты вращения и электрической мощности видны небольшие всплески, связанные с регулированием системой управления объекта управления; в дальнейшем система успешно выходит на установившийся режим; колебаний мощности не происходит.

Для данного модельного эксперимента были получены следующие значения полной энергии ветрового потока, выработанной электрической мощности и электрического КИЭВ (рассчитанные в соответствующих блоках – «Wind Energy», «Electrical Energy», «Efficiency» по формулам (2.6–2.8)):

$$E_{ВП} = 1,491 \cdot 10^7 \text{ Дж};$$

$$E_{ЭЛ} = 5,126 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$\eta_{ЭЛ} = 0,3437.$$

Как уже было отмечено ранее, в данной модели электрический КИЭВ помимо аэродинамических потерь, неизбежно возникающих при эксплуатации ветроустановки, учитывает также и электрические потери в обмотках генератора. Если исключить потери в электрическом генераторе, значения электрической энергии и КИЭВ изменятся и составят:

$$E_{ЭЛ} = 5,720 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$\eta_{ЭЛ} = 0,3836.$$

В работе [10], где используется принцип контроля быстроходности, электрический КИЭВ оказался равен примерно 0,43, поэтому результат, показанный данным принципом управления, можно считать достаточно близким к результату модели-аналога.

Аналогичный эксперимент был проведен для синусоидального изменения скорости ветра с размахом от 6 до 10 м/с (рисунок 3.4). На данных графиках видно, что в периоды, когда скорость ветра становится относительно маленькой и напряжение снижается, выполняется часть алгоритма, которая ответственна за снижение тока, пока не будет достигнуто минимальное пороговое напряжение  $U_{MIN}$ . График изменения частоты оборотов ветроколеса, как и график изменения напряжения генератора, является периодическим, но не имеет вид синусоиды. Это связано с особенностями алгоритма, которые не дают ветроколесу снизить скорость до неоптимальных частот вращения. Были получены следующие значения характеристик (с учётом потерь в генераторе):

$$E_{ВП} = 7,851 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$E_{ЭЛ} = 2,754 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$\eta_{ЭЛ} = 0,3508.$$

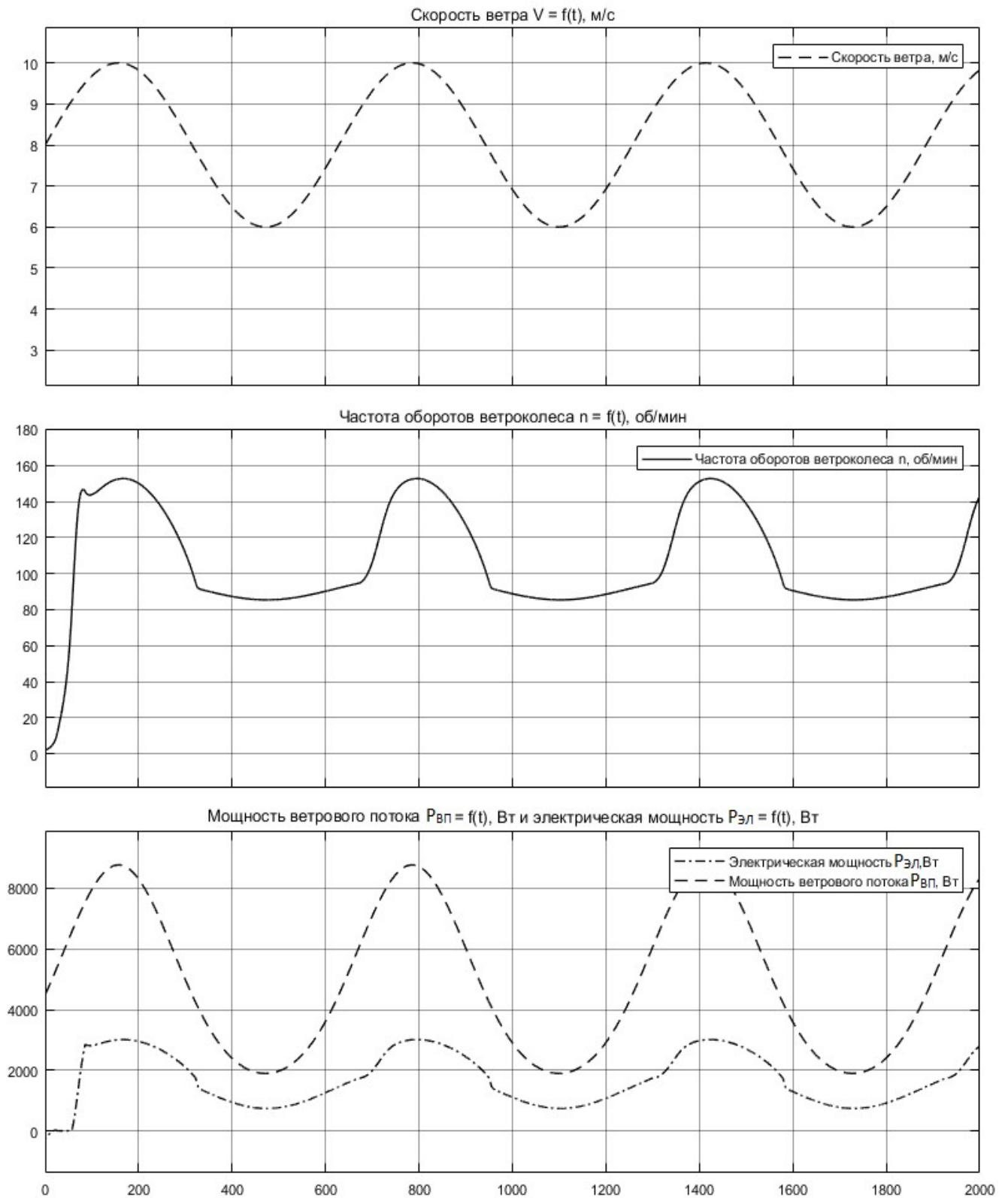


Рисунок 3.4 – Апробация модели системы управления в условиях гармонически изменяющейся скорости ветра

На рисунке 3.5 представлены графики, характеризующие воздействие ступенчатого изменения скорости ветра на систему.

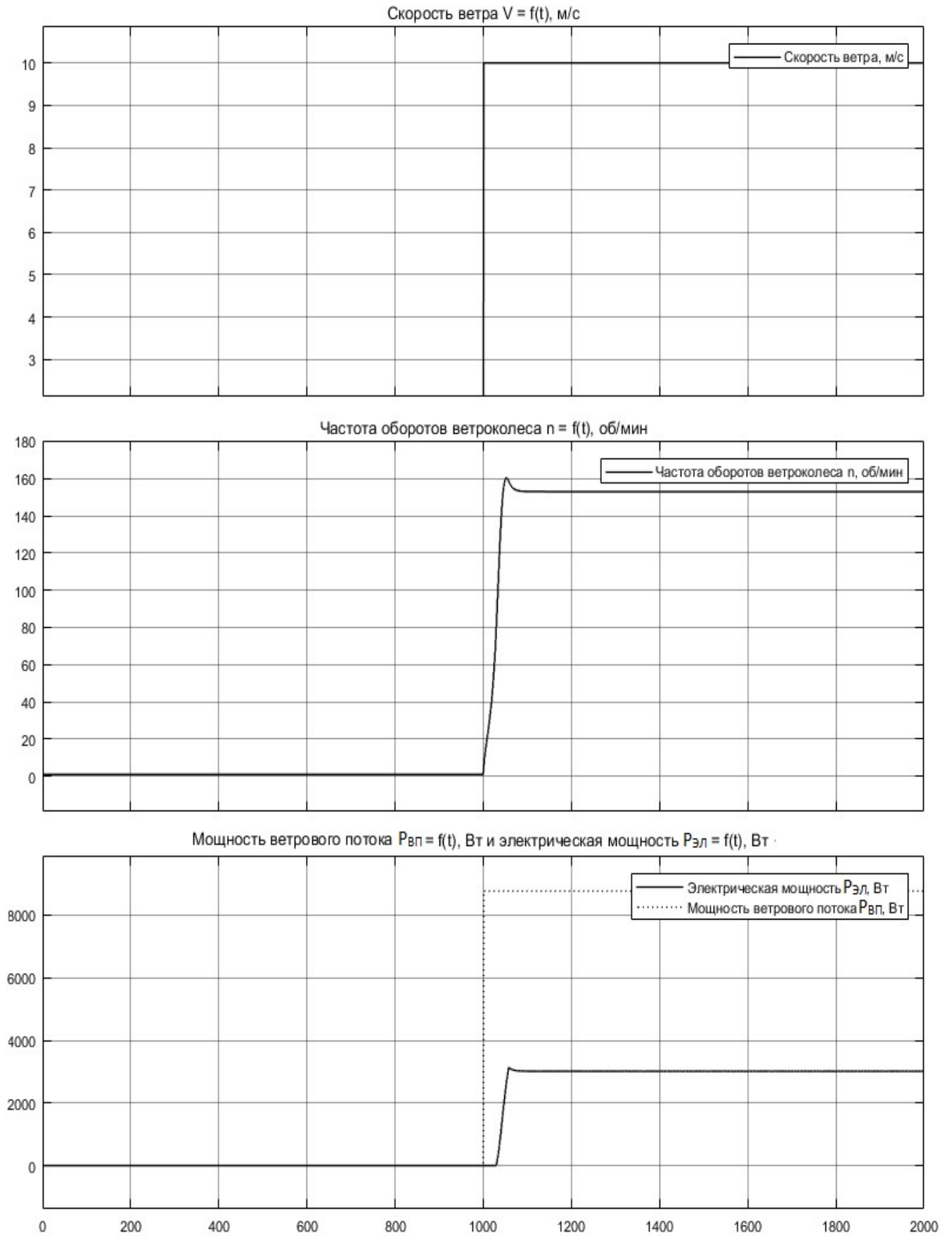


Рисунок 3.5 – Апробация модели системы управления в условиях ступенчато изменяющейся скорости ветра



Воздействие ступенчатого скачкообразного изменения скорости ветра по своей сути схоже с воздействием постоянной скорости ветра, однако сам фронт ступенчатого воздействия сдвинут по времени. Это позволяет оценить влияние блока «Subsystem» на изменение электрического КИЭВ. Как уже было отмечено ранее, данный блок отбрасывает первые 300 значений электрической и аэродинамической мощности, чтобы не учитывать влияние переходных процессов, неизбежно возникающих при резком ступенчатом изменении скорости ветра. Если фронт всплеска сдвинут по времени, блок «Subsystem» не будет фильтровать первые значения, а значит электрический КИЭВ будет меньше. Полученные таким образом значения энергии и электрического КИЭВ для ступенчатого воздействия в момент времени  $t = 1000$ , с нулевой начальной скоростью и конечной скоростью ветра, равной 10 м/с:

$$E_{\text{ВП}} = 8,772 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$E_{\text{ЭЛ}} = 2,878 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$\eta_{\text{ЭЛ}} = 0,3281.$$

Как видно из сопоставления с предыдущими полученными результатами, электрический КИЭВ снизился примерно на 0,02.

Стоит также упомянуть о переходных процессах, возникающих при моделировании. Как видно (примерно 70-я секунда на рисунках 3.3 и 3.4, а также 1050-я секунда на рисунке 3.5), при ступенчатом увеличении, а также на начальном этапе при синусоидальном изменении скорости ветра происходит перерегулирование, то есть ограниченное по времени превышение показателей функции от целевого значения. Тем не менее, перерегулирование незначительно по амплитуде и быстро затухает во времени, что говорит о хорошем выборе регулирующих коэффициентов и о работоспособности алгоритма в реальных условиях – при резком изменении скорости ветра, то есть при порывистых ветрах.

Наибольший интерес с практической точки зрения представляет собой работа алгоритма в условиях, приближенных к реальным. Для этого модель системы была подвергнута воздействию скоростей ветра, которые были записаны заранее на при измерениях скоростей ветра, проведенных в [10].

Графики моделирования работы системы в таком режиме представлены на рисунке 3.6. Видно, что скорость ветра меняется в широких диапазонах в данный промежуток времени – от 3 м/с до 11 м/с. Частота вращения ветроколеса также меняется в широких диапазонах, но в меньшей степени ввиду инертности ветроколеса. Были получены следующие значения характеристик (с учётом потерь в генераторе):

$$E_{\text{ВП}} = 4,636 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$E_{\text{ЭЛ}} = 1,574 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$\eta_{\text{ЭЛ}} = 0,3396.$$

В условиях, приближенных к действительным, КИЭВ остался практически на прежнем уровне, что позволяет говорить о работоспособности рассматриваемого алгоритма.

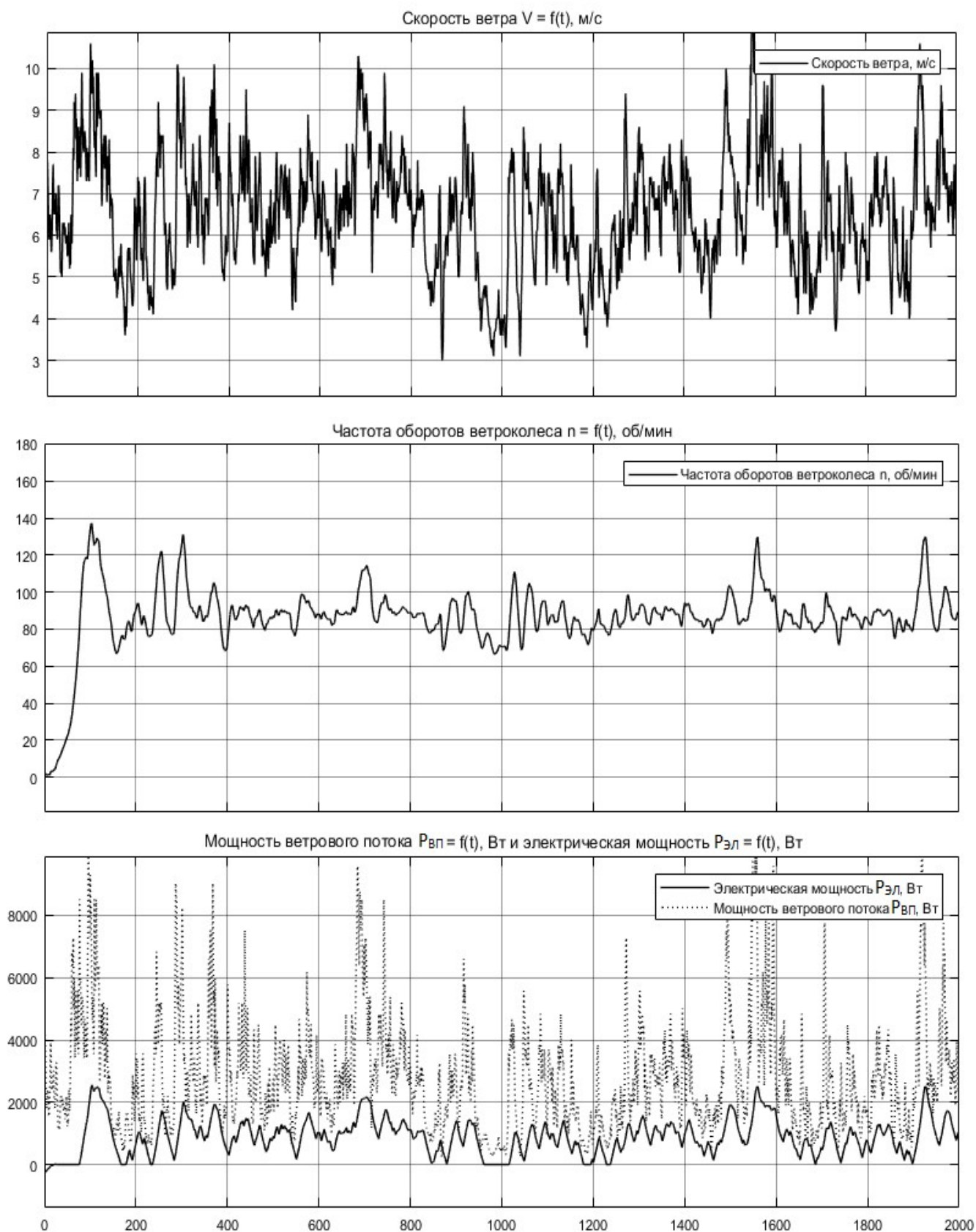


Рисунок 3.6 – Апробация модели системы управления при воздействии скоростей ветра, которые были записаны заранее на метеостанции

По сводным итогам моделирования при различных типах изменения скорости ветра, КИЭВ оказался несколько меньшим, чем у других моделей, в частности, у модели с отслеживанием быстроходности. Это говорит о некоторой инерционности ветроколеса, вследствие чего при быстрых изменениях скорости ветра требуется время для вывода установки в оптимальный режим; помимо этого, возможной причиной является не оптимальность выбора изменения тока  $I$ .

Дальнейшим возможным решением по оптимизации предлагаемого алгоритма может являться изменение тока  $I$  в обмотке генератора пропорционально отношению предыдущей измеренной и текущей мощности даже в условиях роста мощности ВЭУ.

### Выводы по разделу 3

В разделе 3 данной работы была проведена апробация работы модели системы управления в различных условиях изменения скорости ветра. Для этого были найдены оптимальные параметры алгоритма путём эмпирического итерационного моделирования. Затем были проведены испытания принципа управления при различных законах изменения скорости ветра.

Было выяснено, что электрический КИЭВ оказался несколько ниже, чем в модели-аналоге. Наибольший КИЭВ был получен при постоянной скорости ветра и отсутствии потерь в обмотках генератора. Это говорит об инерционности объекта управления, поскольку на достижение оптимальной рабочей точки при изменении скорости ветра уходит некоторое время, в течение которого ветроколесо работает в неоптимальном режиме. Это является недостатком подобного рода алгоритмов поиска точки оптимальной мощности. Возможным решением данной проблемы может быть изменение коэффициента заполнения  $D$  и, следовательно, тока  $I$  пропорционально отношению предыдущей измеренной и текущей мощности даже в условиях роста мощности ВЭУ.

Тем не менее, можно говорить о достаточно высокой эффективности алгоритма и возможности его применения в системах без использования анемометра и других вспомогательных устройств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был успешно произведен синтез и анализ модели системы управления ветроэнергетической установки.

В разделе 1 были рассмотрены теоретические аспекты функционирования систем управления ВЭУ. Были рассмотрены:

- задача поддержания максимальной мощности и необходимость её решения;
- понятие систем управления ВЭУ, их типы и роль в выполнении задачи поддержания максимальной мощности ВЭУ;
- методы поиска точки максимальной мощности (с использованием и без использования механических датчиков);
- имитационное моделирование как один из основных инструментов при проектировании систем управления ВЭУ;
- модель Мартьянова А.С. имитационного моделирования различных методов регулирования мощности ВЭУ.

Для дальнейшей разработки модели системы управления в качестве методов поиска максимальной мощности был выбран метод поиска экстремума функции мощности, который не нуждается в дополнительных датчиках, контролирующих скорость ветра. В качестве основы дальнейших исследований была выбрана модель имитационного моделирования различных методов регулирования мощности Мартьянова А.С. Поскольку данный алгоритм работает при переменных скоростях ветра и при этом не нуждается в задействовании таких дополнительных устройств как мультипликатор и устройство ступенчатого переключения обмоток генератора, то для дальнейшей разработки была выбрана система, использующая контроль быстроходности (модуль «Const\_TSR»). Тем не менее, дальнейшей проработки требовался модуль контроля заряда и системы управления ВЭУ, которая должна выполнять поиск точки максимальной мощности.

В разделе 2 была успешно разработана структурная схема системы с целью дальнейшей разработки алгоритма. В качестве базового аналога была переработана модель Мартьянова А.С. системы с ВЭУ, где осуществляется контроль быстроходности. Далее в этой системе была изменена система управления, которая была заменена на блок «S-Function Builder».

Был разработан алгоритм управления, который осуществляет изменение тока генератора пропорционально отношению текущей мощности и мощности предыдущего отсчета. Алгоритм, как и алгоритмы-аналоги, рассмотренные в теоретической части данной работы, осуществляет поиск точки максимума функции мощности. Разработанный алгоритм был перенесен на язык высокого уровня Си и применен в блоке «S-Function Builder». Таким образом, был завершён синтез модели системы управления ВЭУ.

Для анализа разработанного принципа управления и модели системы управления необходимо было осуществить поиск оптимальных параметров разработанного алгоритма, а также осуществить моделирование полученной системы при различных условиях и на различных скоростях ветра.

В разделе 3 данной работы была проведена апробация работы модели системы управления в различных условиях изменения скорости ветра. Для этого были найдены оптимальные параметры алгоритма путём эмпирического итерационного моделирования. Затем были проведены испытания принципа управления при различных законах изменения скорости ветра.

Было выяснено, что электрический КИЭВ оказался несколько ниже, чем в модели-аналоге. Наибольший КИЭВ был получен при постоянной скорости ветра и отсутствии потерь в обмотках генератора. Это говорит об инерционности объекта управления, поскольку на достижение оптимальной рабочей точки при изменении скорости ветра уходит некоторое время, в течение которого ветроколесо работает в неоптимальном режиме. Это является недостатком подобного рода алгоритмов поиска точки оптимальной мощности. Возможным решением данной проблемы может быть изменение коэффициента заполнения  $D$  и, следовательно, тока  $I$  пропорционально отношению предыдущей измеренной и текущей мощности даже в условиях роста мощности ВЭУ.

Можно говорить о достаточно высокой эффективности алгоритма и возможности его применения в системах без использования анемометра и других вспомогательных устройств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Балагуров, В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галатеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 324 с.
- 2 Воздвиженская, А.И. Подсели на дробное питание. Разнообразие спроса на энергию выводит в лидеры малую генерацию / А.И. Воздвиженская // Российская газета. – 2017. – № 9 (22). – С. 10–11.
- 3 Ганджа, С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок / С.А. Ганджа // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 25–28.
- 4 ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – Введ. 1999–07–01. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 12 с.
- 5 ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. – Введ. 2003–07–01. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 7 с.
- 6 ГОСТ Р 54433-2011. Ветроэлектростанции. Требования по безопасности при эксплуатации. – Введ. 2011–09–28. – М.: Стандартинформ, 2012. – 95 с.
- 7 Историк, Б.Л. Исследование характеристик вертикальной ветроэнергетической установки с аэродинамическим регулированием / Б.Л. Историк, Ю.Б. Шполянский // Энергетическое строительство. – 1991. – № 3. – С. 37–39.
- 8 Ковалев, О.П. Стабилизация частоты вращения исполнительного механизма установки / О.П. Ковалёв, И.Н. Кукушкин // Автономная и нетрадиционная энергетика. – 1998. – № 1. – С. 24–25.
- 9 Лузина, Л.И. Компьютерное моделирование: учебное пособие / Л.И. Лузина. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2001. – 105 с.
- 10 Мартьянов, А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.С. Мартьянов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – 174 с.
- 11 Моделирование систем управления: методические указания к выполнению курсовой работы / Под ред. С.В. Шалобанова. – Хабаровск: ХГТУ, 2003. – 49 с.
- 12 Разработка научно-технических решений компонентов мобильных зарядных устройств для аккумуляторных батарей гибридного и электрического приводов городского грузового и пассажирского автомобильного транспорта по теме: «теоретические исследования». Этап второй : отчет о НИР (промежуточ.) : 153-154 / ЮУрГУ; рук. Соломин Е.В.
- 13 Расчет параметров накопителей энергии для автономных энергокомплексов: методические указания / Под ред. И.М. Кирпичниковой и Е.В. Соломина. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015. – 20 с.
- 14 Рязанцев, В.Д. Большая политехническая энциклопедия / В.Д. Рязанцев. – М.: Мир и Образование, 2011. – 704 с.
- 15 Сергеев, В.Д. Синхронный генератор с постоянными магнитами для ветроэлектрической установки / В.Д. Сергеев, Е. В. Кулешов // Автономная и нетрадиционная энергетика. – 1998. – № 1. – С. 24–25.

- 16 Соломин, Е.В. Алгоритмы автоматической зарядки LiFePO<sub>4</sub> аккумуляторов / Е.В. Соломин, Д.В. Топольский, И.Г. Топольская. – Челябинск, 2015, – 13 с.
- 17 Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии : учеб. пособие / С.Н. Удалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 459 с.
- 18 Филаретов, В. Ф. Разработка системы автоматической стабилизации параметров выходного напряжения автономной ветроэнергетической установки / В.Ф. Филаретов, А.А. Кацурин // *Электричество*, 2001. – № 7. – С.37–42.
- 19 Филаретов, В. Ф. Система управления генератором ветроэнергетической установки / В.Ф. Филаретов, А.А. Кацурин // *Сборник трудов Дальневосточного отделения Российской инженерной академии*. – Владивосток: ДВГТУ, 2000. – № 1. – С. 28–41.
- 20 Чекстер, О. Свинцово-кислотные аккумуляторы для стационарного оборудования связи / О. Чекстер, И. Джосан // *Технологии и средства связи*. – 2004. – № 2. – С.12–13.
- 21 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. – P.163–168.
- 22 <http://at-systems.ru>.
- 23 <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-2/2-2-2>.
- 24 <https://matlab.ru/products/simulink>.
- 25 <https://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/what-is-an-s-function.html>.
- 26 <http://www.wwindea.org/half-year-statistics-2017>.
- 27 Hui, J. A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems / J. Hui, A. Bakhshai // *Proc. IEEE PESC 2008, Rhodes*. – 2008. – № 6. – P. 4003–4007.
- 28 Hui, J. Adaptive algorithm for fast maximum power point tracking in wind energy systems / J. Hui, A. Bakhshai // *Proc. IEEE IECON 2008, Orlando, USA*. – 2008. – № 6. – P. 2119–2124.
- 29 Jeong, H.G. An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Wind Power Systems / H.G. Jeong, R.H. Seung, K.B. Lee // *Energies*. – 2012. – № 5. – P. 1340.
- 30 Koutroulis, E. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications / E. Koutroulis, K. Kalaitzakis // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2006. – № 2. – P. 486–494.
- 31 Kwon, J.M. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems / J.M. Kwon, J.H. Kim, S.H. Kwak, H.H. Lee // *Proc. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapour*. – 2008. – № 11. – P. 639–643.
- 32 Matsui, M. Limit Cycle Based Simple MPPT Control Scheme for a Small Sized Wind Turbine Generator System / M. Matsui, D. Xu, L. Kang, Z. Yang // *Proc. of 4<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an*. – 2004. – № 14. – P. 1746–1750.
- 33 Patsios, C. A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators / C. Patsios, A. Chaniotis, and A. Kladas // *IEEE PESC 2008, Rhodes*. – 2008. – № 6. – P. 1749–1754.

34 Thongam, J.S. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems / J.S. Thongam, M. Ouhrouche // *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. – 2011. – № 1. – P.339–360.

35 Wang, Q. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / Q. Wang, L. Chang // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2004. – № 5. – P. 1242–1249.

36 Yaoqin, J. A new maximum power point tracking control scheme for wind generation / J. Yaoqin, Y. Zhongqing, C. Binggang // *Proc. International Conference on Power System Technology*. – 2002. – № 13. – P. 144–148.