**Антропов, Алексей Петрович. Энергоэффективная система электроснабжения с автономным источником нестабильной мощности : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Антропов Алексей Петрович; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т].- Нижний Новгород, 2013.- 218 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-5/1772**

Минобрнауки России

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. Р.Е. Алексеева



На правах рукописи 04201359179

Антропов Алексей Петрович

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕСТАБИЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, Профессор Лоскутов А.Б.

Нижний Новгород 2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение 5

1 Анализ современных устройств регулирования напряжения и
мощности в системах бесперебойного электроснабжения. Постановка
цели и задач исследования 12

1.1 Исследования и анализ существующих систем и устройств
бесперебойного электроснабжения 12

1.2 Средства регулирования напряжения 16

1.2.1 Регулирование медленных изменений (отклонения)
напряжения 17

1. Снижение колебаний напряжения 18
2. Снижение несинусоидальности напряжения 19
3. Снижение несимметрии напряжения в трехфазной сети 20
4. Средства компенсации реактивной мощности 21
5. Анализ применения ветроэлектрических генераторов в системах электроснабжения потребителей. Постановка цели и задач исследования 25
6. Альтернативные источники электроэнергии 25
7. Анализ применения ВЭГ 27
8. Постановка цели и задач исследования 30

1.5 Выводы по главе 1 32

2 Обоснование выбора схемотехнического решения Устройства
бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором и
его системы управления 33

1. Анализ структурных схем бесперебойного электроснабжения потребителей 33
2. Бестрансформаторные инверторы напряжения 39
3. Требования к выходному напряжению инверторов 39
4. Методы формирования выходного напряжения 41
5. Силовая часть бестрансформаторного инвертора напряжения 46

**2**

1. Построение структурной схемы системы управления Устройством бесперебойного электроснабжения с ВЭГ 48
2. Выводы по главе 2 53

3 Моделирование Устройства бесперебойного электроснабжения с ВЭГ

и его системы управления 54

3.1 Математическая модель устройства бесперебойного
электроснабжения с ВЭГ 54

1. Теоретические основы компенсации неактивной мощности.. 54
2. Режимы работы инвертора напряжения УБЭ с ВЭГ 57
3. Векторное описание мгновенной передаваемой мощности... 61

3.1.4 Принцип формирования компенсационной мощности 68

1. Математическая модель ИН в инверторном режиме 74
2. Математическое описание алгоритма широтно-импульсной модуляции ИН 75

3.1.7 Математическое описание блока фазовой автоподстройки
частоты 78

3.1.8 Метод гистерезисного контроля тока 80

3.2 Имитационная модель устройства бесперебойного
электроснабжения с ВЭГ 85

1. Базовые модели элементов 85
2. Измерительные устройства 88
3. Упрощенная модель трехфазного инвертора напряжения.... 89
4. Модель инвертора напряжения 89
5. Модель ИН в автономном режиме 91
6. Модель ИН при совместной работе с электросетью 91

3.3 Имитационная модель системы управления инвертором
напряжения 92

3.4 Выводы по главе 3 100

4 Исследование режимов работы системы управления устройством
бесперебойного электроснабжения (УБЭ) с ВЭГ 101

**3**

1. Моделирование узла распределенной энергосистемы с ВЭГ 101
2. Исследование режимов работы УБЭ с ВЭГ и анализ результатов.. 107

4.2.1 Режимы работы при управлении параметрами задания
подчинённого инвертора 108

4.2.2 Исследования при управлении параметрами задания
ведущего и подчиненного инверторов 112

1. Результаты испытаний системы регулирования на базе инверторов напряжения 114
2. Выводы по главе 4 116

5 Инжиниринговые решения по созданию системы управления и применению Устройства бесперебойного электроснабжения с

ветроэлектрогенератором 117

5.1 Технология модельно-ориентированного проектирования системы
управления 117

5.2 Разработка системы управления УБЭ с ВЭГ на базе
промышленного компьютера 126

5.3 Применение Устройства бесперебойного электроснабжения с ВЭГ

в системе электроснабжения ответственных потребителей 141

5.4 Выводы по главе 5 143

Заключение 145

Список использованных источников 148

Приложение А. Имитационное моделирование УБЭ с ВЭГ и системы

управления 168

Приложение Б. Результаты исследований режимов работы УБЭ с ВЭГ.. 185
Приложение В. Окна задания параметров блоков системы управления

УБЭ с ВЭГ 210

Приложение Г. Акты внедрений результатов диссертационной работы.. 216

**4**

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** В соответствии с Энергетической стратегией
России до 2030 года, обеспечение надежности электроснабжения и высокой
энергетической эффективности использования электроэнергии относятся к
одним из основных стратегических целей развития электроэнергетики [192].
В настоящее время для находящихся в эксплуатации электрических сетей
общего назначения напряжением 0,4 кВ характерно низкое качество
электрической энергии (статистика свидетельствует [131], что 90%
электроэнергии, поставляемой бытовым потребителям из распределительных
электрических сетей, не соответствует требованиям ГОСТ 13109-97 в
отношении нормально допустимых значений). Подключение к таким сетям
высокотехнологичного оборудования (компьютеров, серверов,

телекоммуникационной аппаратуры, банковских технологий и др.) связано с повышенным риском выхода его из строя и, что самое опасное, с потерей информации. Для предотвращения перебоев в работе и выхода из строя ответственных потребителей электроэнергии необходимы системы бесперебойного электроснабжения, обеспечивающие непрерывное питание электрической энергией требуемого качества подключенных к ней потребителей при любых отказах и неисправностях в основных сетях электроснабжения. Такие системы строятся на основе источников бесперебойного питания (ИБП), источников резервного питания и автономных резервных источников, например, дизель-генераторных установок [2, 117, 118].

Вместе с тем, приобретает особую актуальность проблема разработки устройств бесперебойного электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии. Решение указанной проблемы имеет большое значение для бесперебойного и качественного энергообеспечения территорий, удаленных от крупных электростанций, не охваченных электрическими сетями, испытывающих недостаток существующих мощностей. Современные технологии позволяют отнести энергию ветра к числу возобновляемых

5

источников, имеющих наиболее значительный экономический потенциал [108]. Особенностью ветроэлектрических установок (ВЭУ) является нестабильность выходной мощности, связанная с непостоянством характеристик ветра как энергоносителя. Для эффективной передачи и распределения электроэнергии в системах электроснабжения с ветроэлектрическим генератором (автономным источником нестабильной мощности) необходимо решить задачу согласования (сопряжения) выходных параметров ВЭУ с параметрами промышленной электросети и входными параметрами потребителей. Также следует обеспечить оперативное управление режимами работы системы электроснабжения за счет гибкого перераспределения активной и реактивной мощности в зависимости от конкретной складывающейся ситуации, связанной с изменением нагрузки или параметров ветра и соответствующим изменением выходных мощностей ВЭУ.

Значительный вклад в развитие теории и практики применения ветроэлектрических установок в системах электроснабжения внесли отечественные ученые П.П. Безруких, В.Н. Ефанов, В.Г. Николаев, О.С. Попель, Я.И. Шефтер [24, 25, 79, 129, 130, 185] и др. Однако проблема синхронизации автономного источника нестабильной ограниченной мощности с общепромышленной сетью пока не решена, что сдерживает широкое применение ВЭУ в системах электроснабжения потребителей.

Таким образом, необходимость в разработке системы электроснабжения с автономным источником нестабильной мощности, позволяющей эффективно использовать энергию возобновляемых источников и обеспечивающей бесперебойное питание ответственных потребителей электрической энергией требуемого качества, обуславливает научную актуальность темы диссертационной работы.

**Объект исследования.** Система двойного питания «общепромышленная электрическая сеть - автономный источник нестабильной мощности».

**Предмет исследования.** Энергоэффективные режимы работы системы электроснабжения с автономным источником нестабильной мощности.

6

Цель работы. Решение вопросов сопряжения параметров и управления системы двойного питания «общепромышленная сеть - автономный источник нестабильной мощности (на примере ветроэлектрического генератора)», обеспечивающих эффективность передачи и распределения электрической энергии, ее качество и бесперебойность электроснабжения ответственных потребителей.

Для достижения поставленной цели, в работе решаются следующие научные и практические задачи.

* Исследование и анализ существующих устройств бесперебойного питания, средств регулирования напряжения и мощности, применения ветроэлектрических генераторов в системах электроснабжения потребителей.
* Обоснование выбора схемотехнического решения Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором и его системы управления.
* Разработка имитационной модели системы управления Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором. Исследование энергоэффективных режимов работы Устройства.

• Создание прототипа системы управления Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором на базе промышленного компьютера.

Положения, выносимые на защиту:

* Схемотехническое решение Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором и его системы управления, обеспечивающее эффективное и бесперебойное питание электропотребителей.
* Компьютерная модель Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором, работающего в автономном режиме и параллельно с общепромышленной электросетью.

**7**

* Имитационная модель системы управления Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором.
* Результаты исследований энергоэффективных режимов работы Устройства бесперебойного электроснабжения с ветроэлектрическим генератором (режимы компенсации неактивной мощности и регулирования потока мощности).

**Методы исследования.** Исследования проводились методами

математического и программно-ориентированного (имитационного) моделирования с широким использованием основных законов теоретических основ электротехники и промышленной электроники. При разработке математической модели устройства бесперебойного электроснабжения использован математический аппарат общей теории мгновенной мощности. При разработке математической модели системы управления использован математический аппарат с применением преобразований Кларка и Парка-Горева. Имитационное моделирование УБЭ с ВЭГ осуществлялось с применением пакета *Matlab/Simulink.* Разработка прототипа системы управления Устройства бесперебойного электроснабжения с ВЭГ основана на использовании пакета реального времени *Real Time Windows Target.* Проверка и тестирование разработанной системы управления проводились по схеме *"Hardware-in-the-Loop".*

**Научная новизна.**

* Предложены алгоритмы управления и реализующее их схемотехническое решение Устройства бесперебойного электроснабжения с автономным источником ограниченной нестабильной мощности, отличающееся от существующих наличием в составе двух бестрансформаторных инверторов напряжения (ведущего и подчиненного), связанных емкостным накопителем энергии, что позволяет реализовать как автономный режим работы ВЭГ, так и параллельный с промышленной электросетью.
* Разработаны методические принципы построения и реализации математических моделей УБЭ в компенсационном и инверторном режимах,

**8**

отражающие физические процессы в трёхфазной четырёхпроводной системе электроснабжения при наличии двух независимых источников питания: локальной сети с ВЭГ и промышленной электрической сети.

•На основе математического аппарата с применением преобразований Кларка и Парка-Горева разработана система управления УБЭ с ВЭГ, позволяющая оперировать не виртуальными мгновенными мощностями, а непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения, что значительно упрощает взаимодействие с внешними цепями задания и регулирования требуемых параметров качества электроэнергии в промышленных сетях.

• Разработана виртуальная модель узла системы электроснабжения

двойного питания (локальная сеть с ВЭГ - общепромышленная сеть) для исследования взаимодействия инверторов напряжения и сетей по потокам мощности активной и реактивной составляющих с заданными параметрами. Это позволило получить регулировочные характеристики зависимостей потоков активной и реактивной мощностей между двумя электрическими сетями от угла и амплитуды напряжения задания системы управления и выявить энергоэффективные режимы работы УБЭ с ВЭГ.

**Практическая ценность.** Разработано новое Устройство бесперебойного электроснабжения, учитывающее нестабильность выходной мощности автономного источника энергии и обеспечивающее непрерывное питание электрической энергией требуемого качества подключенных к нему потребителей.

Предложено решение проблемы синхронизации автономных источников нестабильной ограниченной мощности с общепромышленной сетью, реализованное в разработанной схеме УБЭ с ВЭГ и законах его управления. Это будет способствовать широкому применению ВЭУ в системах электроснабжения потребителей.

Реализован интерактивный процесс разработки прототипа системы управления, включающий пакет *Real Time Windows Target,* осуществляющий

**9**

автоматическую генерацию управляющего кода из *Simulink.* Данный процесс разработки позволяет создать законченную работоспособную систему управления и непосредственно перейти к управлению реальным объектом сразу же после окончания исследований, исключая дополнительные затраты на адаптацию при внедрении разработанной системы.

**Реализация результатов работы.** Решения по созданию системы автоматического регулирования процессом преобразования и передачи электрической энергии в системах бесперебойного электроснабжения внедрены ЗАО «ЭлектроИнтел», где на базе опытного производства проведена их промышленная апробация, показавшая положительные практические результаты. Предложенные технологии программно-аппаратной разработки прототипов систем автоматического регулирования позволяют значительно снизить материальные и временные затраты на их изготовление.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедр «Электроэнергетика и электроснабжение» и «Промышленная электроника» Факультета автоматики и электромеханики Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева при чтении лекций, проведении лабораторных и научно-исследовательских работ по курсам «Системы электроснабжения», «Автоматизированные системы управления в электроснабжении» и «Промышленная электроника».

**Апробация работы.** По основным теоретическим положениям и результатам диссертации сделаны доклады: на XL Всероссийской научно-практической конференции «Федоровские чтения 2010», г. Москва, Московский энергетический институт (Технический университет), 2010г.; международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» г. Самара, СамГТУ, 2011г.; научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики», г. Нижний Новгород, НГТУ, 2010г.; VII, VIII Всероссийской научной молодежной школе с международным участием «Возобновляемые источники энергии», г. Москва, МГУ, 20 Юг, 2012г.; XVII региональной конференции «Нижегородская сессия молодых

**10**

ученых. Технические науки», г. Нижний Новгород, 2012 г.; X и XI Международных молодежных научно-технических конференциях «Будущее технической науки», г. Нижний Новгород, НГТУ, 2011, 2012 гг.; конференции «Использование возобновляемых источников энергии», г.Москва, ЦБК «Экспоцентр», 2011 г. Работа, в целом, докладывалась на расширенном заседании кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и научно-техническом совете Электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 13 публикациях, в том числе 3 публикациях в рецензируемых научных журналах «Промышленная энергетика», «Теплоэнергетика», «Инженерный вестник Дона» из Перечня, утвержденного ВАК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлена и решена задача сопряжения параметров и управления системы двойного питания «общепромышленная сеть — автономный источник нестабильной мощности (на примере ВЭГ)», обеспечивающих эффективность передачи и распределения электрической энергии, ее качество и бесперебойность электроснабжения ответственных потребителей. На основании проведенных исследований получены следующие научные и практические результаты.

1. Анализ существующих устройств бесперебойного электроснабжения и средств регулирования напряжения и мощности, показал, что наиболее перспективны и экономичны устройства АРПС в составе с полупроводниковыми преобразователями.
2. При разработке Устройства бесперебойного электроснабжения с ВЭГ необходимо учитывать нестабильность выходных параметров ветрогенераторов, поэтому целесообразно применить структуру *on-line,* обеспечивающую возможность формирования выходного гармонического напряжения с заданными параметрами при широком допустимом диапазоне изменения напряжения и мощности ВЭГ.
3. Разработаны алгоритмы и реализующее их схемотехническое решение УБЭ с ВЭГ на базе трехфазных инверторов напряжения для обеспечения связи и совместной работы двух сетей (локальной с ВЭГ и общепромышленной электросети) на общую нагрузку, позволяющее обеспечить передачу, распределение и улучшение качества электроэнергии в прямом и обратном направлении потоков мощностей.
4. Разработана структурная схема системы управления УБЭ с ВЭГ, позволяющая реализовать в реальном времени установленные функциональные возможности УБЭ и обеспечивающая повышение эффективности передачи и распределения электроэнергии за счет оптимизации параметров

145

электропотребления от ВЭГ (практически активная мощность, симметричные трехфазные токи).

1. Показано, что для формирования компенсационных токов ИН необходима взаимозависимая система, обеспечивающая связь между передаваемой мощностью и компенсационными токами, которая отражается в теории мгновенной мощности и может быть представлена в комплексных системах координат: стационарной - (а, р, у), и синхронной - *{d, q,* 0). С применением преобразований Кларка и Парка-Горева разработана математическая модель режимов работы УБЭ, а на ее основе имитационная модель системы управления УБЭ с ВЭГ, позволяющая оперировать непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения, а не виртуальными мгновенными мощностями. Это позволило упростить взаимодействие с внешними цепями задания и регулирование требуемых параметров качества электроэнергии.
2. Для проведения исследований энергоэффективных режимов работы УБЭ с ВЭГ (режимы компенсации реактивной мощности, компенсации высших гармонических составляющих, регулирования потока мощности) разработана упрощенная имитационная модель узла системы электроснабжения двойного питания (локальная сеть с ВЭГ - общепромышленная сеть).
3. Исследованы зависимости величин потоков активной и реактивной мощностей между двумя электрическими сетями при: раздельном управлении фазовым углом или амплитудой напряжения задания; сочетании управления фазовым углом и амплитудой напряжения задания по параметрам *d* и *q* подчиненного инвертора ИН2. Определены регулировочные характеристики передачи активной мощности из сети с ВИЭ в промышленную сеть электропитания при компенсации реактивной мощности в промышленной сети. Установлено, что применение тех же параметров к ведущему инвертору ИН1 вызывает обратный процесс перетока мощности.
4. Разработаны инжиниринговые решения повышения эффективности передачи и распределения электрической энергии УБЭ с ВЭГ: создан прототип

146

его системы управления на базе промышленного компьютера *iROBO-5* 000-93/3 с установленной операционной системой *Windows* 7 *Professional 32bit Russian.* Реализован интерактивный процесс разработки прототипа системы управления, включающий пакет *Real Time Windows Target,* осуществляющий автоматическую генерацию управляющего кода из *Simulink.* Проведены исследования прототипа СУ в режиме реального времени по схеме программно-аппаратного тестирования *'''Hardware in the Loop"* при управлении ведущим и подчиненным инверторами, работающими на динамическую нагрузку.

9. Разработана однолинейная схема системы электроснабжения в составе с УБЭ с ВЭГ, позволяющая эффективно использовать энергию возобновляемого источника и обеспечивающая бесперебойное питание ответственных потребителей электрической энергией требуемого качества