

На правах рукописи

Сулейманов Руслан Ахмадеевич

**СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ ТОКА
ПОВЫШАЮЩИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Автореферат
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО «Кубанский ГАУ»)

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Григораш Олег Владимирович
- Официальные оппоненты: Никитенко Геннадий Владимирович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Применения электроэнергии в сельском хозяйстве»
- Юндин Михаил Анатольевич
кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Азово-черноморская государственная агроинженерная академия», профессор кафедры «Теоретические основы электротехники и электроснабжения сельского хозяйства»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова» (г. Нальчик)

Защита состоится «28» июня 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, КубГАУ, корпус факультета энергетики и электрификации, ауд. № 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет».

Автореферат размещен на сайте ВАК РФ <http://vak2.ed.gov.ru/>
«27» мая 2013 года.

Автореферат размещен на сайте Кубанского ГАУ <http://kubsau.ru>
«27» мая 2013 года.

Автореферат разослан «27» мая 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

В.С. Курасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Как известно, электроснабжение сельскохозяйственных потребителей имеет свои особенности, связанные со спецификой сельскохозяйственного производства, рассредоточенного по значительной территории с малыми удельными электрическими нагрузками, которые, к тому же, имеют сезонный характер. Эти обстоятельства определяют специфические требования к построению электроэнергетических систем сельского хозяйства в целом.

В тоже время высокие темпы развития сельскохозяйственного производства в настоящее время, ведут к непрерывному повышению потребления электроэнергии, а также к широкому внедрению автоматических систем управления технологическими процессами и производственными комплексами. Цена нарушений нормальных режимов работы таких систем, связанных с отклонением показателей качества электроэнергии, с внезапными перерывами электроснабжения, из-за аварийных ситуаций чрезвычайно высока.

Актуальным в настоящее время является направление разработки автономных систем электроснабжения (АСЭ) для сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Такие системы повышают надёжность электроснабжения потребителей. Кроме того, применение ВИЭ в качестве основных источников энергии уменьшит сроки их окупаемости, с учётом ежегодного повышения стоимости электроэнергии, получаемой от традиционных источников.

Применяемые в настоящее время стабилизаторы параметров электроэнергии ветроэлектрических установок (ВЭУ) имеют относительно низкие эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) и, прежде всего из-за механических устройств, обеспечивающих стабилизацию частоты вращения ветроколеса и соответственно частоты тока, а также из-за относительной сложности системы стабилизации напряжения.

Диссертационная работа посвящена разработке стабилизатора напряжения и частоты тока генератора ВЭУ.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой КубГАУ «Теоретическое обоснование и практическая реализация энергосберегающего оборудования, электротехнологий и систем автономного электро- и теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей с использованием ВИЭ» на 2011 – 2015 гг. (№ ГР 01.2011.53641).

Научная гипотеза состоит в том, что разработка стабилизатора параметров электроэнергии генератора ВЭУ, обеспечивающего одновременно стабилизацию частоты тока и напряжения позволит улучшить ЭТХ автономного источника электроэнергии и ВЭУ в комплексе.

Цель работы - улучшение эксплуатационно-технических характеристик ВЭУ, за счёт использования бесконтактного асинхронного генератора (АГ) емкостного возбуждения и стабилизатора напряжения и частоты тока, выполненного на непосредственном преобразователе частоты.

Задачи исследования:

1. Раскрыть особенности работы и основные характеристики непосредственных преобразователей частоты.
2. Обосновать выбор автономного источника электроэнергии для ветроэлектрической установки.
3. Разработать функциональные схемы стабилизаторов напряжения и частоты тока на непосредственном преобразователе частоты (НПЧ) с естественной коммутацией (НПЧЕ) и НПЧ с регулируемым углом сдвига фаз (НПЧР).
4. Разработать математический аппарат для оценки эффективности автономных источников электроэнергии систем АГ–НПЧЕ и АГ–НПЧР.
5. Разработать математическую модель автономного источника электроэнергии системы АГ–НПЧ и провести её исследования.

6. Провести расчёт экономической эффективности ВЭУ и разработать комбинированные структурные схемы автономных систем электроснабжения с их использованием.

Объект исследования - стабилизаторы напряжения и частоты тока бесконтактного асинхронного генератора с емкостным возбуждением, выполненные на НПЧ.

Предмет исследования - критерии эффективности стабилизатора параметров электроэнергии, которыми являются качество напряжения, показатели надежности, массогабаритные показатели, электрические потери и КПД, а также математическая модель автономного источника электроэнергии системы АГ-НПЧЕ,

Методы исследования базируются на использовании теории электрических цепей, основ теории электрических машин, статических стабилизаторов и преобразователей электроэнергии, рядов Фурье, метода Рунге – Кутты, применяемого для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положения которых нашли применение в работе, а также разработанными автором новых теоретических положений по расчёту критериев эффективности и параметров стабилизатора согласованные с известными теоретическими положениями науки.

Научную новизну работы составляют:

1. Математический аппарат для оценки эффективности автономного источника электроэнергии системы АГ–НПЧ.
2. Методика расчета параметров схемы замещения автономной системы АГ–НПЧ.
3. Математическая модель автономной системы АГ–НПЧ.

Практическую значимость работы составляют:

1. Функциональные схемы стабилизаторов напряжения и частоты тока АГ, выполненные на НПЧЕ и НПЧР.

2. Результаты исследования математической модели автономной системы АГ–НПЧЕ.

3. Рекомендации по проектированию стабилизатора параметров электроэнергии для АГ на НПЧ.

4. Разработанные структурно-схемные решения автономных систем электроснабжения на ВЭУ.

5. Результаты расчёта экономической эффективности ВЭУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Функциональные схемы стабилизаторов напряжения и частоты тока АГ на НПЧЕ и НПЧР.

2. Математический аппарат для оценки эффективности автономного источника электроэнергии системы АГ–НПЧ.

3. Методика расчёта параметров схемы замещения автономной системы АГ-НПЧЕ.

4. Математическая модель автономного источника электроэнергии системы АГ–НПЧЕ и результаты её исследований.

5. Результаты расчёта экономической эффективности ВЭУ.

Реализация результатов работы:

1. Математический аппарат для оценки эффективности автономных источников электроэнергии ВЭУ передан в ООО «Энергосетевая компания» г. Краснодар.

2. Результаты научных исследований применяются в учебном процессе на кафедре «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» в Кубанском ГАУ (г. Краснодар) при изучении дисциплины «Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии».

Личный вклад автора заключается в формулировке общей идеи и цели работы, предложении нового структурно-схемного решения стабилиза-

тора напряжения и частоты тока АГ ВЭУ, в разработке методики расчёта критериев эффективности автономного источника электроэнергии, методики расчёта параметров принципиальной схемы замещения и математической модели системы АГ–НПЧ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на четырех научных и научно-практических конференциях, в том числе: на VII Всероссийской школе с международным участием в Московском ГУ (г. Москва, 2010 г.); на II международной НПК «Актуальные проблемы энергетики АПК» в Саратовском ГАУ (г. Саратов, 2011 г.); на VI Российской НПК «Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК» в Ставропольском ГАУ (г. Ставрополь, 2011 г.); на V международной НПК «Энергосберегающие технологии и проблемы их эффективного использования» в Волгоградской ГСХА (г. Волгоград, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано: 10 научных работ, включая монографию и 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК. Общий объём публикаций составляет 19 п. л., из которых 5,8 п. л. принадлежит лично автору.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованных источников, включающего 118 наименований и приложения. Общий объём диссертации 134 страницы машинописного текста, включая 43 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований. Сформулированы цель и задачи исследований, объект и предмет исследований, научная новизна, практическая значимость и вопросы, выносимые на защиту.

В первой главе раскрываются перспективы возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в том числе, ветроэлектрических станций (ВЭС) в Краснодарском крае. Показано, что в крае ресурсы ВИЭ в несколько раз превы-

шают ресурсы традиционной энергетики. Кроме того, ежегодное повышение потребления электроэнергии и тарифы на неё (рисунки 1 и 2) раскрывают широкие перспективы перед внедрением ВИЭ в Краснодарском крае. Здесь предпочтительные характеристики имеет ветровой потенциал региона, в том числе отработанные мировые технологии по созданию высокоэффективных ветроэлектрических станций (ВЭС).

Проведён анализ современных способов стабилизации параметров ветроэлектрических установок (ВЭУ) и раскрыты их недостатки.

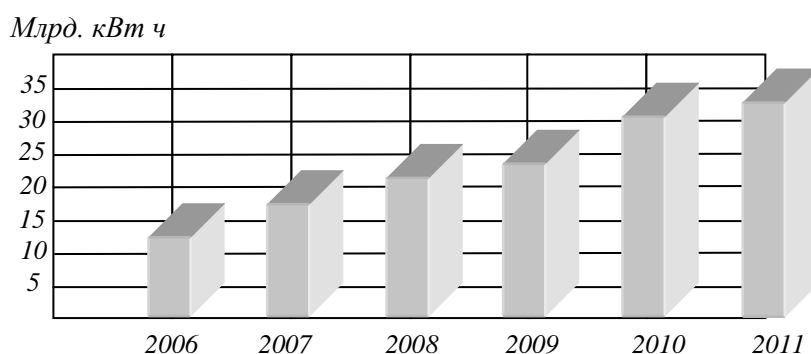


Рисунок 1 – Потребление электрической энергии в Краснодарском крае по годам

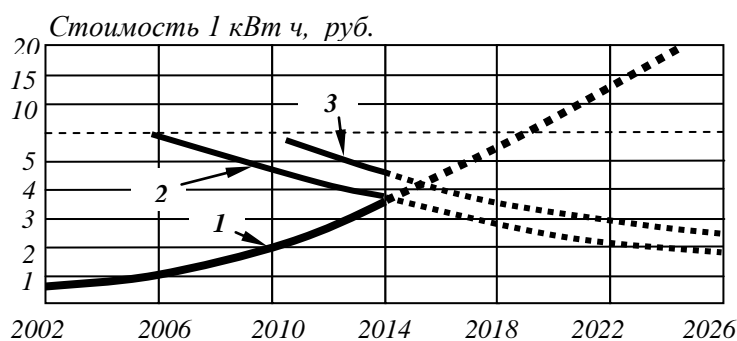


Рисунок 2 – Средние значения тарифов на электроэнергию в Краснодарском крае от традиционных источников (1) и возобновляемых источников: ВЭС (2); солнечных электростанций (3). Пунктирной линией показан прогноз

Для улучшения ЭТХ ВЭУ предложено упростить конструкцию механического редуктора (мультипликатора), отказавшись от автоматической системы стабилизации частоты вращения ветроколеса, а стабилизацию частоты тока и напряжения осуществлять НПЧ.

Показано, что силовая схема НПЧ должна быть выполнена с использованием современных тиристорov, обеспечивающих естественную коммутацию силовой цепи преобразователя, поскольку стоимость преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока, выполненных на силовых транзисторах с изолированным затвором (IGBT) в 5 – 10 раз выше стоимости НПЧ, выполненных на тиристорах, в зависимости от мощности. Кроме того, преобразователи частоты на IGBT транзисторах имеют сложную систему управления и соответственно ниже показатели надёжности. Сформулирована цель и задачи исследований.

Во второй главе для улучшения ЭТХ ВЭУ приведены доводы о необходимости применения в их составе бесконтактных генераторов: асинхронные генераторы с емкостным возбуждением (АГ) или синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ). АГ в сравнении с СГПМ имеют ряд преимуществ: ниже стоимость, лучшие регулировочные характеристики (характеристики СГПМ зависят от материала постоянных магнитов и температуры).

Раскрыты основные преимущества НПЧ, при их использовании в качестве стабилизаторов параметров электроэнергии АГ:

- высокий КПД ($0,93 - 0,94$) вследствие однократности преобразования электроэнергии;
- высокая надёжность и перегрузочная способность;
- возможность независимого плавного регулирования частоты тока и напряжения при таких дестабилизирующих факторах, как изменение частоты тока на входе преобразователя, изменение величины и характера нагрузки;
- высокое быстродействие и малое время переходных процессов;
- независимо от фазового угла сдвига фаз на выходе преобразователя их системы управления могут изменять угол сдвига фаз на входе преобразователя.

Раскрыты достоинства и недостатки НПЧЕ и НПЧР. Основным достоинством НПЧЕ является относительно не сложная силовая схема и система управления, а недостатком – НПЧЕ для АГ является активно-индуктивной нагрузкой, что требует повышенную ёмкость конденсаторов обеспечивающих его возбуждение. Основным достоинством НПЧР является то, преобразователь для АГ является активно-емкостной нагрузкой, что позволяет исключить конденсаторы, предназначенные для компенсации реактивной мощности нагрузки. Основными недостатками НПЧР являются: сложная силовая часть и система управления.

Разработаны функциональные схемы стабилизации параметров электроэнергии ВЭУ с использованием НПЧЕ и НПЧР и раскрыты особенности их работы.

В третьей главе предложена методика инженерного расчёта массогабаритных показателей, электрических потерь и КПД НПЧ, результаты которой позволят на этапе предпроектных работ провести предварительную оценку эффективности АИЭ для ВЭУ, выполненного на базе АГ и НПЧ.

Результаты расчёта показали, что АИЭ для ВЭУ, выполненный на базе АГ и НПЧЕ имеет выше показатели надёжности. Так наработка до первого отказа превышает несколько тысяч часов, а КПД в сравнении с АИЭ, выполненным на базе АГ и НПЧР на 3-4% выше. Система АГ-НПЧЕ незначительно уступает по массе системе АГ-НПЧР (рисунки 3 и 4).

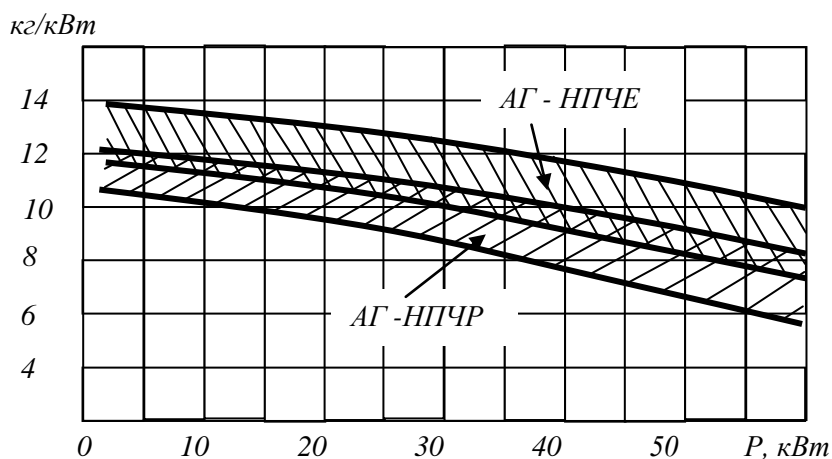


Рисунок 3 – Зависимости удельной массы АИЭ на НПЧ от мощности для $f_{вх}/f_{вых} = 4...5$

Обязательным элементом НПЧ является выходной фильтр, на параметры которого оказывает влияние амплитуда модулирующей функции и кратность входной частоты к выходной.

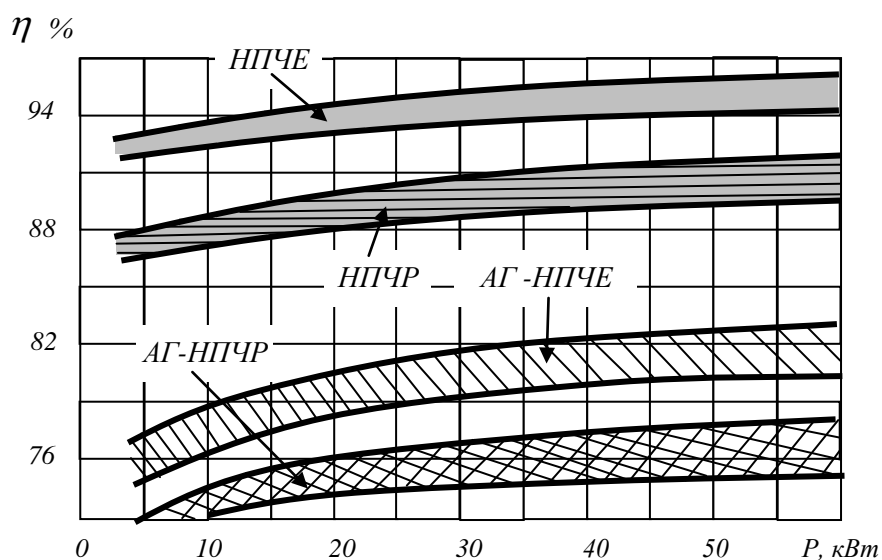


Рисунок 4 – Зависимости КПД и АИЭ на НПЧ от мощности для $f_{вх}/f_{вых} = 4...5$

При исследовании качества выходного напряжения НПЧ в аварийных режимах работы определено, что при выходе из работы одного полупроводникового прибора силовой схемы значение коэффициента несинусоидальности K_H увеличивается в 1,3 – 1,5 раз в фазе в которой не работает прибор и K_H увеличивается на 10 – 20% в двух других фазах. При выходе из работы двух тиристоров в одном или разных вентильных комплектах приводит к значительному искажению формы кривой выходного напряжения (значение коэффициента несинусоидальности K_H может увеличиться в 4 – 5 раз).

Результаты расчёта гармонического состава не показали существенных различий предложенных двух вариантов АИЭ АГ-НПЧЕ и АГ-НПЧР.

Проанализировав результаты расчётов, сделан вывод о целесообразности использования в составе ВЭУ АИЭ, выполненный на базе АГ и НПЧЕ.

В четвёртой главе разработана принципиальная электрическая схема замещения системы АГ-НПЧ (рисунок 5) и разработана методика расчёта параметров элементов схемы замещения.

Предложен математический аппарат для анализа электромагнитных процессов, протекающих в силовой схеме НПЧ. Систему уравнений, описывающую физические процессы можно составить с применением классических методов с использованием законов Кирхгофа и Ома, а для сложных электрических схем необходимо применять теорию графов.

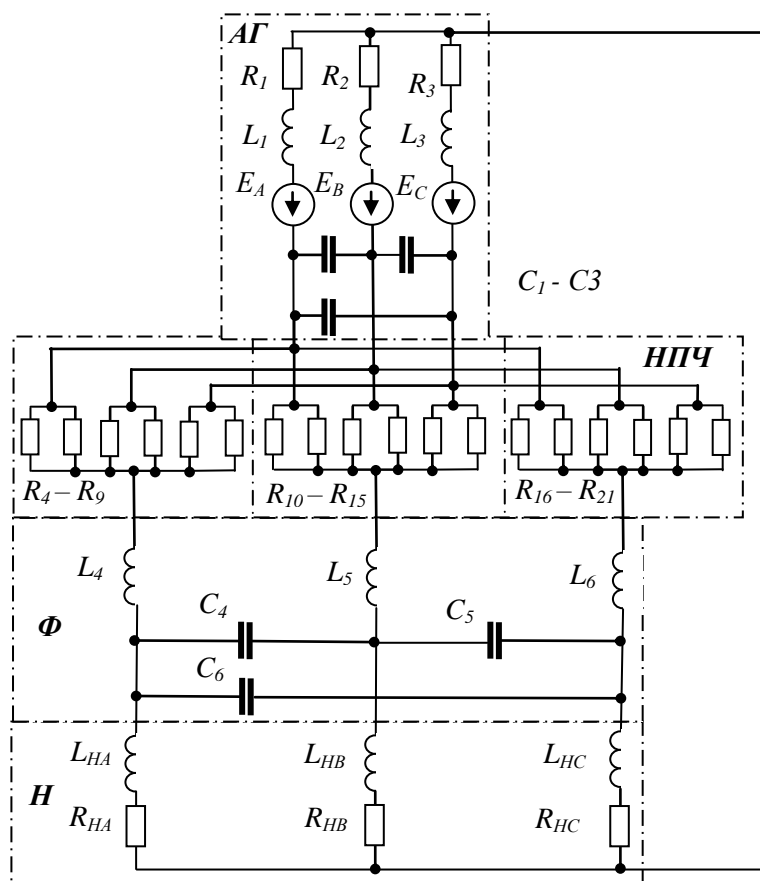


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема замещения системы АГ-НПЧ

Для упрощения расчётов систему уравнений (математическую модель) предложено решать с использованием метода Рунге-Кутты, предварительно эту систему преобразовав в форме записи Коши. Раскрыт вид представления компонентных и топологических уравнений и алгоритм решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.

Математическая модель системы АГ-НПЧ, представленная системой дифференциальных (1) и алгебраических уравнений (в автореферате не при-

ведены), позволила получить семейство динамических характеристик (форму токов и напряжений на элементах принципиальной электрической схемы замещения).

Установлено, что при любом характере и величине нагрузки, подключенной к выходу НПЧЕ, преобразователь частоты ведет себя по отношению к АГ как активно-индуктивная нагрузка, при этом амплитуда модулирующей функции незначительно влияет на величину угла сдвига фаз. Так при изменении амплитуды модулирующей функции на $\pm 30\%$, угол сдвига фаз изменяется на $3 \dots 4$ эл. град.

При совместной работе АГ с НПЧЕ значение коэффициента мощности нагрузки оказывает влияние на угол сдвига фаз НПЧ на его входе.

$$\left. \begin{aligned}
 & i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_4 dt - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} = E_A - E_B, \\
 & i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_5 dt - i_3 R_3 - L_3 \frac{di_3}{dt} = E_B - E_C, \\
 & \frac{1}{C_3} \int i_6 dt - \frac{1}{C_1} \int i_4 dt - \frac{1}{C_2} \int i_5 dt = 0, \quad i_{14} R_5 - i_{15} R_6 - \frac{1}{C_1} \int i_4 dt = 0, \\
 & i_{16} R_7 - i_{17} R_8 - \frac{1}{C_2} \int i_5 dt = 0, \quad i_{20} R_{11} - i_{21} R_{12} - \frac{1}{C_1} \int i_4 dt = 0, \\
 & i_{22} R_{13} - i_{23} R_{14} - \frac{1}{C_2} \int i_5 dt = 0, \quad i_{26} R_{17} - i_{27} R_{18} - \frac{1}{C_1} \int i_4 dt = 0, \\
 & i_{28} R_{19} - i_{29} R_{20} - \frac{1}{C_2} \int i_5 dt = 0, \\
 & \frac{1}{C_5} \int i_{35} dt - L_6 \frac{di_{33}}{dt} + L_5 \frac{di_{32}}{dt} + i_{24} R_{15} - i_{30} R_{21} = 0, \\
 & \frac{1}{C_5} \int i_{34} dt - L_5 \frac{di_{32}}{dt} + L_4 \frac{di_{31}}{dt} + i_{18} R_9 - i_{19} R_{10} = 0, \\
 & i_{37} R_{HA} + L_{HA} \frac{di_{37}}{dt} - i_{38} R_{HB} - L_{HB} \frac{di_{38}}{dt} - \frac{1}{C_4} \int i_{34} dt = 0, \\
 & i_{38} R_{HB} + L_{HB} \frac{di_{38}}{dt} - i_{39} R_{HC} - L_{HC} \frac{di_{39}}{dt} - \frac{1}{C_5} \int i_{35} dt = 0, \\
 & \frac{1}{C_6} \int i_{36} dt - \frac{1}{C_5} \int i_{35} dt - \frac{1}{C_4} \int i_{34} dt = 0.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Для снижения влияния выходных фильтров на амплитудные значения токов и напряжений силовых полупроводниковых приборов во

время переходных процессов, но с учетом обеспечения требуемого качества выходного напряжения АИЭ, параметры выходного фильтра НПЧЕ соответственно должны быть в пределах $L^*_{НПЧЕ} = 8 \div 24$, $C^*_{НПЧЕ} = 2 \div 4$.

Математическая модель позволяет получить статические характеристики АГ при совместной работе НПЧЕ, которые, кроме того, являются одним из основных критериев выбора регулирующей и защитной аппаратуры.

Установлено, что характеристики АГ зависят не только от коэффициента мощности нагрузки, но и от угла управления тиристорами и величины модулирующей функции НПЧ.

Полученные результаты исследований повысят эффективность предпроектных работ по созданию высокоэффективных ВЭУ.

В пятой главе проведён расчёт экономической эффективности ВЭУ на примере ООО «Раевская птицефабрика» Центральной площадки Краснодарского края, где для электроснабжения двух инкубаторов в случае аварийных ситуаций применяются две ДЭС мощностью 100 и 200 кВт, время работы которых составляет 240–400 ч/год.

Аналитически доказано, что капиталовложения в ВЭУ более чем в 5 раз больше, чем в ДЭС, однако через 3 года ВЭУ уже будут приносить прибыль из-за выработки электроэнергии. В случае безветрия предложено использовать в качестве резервного источника внешнюю сеть.

Разработаны структурно-схемные решения ветрогазопоршневых, ветросолнечных и комбинированных электростанций. Раскрыты особенности их работы и предложены способы построения оптимальной структуры автономной системы на ВИЭ.

Разработаны структурные схемы ветрогазопоршневых, ветросолнечных и комбинированных электростанций. Раскрыты особенности их работы и предложены способы построения оптимальной структуры автономных систем на ВИЭ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено обоснование выбора генератора электроэнергии для ВЭУ. Предложено в качестве автономного источника использовать бесконтактный АГ с емкостным возбуждением. АГ имеют лучшие регулировочные характеристики и их стоимость в 1,5 – 2,5 раза меньше стоимости СГПМ.

2. Показано, что одним из эффективных способов улучшения ЭТХ ВЭУ является использование в качестве стабилизатора параметров электроэнергии НПЧ, которые в сравнении с преобразователями частоты с промежуточным звеном имеют высокий КПД ($0,93 - 0,94$), лучшие МГП (при мощности $30 - 50$ кВА удельная их масса составляет $0,5 - 0,7$ кг/кВА). Кроме того, НПЧ обладают способностью независимого плавного регулирования частоты тока и напряжения при таких дестабилизирующих факторах, как изменение частоты тока на входе преобразователя, изменение величины и характера нагрузки, а также независимо от фазового угла сдвига фаз на выходе преобразователя они могут изменять угол сдвига фаз на входе преобразователя.

3. Разработаны функциональные схемы стабилизации параметров электроэнергии ВЭУ с использованием НПЧЕ и НПЧР. Раскрыты достоинства и недостатки НПЧЕ и НПЧР. Основным достоинством НПЧЕ является относительно не сложная силовая схема и система управления, а недостатком – НПЧЕ для АГ является активно-индуктивной нагрузкой, что требует повышенную ёмкость конденсаторов обеспечивающих его возбуждение. Основным достоинством НПЧР является то, преобразователь для АГ является активно-емкостной нагрузкой, что позволяет значительно уменьшить массу конденсаторов, применяемых для возбуждения генератора. Основными недостатками НПЧР являются: сложная силовая часть и система управления.

4. Разработан математический аппарат, позволяющий проводить оценку эффективности автономного источника электроэнергии для ВЭУ системы АГ-НПЧЕ. Результаты расчёта показали, что автономный источник электроэнергии для ВЭУ, выполненный на базе системы АГ – НПЧЕ в сравнении с

системой АГ–НПЧР мощностью 40–50 кВт имеет КПД на 4 – 5% выше, наработку до первого отказа на 3000 – 3300 ч больше, чем у системы АГ – НПЧР. Автономный источник системы АГ – НПЧЕ незначительно уступает по массе системе АГ – НПЧР.

5. При исследовании качества выходного напряжения НПЧ в аварийных режимах работы определено, что при выходе из работы одного полупроводникового прибора силовой схемы значение коэффициента несинусоидальности K_H увеличивается в 1,3 – 1,5 раз в фазе в которой не работает прибор и K_H увеличивается на 10 – 20% в двух других фазах. При выходе из работы двух тиристоров в одном или разных вентильных комплектах приводит к значительному искажению формы кривой выходного напряжения (значение коэффициента несинусоидальности K_H может увеличиться в 4 – 5 раз).

6. Разработана принципиальная электрическая схема замещения системы АГ-НПЧЕ и предложена методика расчёта параметров её элементов.

7. Разработана математическая модель системы АГ-НПЧЕ, позволившая получить динамические кривые токов и напряжений на отдельных элементах принципиальной электрической схемы замещения. Результаты исследований математической модели позволили сделать следующие выводы:

– при любом характере и величине нагрузки, подключенной к выходу НПЧЕ, преобразователь частоты ведет себя по отношению к АГ как активно-индуктивная нагрузка, при этом амплитуда модулирующей функции незначительно влияет на величину угла сдвига фаз. Так при изменении амплитуды модулирующей функции на $\pm 30\%$, угол сдвига фаз между током и напряжением изменяется на 3...4 эл. град.;

– для снижения влияния выходных фильтров на амплитудные значения токов и напряжений силовых полупроводниковых приборов во время переходных процессов, но с учетом обеспечения требуемого качества выходного напряжения АИЭ, параметры выходного фильтра НПЧЕ соответственно должны быть в пределах $L^*_{НПЧЕ} = 8 \div 24$, $C^*_{НПЧЕ} = 2 \div 4$;

– установлено, что характеристики АГ зависят от коэффициента мощности нагрузки, от угла управления силовыми полупроводниковыми приборами и величины модулирующей функции НПЧ.

8. Разработаны рекомендации по проектированию стабилизатора напряжения и частоты тока системы АГ-НПЧЕ для ВЭУ и проведён расчёт экономической эффективности ВЭУ. Несмотря на то, что капиталовложения в ВЭУ более чем в 5 раз больше, чем в ДЭС, однако через 3 года ВЭУ уже будут приносить прибыль из-за выработки электроэнергии. Рекомендовано ВЭУ использовать в качестве основных источников энергии, а в случае безветрия внешнюю сеть применять как резервный источник энергии.

9. Разработаны структурно-схемные решения автономных систем электроснабжения на ВЭУ (ветрогазопоршневые, ветросолнечные и комбинированные электростанции).

**Основные положения диссертации опубликованы
в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Сулейманов, Р.А. Силовая электроника в автономных системах электроснабжения / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, А. Ю. Попов // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2010, № 6. - С. 170 – 173.

2. Сулейманов, Р.А. К расчёту гармонического состава выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты / О. В. Григораш, В. В. Алмазов, Р. А. Сулейманов // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2011, № 4. - С. 263 – 266.

3. Сулейманов, Р.А. К расчёту экономической эффективности ветро-электрических установок / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, А. В. Квитко // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2011, № 6. - С. 192 – 196.

4. Сулейманов, Р.А. Особенности расчёта потерь и КПД бесконтактных генераторов электроэнергии / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, В. В. Алмазов, А. В. Квитко // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2011, № 3. - С. 227 – 230.

5. Сулейманов, Р.А. Автономная энергетика сельского хозяйства: состояние и перспективы / Е. А. Власенко, Р. А. Сулейманов, А. А. Хамула // Ползуновский вестник, № 2/1, 2011. - С. 9 – 13.

в монографии:

6. Сулейманов, Р.А. Возобновляемые источники электроэнергии: Монография / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов, Е. А. Власенко, А.Г. Власов; под общ. ред. О. В. Григораш. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 272 с.

в других изданиях:

7. Сулейманов, Р.А. Синтез оптимальной структуры автономных систем на возобновляемых источниках энергии / Р. А. Сулейманов, Н. Н. Кирьян. Материалы VII Всероссийской школы с международным участием. М.: МИРОС, 2010. - С. 317 – 321.

8. Сулейманов, Р.А. К вопросу терминологий и развития возобновляемой энергетики / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, Е. А. Власенко. Материалы V Международной НПК. Энергосберегающие технологии и проблемы их эффективного использования. – Волгоград: ВГСХА, 2011. - С. 102 – 105.

9. Сулейманов, Р. А. Силовая электроника в автономных системах / Р. А. Сулейманов. Материалы II Международной НПК. Актуальные проблемы энергетике АПК. – Саратов, СГАУ, 2011. - С. 277 – 278.

10. Сулейманов, Р. А. К вопросу проектирования систем автономного электроснабжения / Р. А. Сулейманов. Материалы VI Российской НПК. Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК. – Ставрополь, СГАУ, 2011. - С. 166 – 168.