

На правах рукописи



Квитко Андрей Викторович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОВЦЕФЕРМЫ**

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Автореферат

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар

2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Научный руководитель: **Богдан Александр Владимирович**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Соломин Евгений Викторович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", кафедра
«Электрические станции, сети и системы
электрообеспечения», профессор
(г. Челябинск)

Ведущая организация: **Коноплев Евгений Викторович**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ,
кафедра «Электрооборудование и
энергообеспечение АПК» (г. Ставрополь)
**ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный технологический
университет» (г. Краснодар)**

Защита диссертации состоится «24» июня 2026 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»: 350044, г.Краснодар, ул. Калинина 13, КубГАУ, корпус факультета электрификации, ауд. № 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» www.kubsau.ru и ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov/ru>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент
Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в России насчитывается более 300 тысяч фермерских хозяйств, в том числе, в Краснодарском крае более 30 тысяч, различных направлений производства, и их количество ежегодно увеличивается. При этом доля производства овцеводческой продукции на малые фермерские хозяйства (МФХ) и личные подсобные хозяйства (ЛПХ) составляет 84%. Для эффективного функционирования этих хозяйств необходимо не только энергообеспечение технологических процессов, но и создание комфортных бытовых условий обслуживающему персоналу.

Особенностью автономных потребителей электроэнергии фермерских хозяйств является то, что они рассредоточены на большой территории и имеют небольшую мощность. Кроме того, большинство потребителей электроэнергии имеют длительные перерывы в электроснабжении. Учитывая эти особенности и высокую стоимость линий электропередачи, актуальным является направление применение автономных систем электроснабжения (АСЭ). АСЭ, выполненные на дизельных и бензоэлектростанциях, потребляющих ископаемое топливо, значительно снижают рентабельность сельскохозяйственного производства из-за высоких эксплуатационных затрат. Кроме того, при работе они оказывают отрицательное воздействие на экологию. Перспективным направлением является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территориях с высоким их потенциалом.

Важное место в составе АСЭ среди ВИЭ принадлежит малым ветроэнергетическим установкам (ВЭУ) (до 5 кВт), применение которых позволит уменьшить количество дорогостоящих накопителей – аккумуляторных батарей и повысить надёжность электроснабжения автономных потребителей электроэнергии. Значительный потенциал для улучшения характеристик ВЭУ связан с использованием асинхронных генераторов (АГ), отличающихся высокой надёжностью и стойкостью к тяжелым условиям работы. Однако на сегодняшний день ВЭУ на АГ не нашли широкого применения в сельскохозяйственном производстве, из-за сложности стабилизации выходных параметров АГ.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Кубанского ГАУ на 2021–2025 гг. ГР № 121031700099-1, тема 32 «Обоснование и создание энергосберегающих адаптированных систем и технологий сельскохозяйственного назначения».

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку автономных систем электроснабжения, выполненных на базе ВЭУ внесли ученые: Амерханов Р.А., Никитенко Г.В., Грибков С.В., Кашин Я.М., Диведеркин И.В., Велькин В.И., Коноплёв Е.В., Григораш О.В., Богатырев Н.И., Лукутин Б.В., Воронин С.М., Сангов Х.С., Цырук С.А. и многие другие.

Проблематикой, ставшей предметом диссертационного исследования, занимались ученые Кицис С.И., Казовский Е.Я., Нетушил А.В., Баракин Н.С., Соболев А.Н., Ильченко Я.А., Креймер А.С., Сеницын А.В., Оськина А.С., Ванурин В.Н., Вронский О.В., Джендубаев А.-З.Р., Кунцевич П.А, Торопцев Н.Д., Фаренюк А.П., Фильц Р.В. и другие авторы. В их публикациях рассмотрены вопросы работы АГ в различных режимах, а также рассмотрены внешние характеристики АГ и вопросы самовозбуждения и стабилизации напряжения.

Научными исследованиями в данной области в настоящее время занимаются ученые в образовательных учреждениях: Ставропольском государственном аграрном университете, г. Ставрополь; Южно-Уральском государственном университете (национально-исследовательский университет), г. Челябинск; Кубанском государственном технологическом университете, г. Краснодар и других.

Проблема состоит в том, что, несмотря на большое разнообразие комплектации АСЭ с использованием ВЭУ и научных разработок по данной теме, остаются недостаточно исследованными методы стабилизации напряжения автономных асинхронных генераторов в составе ВЭУ малой мощности при воздействии дестабилизирующих факторов, возникающих в процессе их эксплуатации.

Рабочая гипотеза: если провести исследование совместной работы ветродвигателя и автономного АГ с введением активного сопротивления в цепь возбуждения, то можно повысить стабильность работы ВЭУ при колебаниях скорости ветра и изменении нагрузки.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы системы стабилизации напряжения автономного АГ для устойчивого электроснабжения овцеводческих хозяйств.

Задачи исследований:

1. Провести анализ влияния на процесс возбуждения и установившийся режим АГ линейной характеристики его магнитной системы.
2. Предложить способ учета насыщения магнитной системы АГ для разработки адекватной математической модели.

3. Разработать математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ.

4. Разработать алгоритм решения уравнений модели системы «Ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для определения параметров и режимов работы ВЭУ.

5. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы стабилизатора напряжения и алгоритм работы системы управления стабилизатором.

6. Изготовить установку, провести эксперимент и сопоставить результаты математического моделирования стабилизации напряжения АГ с экспериментальным исследованием.

7. Провести технико-экономическую оценку целесообразности производства ВЭУ, выполненных на АГ для овцеводческих хозяйств.

Объектом исследования являются автономные ветроэнергетические установки и их стабилизаторы напряжения.

Предмет исследования – параметры и режимы работы ВЭУ и результаты математического моделирования.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использовался системный анализ, позволяющий выявить достоинства и недостатки исследуемого объекта во всех режимах его функционирования. Исходя из поставленных задач и с учетом особенностей исследуемого объекта, использовались теоретические и экспериментальные методы исследований, базирующихся на основах теории электрических цепей, электрических машин и силовой преобразовательной техники, метода статической оценки точности результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна исследований:

1. Критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной характеристикой магнитной системы.

2. Математические модели системы «ветродвигатель–асинхронный генератор–нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения.

3. Алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для определения параметров и режимов работы ВЭУ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– критерии устойчивого режима работы автономного АГ при отсут-

ствии насыщения магнитной системы показывают, что выходное напряжение такого АГ ограничивается мощностью приводного двигателя;

– способ учета насыщения магнитной системы АГ, который позволяет строить адекватные математические модели систем регулирования его напряжения;

– результаты математического моделирования системы «ветродвигатель–асинхронный генератор–нагрузка» со стабилизатором напряжения, позволяющие анализировать переходные и установившиеся режимы при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ;

– алгоритм работы автоматической системы управления стабилизатором напряжения АГ, позволяющий разрабатывать программный код для микроконтроллера;

– функциональная и принципиальная схемы стабилизатора напряжения могут быть использованы проектными организациями при создании автономных систем электроснабжения.

– результаты технико-экономического обоснования, демонстрирующие целесообразность серийного производства и применения ВЭУ с разработанным стабилизатором напряжения для сельскохозяйственных предприятий.

Техническая новизна исследований подтверждена патентом на изобретение РФ № 2724622 «Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки».

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положений, в которых нашли применение предложенные автором доказательства необходимости учета нелинейности магнитных свойств АГ, математическая модель системы «Ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» и алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения, а также совпадением результатов математического и физического моделирования.

Реализация результатов исследований. математический аппарат для расчета параметров и режимов работы ВЭУ малой мощности на базе АГ с короткозамкнутым ротором, используется в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар (приложение А) при проектировании автономных ВЭУ; алгоритм решения уравнений модели системы «вет-

родвигатель – асинхронный генератор – нагрузка», используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» г. Краснодар (приложение Б) при расчёте основных параметров эффективности энергосистем, выполненных на ВЭУ; результаты исследований внедрены в учебный процесс (приложение В).

Апробация результатов исследований. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных, 1 национальной и 1 российской научно-практических конференциях: II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2011 г.); VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований» (г. Чебоксары, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция «Роль и значение науки и техники для развития современного общества» (г. Уфа, 2017 г.); X национальная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2019 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция «ГЕОЭНЕРГЕТИКА» (г. Грозный, 2019 г.); XIII Международная научная конференция «Технические и технологические системы» (г. Краснодар, 2022 г.); IV Международная научно-практическая конференция «Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс» (г. Ростов-на-Дону, 2023 г.); V Международная научно-практическая конференция «Интеграция наук – 2024» (г. Краснодар, 2024 г.).

Публикация результатов исследований. Основное содержание работы отражено в 17 научных публикациях, в том числе 9 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 монографии, 3 патента РФ на изобретение и 2 в прочих изданиях. Общий объем публикаций составил 35,6 п. л., из них личный вклад автора – 11,0 п. л.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

– критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной вольтамперной характеристикой.

– математические модели системы «ветродвигатель–асинхронный генератор–нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения;

– алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения;

– результаты проверки валидности экспериментальных исследований и результатов математического моделирования системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка».

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 «Состояние вопроса, перспективы и энергоснабжение овцеводческих хозяйств в Южном Федеральном округе» показано, что ЮФО является перспективным регионом для внедрения ветровой энергетики в сельскохозяйственное производство.

Проведён анализ характеристик потребителей электрической энергии, применяемых в хозяйствах по разведению овец, и существующих серийно выпускаемых ВЭУ. Установлено, что потребителем электроэнергии в основном является активная нагрузка переменного тока, и ее общая мощность составляет 1-3 кВт.

В настоящее время для электроснабжения автономных сельскохозяйственных потребителей МФХ и ЛПХ, занимающихся выращиванием овец, а также для обеспечения комфортных бытовых условий обслуживающему персоналу, применяются бензо- или дизельные станции, имеющие низкие технико-экономические и эксплуатационные показатели.

Для улучшения показателей АСЭ в овцеводческих хозяйствах предложено использовать ВЭУ на базе бесконтактного АГ с емкостным возбуждением.

Раскрыта научная проблема, рабочая гипотеза, цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе «Анализ процессов возбуждения и насыщения в асинхронном генераторе» установлены критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной характеристикой магнитной системы и предложен способ учета насыщения магнитной системы АГ, позволяющий строить адекватные математические модели систем регулирования его напряжения.

Для возникновения резонанса с незатухающими колебаниями требуется, чтобы в цепи (рисунок 1) мощность, подводимая от источника, была равна мощности расходуемой в цепях АГ, что соответствует условию $R=0$.

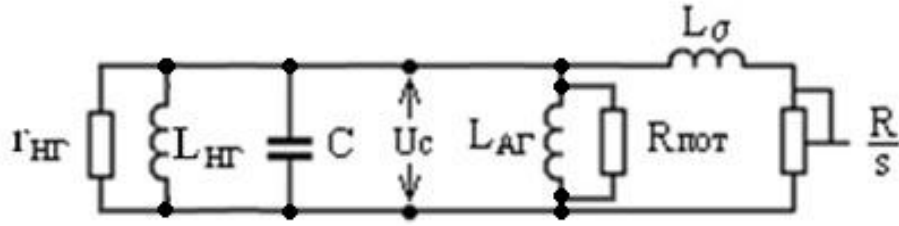


Рисунок 1 – Схема замещения одной фазы АГ:

$r_{HГ}$ и $L_{HГ}$ – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $L_{AГ}$ – индуктивность намагничивания АГ; L_{σ} – индуктивность рассеяния магнитных потоков статора и ротора; C – емкость возбуждения; $R_{пот}$ – активное сопротивление, учитывающее потери на намагничивание

Если перейти к обобщенным величинам:

$$R_{Hэ} = \frac{r_{Hэ}R_{ном}}{r_{Hэ}+R_{ном}}, \quad L_m = \frac{L_{AГ}L_{HГ}}{L_{AГ}+L_{HГ}}, \quad (1)$$

то у схемы, показанной на рисунке 1 для возникновения баланса мощностей необходимо соотношение параметров:

$$\frac{1}{2CR_{Hэ}^2} < \frac{1}{2L_{\sigma}} + \frac{1}{L_m}. \quad (2)$$

Путем преобразований получается уравнение окружности W в осях A и $\frac{\omega^2}{R_{Hэ}^2}$ (рисунок 2) со смещенным центром:

$$\left(A + \frac{1}{2L_{\sigma}}\right)^2 + \frac{\omega^2}{R_{Hэ}^2} = \left(\frac{1}{2L_{\sigma}}\right)^2, \quad (3)$$

где A – дополнительная переменная:

$$A = C\omega^2 - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{\sigma}}\right); \quad (4)$$

$\frac{1}{2L_{\sigma}}$ – смещение центра окружности W по оси A , равное радиусу этой окружности;

Из (4) получаем функцию ω от переменной A :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C} \left(A + \frac{1}{L_{\sigma}} + \frac{1}{L_m}\right)}. \quad (5)$$

В осях A и $\frac{\omega^2}{R_{Hэ}^2}$ эта функция на рисунке 2 представлена параболлами V_1 – V_3 в зависимости от набора параметров схемы замещения АГ. Как видно из рисунка 2 возможны три варианта расположения парабол V с точками пересечения p . Точка p_0 является критической. Для точек p_1 и p_2 анализ показал, что диапазон переменной A $\left(\frac{-1}{L_{\sigma}} \div \frac{-1}{2L_{\sigma}}\right)$ является областью статической устойчивости работы автономного АГ с постоянным моментом приводного двигателя, а точка p_1 является точкой устойчивого

режима работы автономного АГ с частотой $\omega_{уст}$ при линейной характеристике L_m . Точка p_2 является точкой неустойчивого режима работы автономного АГ.

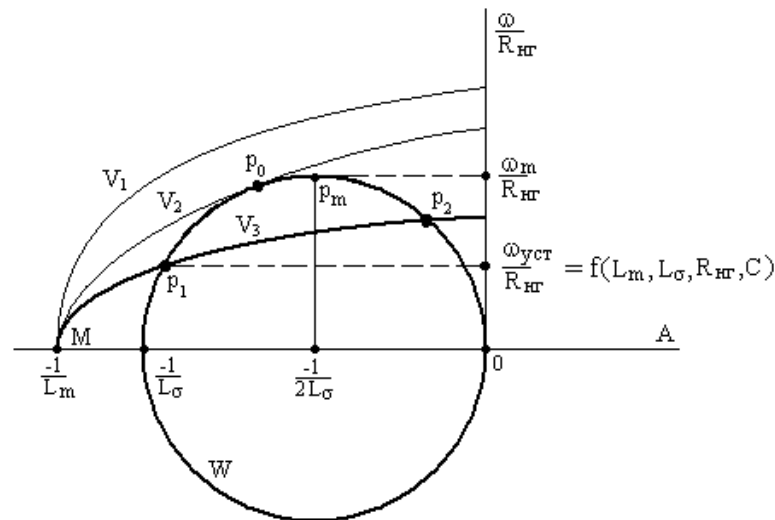


Рисунок 2 – Диаграмма, поясняющая определение установившегося значения ω при линейной индуктивности намагничивания АГ

Таким образом, установлено, что при линейной характеристике ветви намагничивания L_m возможно возникновение устойчивого асинхронного режима при самовозбуждении автономного АГ за счет его остаточного магнитного потока.

При увеличении числа оборотов привода напряжение на выводах АГ с линейной L_m увеличивается, ограничением является лишь мощность приводного двигателя. Поэтому адекватное моделирование для анализа напряжения АГ возможно лишь при учете ограничения роста напряжения в АГ за счет нелинейности его L_m .

Учитывать насыщение магнитной цепи в схеме модели предлагается с помощью M_* – функции нелинейности характеристики намагничивания АГ от значения индукции в воздушном зазоре. M_* зависит от конструктивных особенностей АГ (расположения обмоток в расточке статора, материала сердечника и т.д.).

Зависимость M_* строится на основе кривой намагничивания электротехнической стали $H(B)$, аппроксимированной функцией Фролиха с коэффициентами a и b . С её помощью учитывается как изменение значения взаимоиндукции M , так и индуктивности рассеяния обмоток.

Относительное значение изменения M_* при изменении индукции определяется как отношение магнитной проницаемости при индукции $B = B_i$ к магнитной проницаемости в начальном состоянии магнитной

системы $B_i = B_0$:

$$M_* = \frac{\frac{kz \cdot (1 - lz_* - \delta_*)}{a - b \cdot B_0 \cdot kz} + \frac{lz_*}{a - b \cdot B_0} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}{\frac{kz \cdot (1 - lz_* - \delta_*)}{a - b \cdot B_i \cdot kz} + \frac{lz_*}{a - b \cdot B_i} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}, \quad (5)$$

где lz_* и δ_* – относительные длины зубцов и зазора; kz и kd – коэффициенты приведения.

Изменение индуктивности рассеяния учитывается с применением полученного значения M_* за счет изменения величин L_s и L_r в матрице $M_{* \alpha, \beta, \gamma}$:

$$M_{* \alpha, \beta, \gamma} = M \cdot M_* + L_\sigma [1 + k_\sigma (1 - M_*)], \quad (6)$$

где $k_\sigma \approx 0,2 - 0,4$ – коэффициент, учитывающий увеличение потоков рассеивания при насыщении магнитной системы машины.

Токи обмоток в математической модели по осям α, β, γ находятся в результате решения системы алгебраических уравнений на каждом шаге для потокоцеплений $\psi_{\alpha, \beta, \gamma}$ методом обратной матрицы.

Данный подход повышает точность расчетов переходных и установившихся режимов работы АГ по сравнению со способами, использующими линейные параметры магнитной системы АГ.

В третьей главе «Моделирование и разработка стабилизатора напряжения асинхронного генератора» для исследования режимов ВЭУ с АГ на основе работ И.П. Копылова по математическому моделированию электрических машин, разработана принципиальная электрическая схема замещения (рисунок 3) и на ее основе построена математическая модель ВЭУ с АГ.

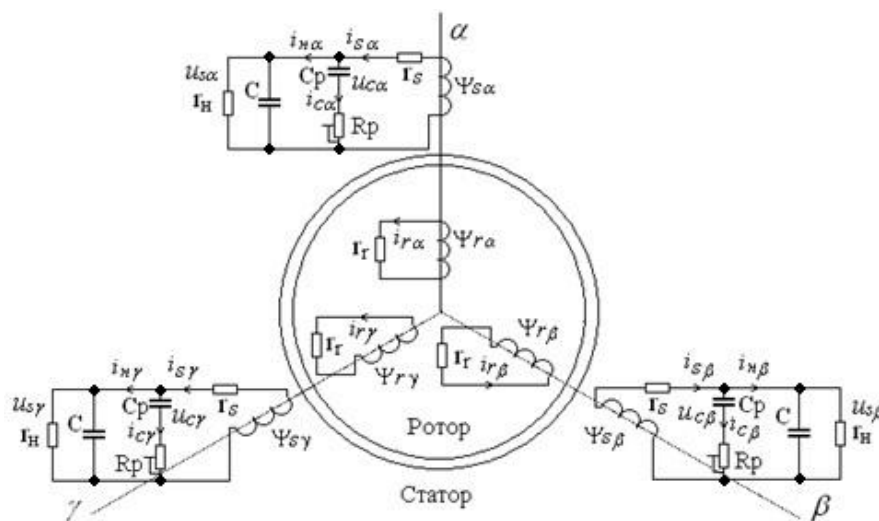


Рисунок 3 – Расчетная пространственная модель АГ с регулируемым R_p

Полная система дифференциальных уравнения для моделирования работы АГ с приводом от ветродвигателя и плавным регулированием с помощью резистора в цепи регулирующих емкостей C_p имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= -r_s i_{s\alpha} - u_{C\alpha}, & \frac{du_{C\alpha}}{dt} &= \frac{i_{s\alpha}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\alpha} - u_{C\alpha} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
 \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= -r_s i_{s\beta} - u_{C\beta}, & \frac{du_{C\beta}}{dt} &= \frac{i_{s\beta}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\beta} - u_{C\beta} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
 \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt} &= -r_s i_{s\gamma} - u_{C\gamma}, & \frac{du_{C\gamma}}{dt} &= \frac{i_{s\gamma}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\gamma} - u_{C\gamma} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
 0 &= -r_r i_{r\alpha} - p\omega \frac{\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\alpha}}{dt} &= \frac{u_{C\alpha} - u_{Cp\alpha}}{C_p R_p}, \\
 0 &= -r_r i_{r\beta} - p\omega \frac{\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\beta}}{dt} &= \frac{u_{C\beta} - u_{Cp\beta}}{C_p R_p}, \\
 0 &= -r_r i_{r\gamma} - p\omega \frac{\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\gamma}}{dt} &= \frac{u_{C\gamma} - u_{Cp\gamma}}{C_p R_p}, \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{p\sqrt{3}}{2J_\Sigma} m(\psi_{r\gamma} i_{s\alpha} + \psi_{r\alpha} i_{s\beta} + \psi_{r\beta} i_{s\gamma} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \psi_{r\gamma} i_{s\beta} - \psi_{r\alpha} i_{s\gamma}) - \frac{k_M \omega - k_e}{J_\Sigma} - \frac{M_{ВД}(v, \omega, b)}{J_\Sigma},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, $\psi_{s\gamma}$ – потокосцепления статора по осям α , β , γ , Вб; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{s\gamma}$ – токи статора по осям α , β , γ , А; $u_{C\alpha}$, $u_{C\beta}$, $u_{C\gamma}$ – напряжения на емкостях возбуждения по осям α , β , γ , В; $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$, $i_{r\gamma}$ – токи ротора по осям α , β , γ , А; $u_{Cp\alpha}$, $u_{Cp\beta}$, $u_{Cp\gamma}$ – напряжения на регулировочных емкостях по осям α , β , γ , В; r_s – активное сопротивление обмотки статора, Ом; r_r – активное сопротивление обмотки ротора, Ом; C – емкость возбуждения, Ф; C_p – регулировочная емкость, Ф; R_p – регулировочное сопротивление, Ом; r_H – сопротивление нагрузки, Ом; p – число пар полюсов АГ; ω – угловая скорость ротора, рад/с; J_Σ – суммарный момент инерции, кг·м²; m – функция учета нелинейности, о.е.; $k_M=0.001$, $k_e=0.2$ – коэффициенты учета трения; $M_{ВД}(v, \omega, b)$ – момент ветродвигателя в зависимости от скорости ветра, угловой скорости и угла атаки, Н·м.

Разработан алгоритм (рисунок 4) решения уравнений модели «ВД-АГ-нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ВЭУ. В процессе моделирования получены значения выходного напряжения АГ для различных режимов работы ВЭУ при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ. Результаты моделирования представлены на рисунках 5 и 6.

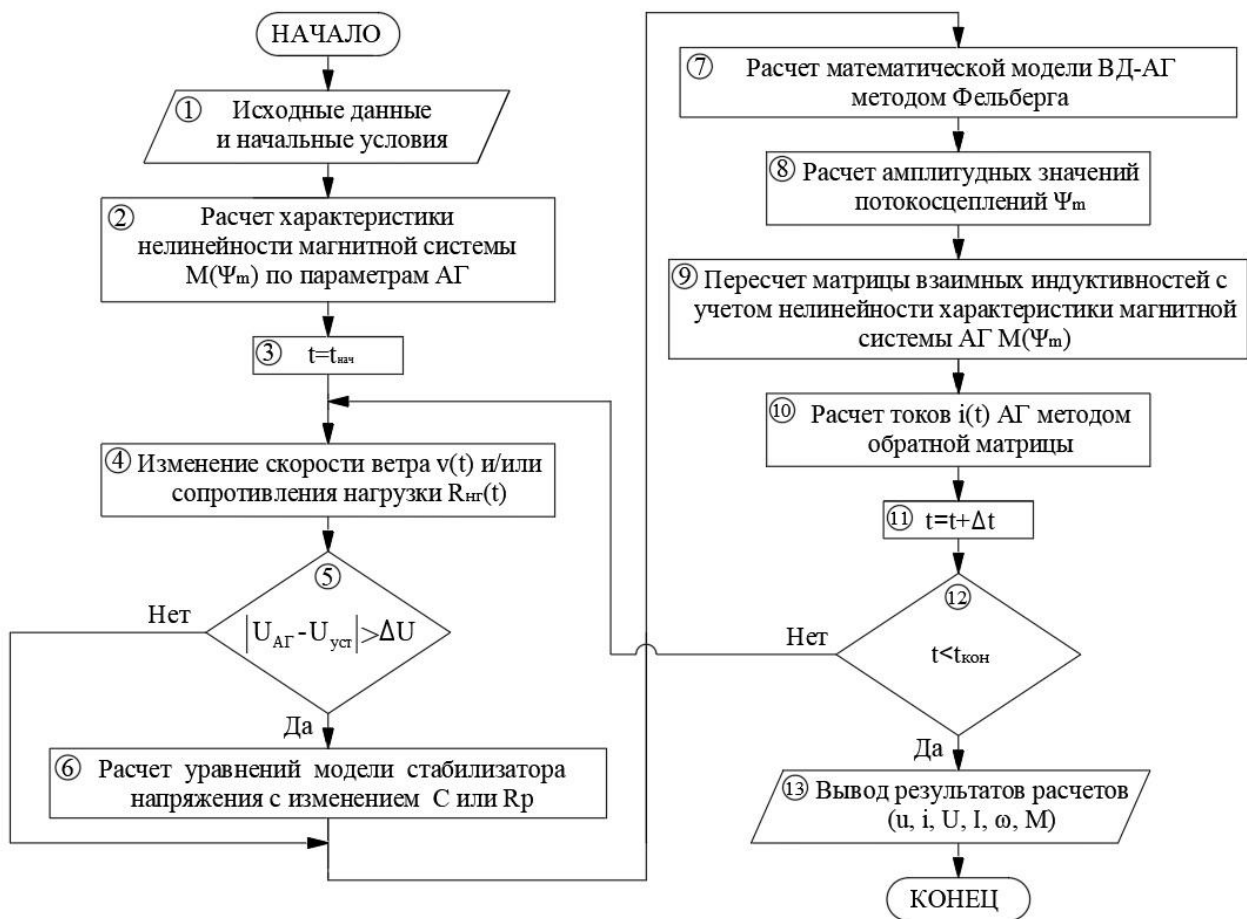


Рисунок 4 – Алгоритм решения уравнений модели «ВД-АГ-нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ВЭУ

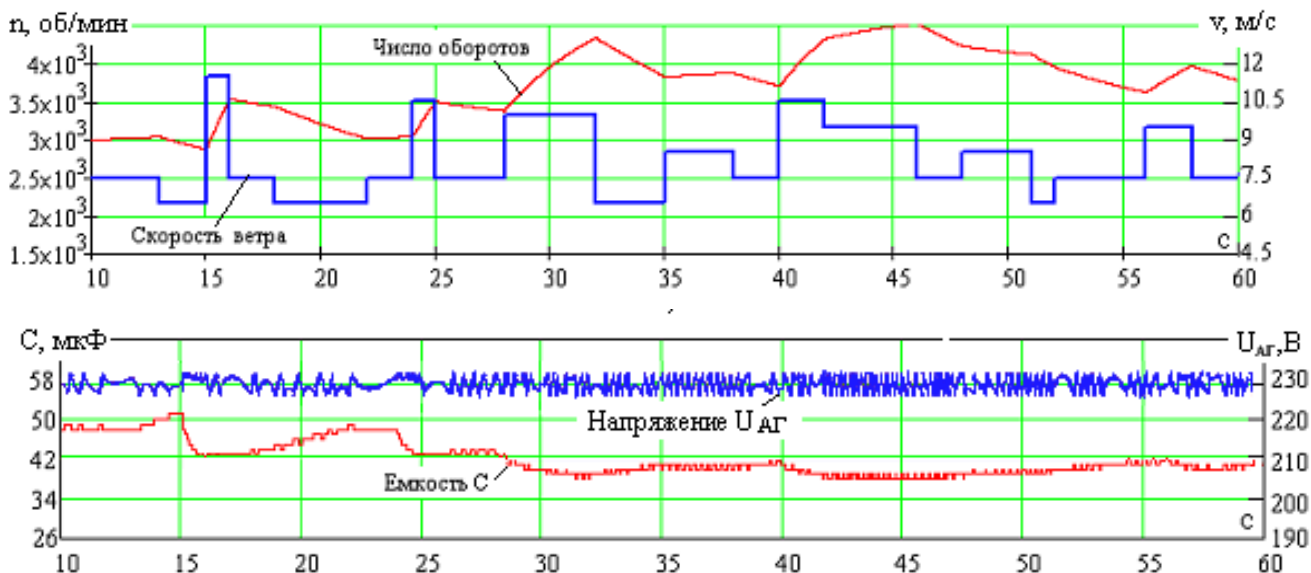


Рисунок 5 – Временные зависимости скорости ветра, частоты вращения ВД, емкости конденсаторов возбуждения и выходного напряжения АГ при дискретном регулировании тока возбуждения

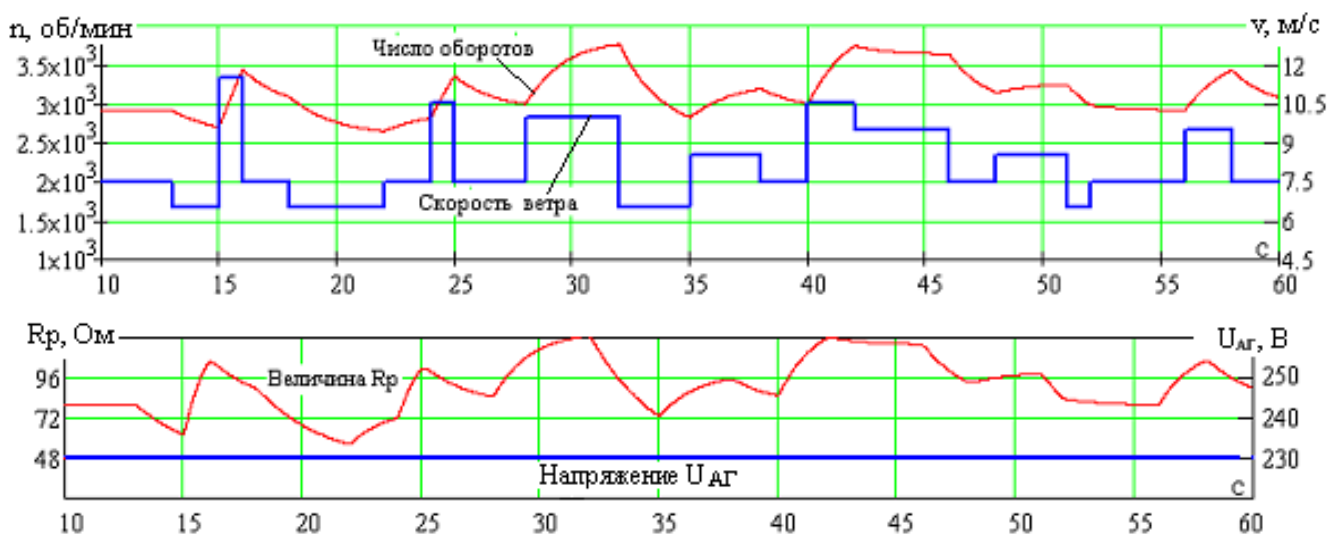


Рисунок 6 – Временные зависимости скорости ветра, частоты вращения ВД, сопротивления регулировочного резистора и выходного напряжения АГ при плавном регулировании тока возбуждения

Из расчетов следует, что в диапазонах изменения скорости ветра 6,5-11,5 м/с, как наиболее встречающихся в регионе, стабилизация выходного напряжения АГ путем плавного регулирования тока возбуждения изменением сопротивления R_p обеспечивает более узкий диапазон выходного напряжения в пределах ± 2 В в сравнении с дискретным регулированием, где диапазон изменения выходного напряжения АГ зависит от шага изменения емкости и составляет ± 5 В при шаге регулирования емкости возбуждения 0,25 мкФ.

Стабилизация выходного напряжения АГ приводит к изменению оборотов ВД. При дискретном регулировании тока возбуждения и переменной скорости ветра диапазон скоростей ротора АГ увеличивается с 3200-3900 об/мин (без стабилизации) до 2900-4500 об/мин (со стабилизацией), создавая риск выхода ВЭУ в недопустимый режим работы. Стабилизация выходного напряжения АГ путем плавного регулирования тока возбуждения изменением сопротивления R_p сужает диапазон и уменьшает скорость вращения вала АГ с 2900-4500 об/мин (при дискретном регулировании тока возбуждения) до 2700-3750 об/мин (при плавном регулировании тока возбуждения) за счет того, что резистор R_p является нагрузкой и создает дополнительный электромагнитный момент на валу АГ. Таким образом, стабилизация напряжения путем плавного регулирования тока возбуждения ограничивает разгон ротора, преобразуя часть избыточной мощности в тепло на резисторе.

Разработана принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения АГ, показанная на рисунке 7.

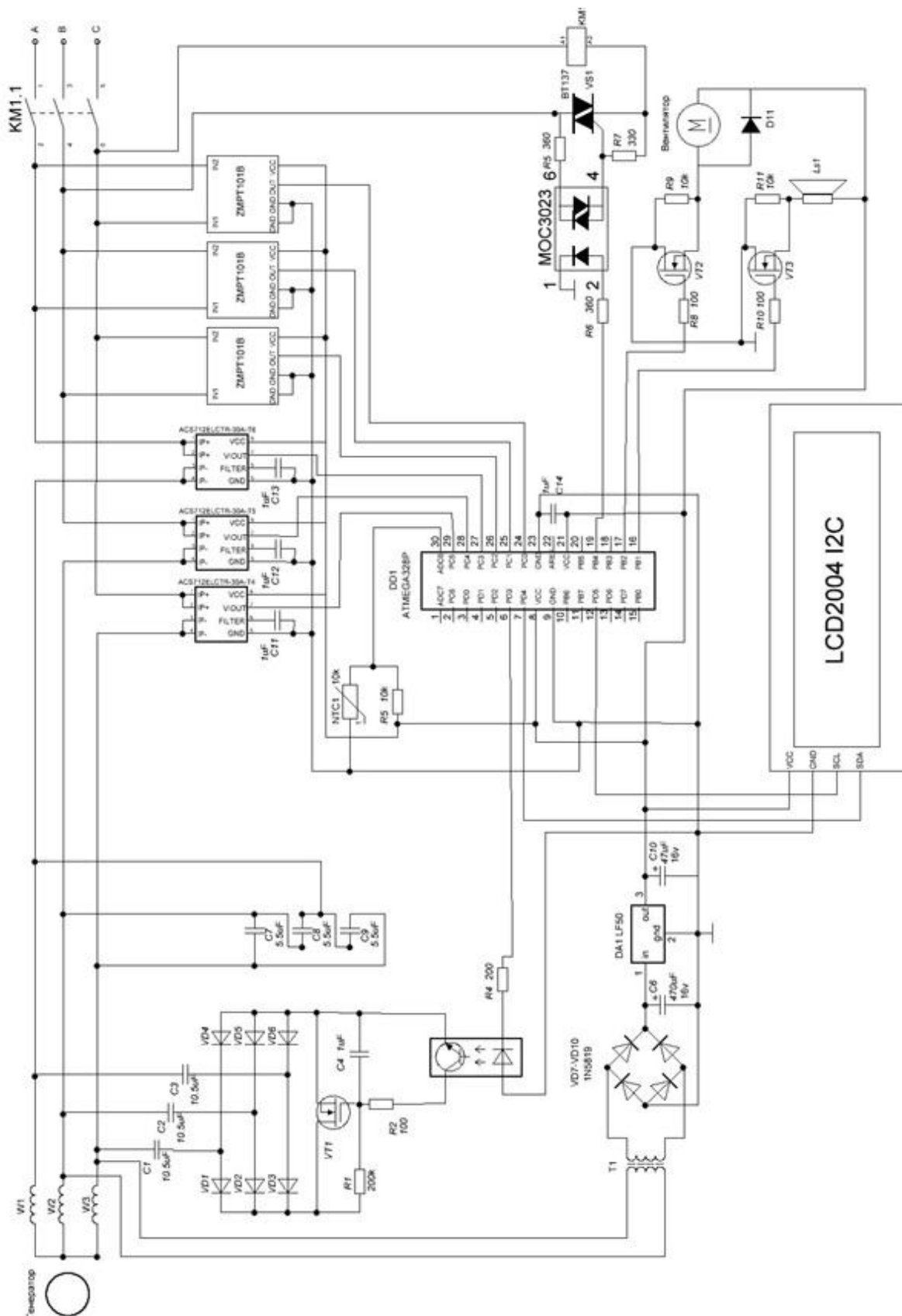


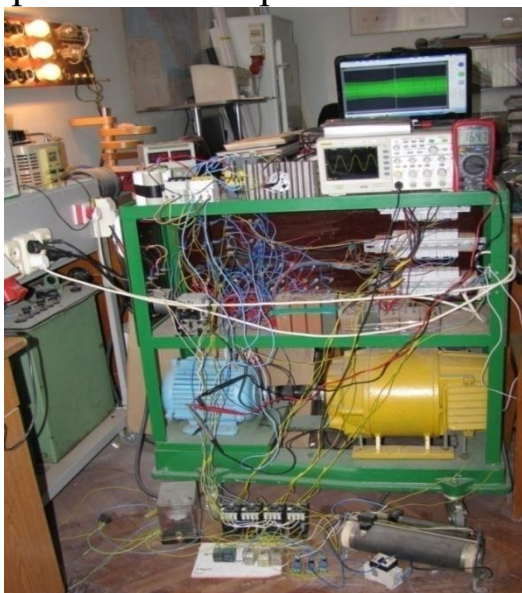
Рисунок 7 – Принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения

Возбуждается АГ от блока конденсаторов С7-С9. Управление стабилизатором осуществляется микроконтроллером Atmega 328 р, на входы которого поступает информация о выходных параметрах АГ посредством

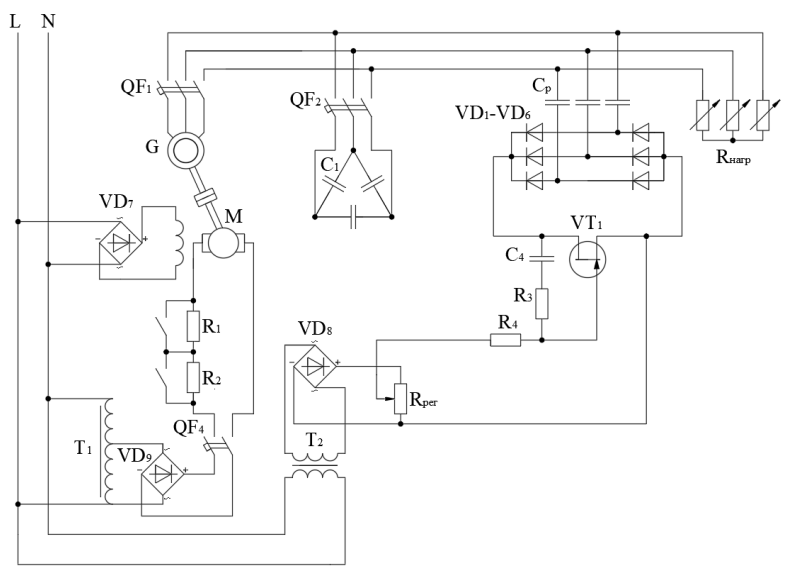
вом датчиков напряжения ZMPT101B и тока ACS712. Стабилизация выходного напряжения АГ производится изменением напряжения на конденсаторах С1-С3 путем регулирования активного сопротивления канала исток-сток полевого транзистора VT1, подключенного к ним через схему трехфазного выпрямителя. Микроконтроллер генерирует ШИМ сигнал и через оптопару U1, выполняющую роль гальванической развязки, этот сигнал поступает на ЦАП, собранный по схеме фильтра низких частот, на выходе которого формируется управляющее напряжение, прикладываемое к затвору и истоку транзистора VT1. В стабилизаторе предусмотрено охлаждение транзистора VT1 вентилятором М, управляемым ШИМ сигналом, который формируется микроконтроллером по данным о температуре, снимаемым датчиком NTC1. Также предусмотрена звуковая сигнализация для предупреждения об аварийных режимах. Данные о выходном напряжении АГ, мощности подключенной нагрузки и потребленной энергии выводятся на дисплей LCD2004.

В четвертой главе «Экспериментальная проверка результатов моделирования и расчет экономической эффективности серийного производства ветроэнергетических установок малой мощности» для подтверждения результатов теоретических исследований разработан испытательный стенд по исследованию работы стабилизатора напряжения (рисунок 8), выполненного на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Целью исследования было получение и оценка качества выходного напряжения АГ при изменении скорости вращения приводного двигателя.



а)



б)

Рисунок 8 – Внешний вид (а) и электрическая схема (б) экспериментальной установки

В качестве имитации ветродвигателя использовался двигатель постоянного тока П-31: $n=1500$ об/мин; ток обмотки возбуждения $I_v=0,35$ А; ток обмотки якоря $I_a=8,6$ А; мощность 1,5 кВт (возбуждение независимое). Для имитации колебания скорости ветра и, соответственно, изменения оборотов и момента приводного двигателя в цепь якоря вводились сопротивления $R_1=4,4$ Ом и $R_2=3,6$ Ом в разных сочетаниях. В качестве генератора использовался асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А100S4У3 мощностью 3 кВт; номинальным током 6,7 А; коэффициентом мощности равным 0,65; номинальной частотой оборотов в минуту 1435.

Плавное изменение выходного напряжения АГ осуществлялось с помощью регулировочного блока, состоящего из возбуждающих конденсаторов емкостью $C_p=40$ мкФ, трехфазного выпрямителя на диодах N5408 и полевого транзистора NTHL050N65S3HF, ширина канала «сток-исток» которого регулируется за счет изменения напряжения на переменном резисторе R_p .

Эксперимент заключался во введении в цепь якоря приводного ДПТ активных сопротивлений с целью изменения числа оборотов вала и, следовательно, изменения выходного напряжения АГ. Сопротивления вводились в автоматическом режиме с помощью электромагнитных реле и настраиваемых реле времени. Алгоритм введения сопротивлений по интервалам времени следующий: $(0 \div t_1) - R_1 \rightarrow (t_1 \div t_2) - R_1 + R_2 \rightarrow (t_2 \div t_3) - 0 \rightarrow (t_3 \div t_4) - R_1$. При данном алгоритме проводилось 2 независимых эксперимента по стабилизации выходного напряжения АГ:

- 1) дискретным изменением тока возбуждения ($C_1 - C_6$);
- 2) плавным регулированием тока возбуждения путем изменения активного сопротивления канала «сток-исток» полевого транзистора VT1.

Отклонение расчетных данных от данных, полученных экспериментально при отсутствии стабилизации выходного напряжения АГ составило не более 8,9 В в абсолютном выражении и 3,95 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 5,47 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 4,38 В или 2,03 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал составил -2,83; +2,45 В (с вероятностью 95 %).

При введении стабилизации выходного напряжения АГ в эксперимент и математическую модель отклонение теоретических данных от

экспериментальных составило не более 2,7 В в абсолютном выражении и 1,22 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 1,53 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 1,24 В или 0,56 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал составил $-0,94; +0,52$ В с вероятностью 95 %, а отклонение напряжения от заданного составило не более 1,3 В. Расчетная и экспериментальная осциллограммы представлены на рисунке 9.

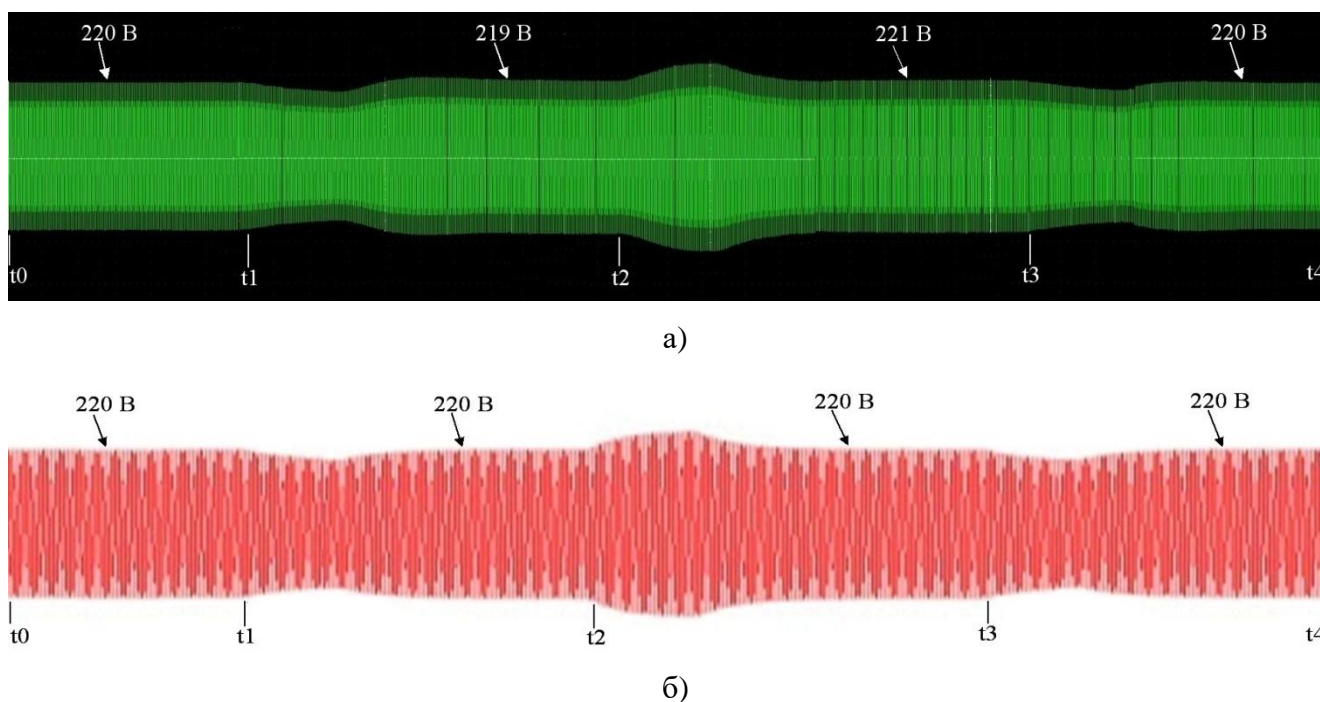


Рисунок 9 – Экспериментальная (а) и расчетная (б) осциллограммы выходного напряжения АГ при плавном регулировании тока возбуждения

Расчет эффективности постановки ВЭУ с разработанным стабилизатором на серийное производство при выпуске 100 штук в год проведен для 3-х вариантов привлечения средств на первичные капиталовложения: при существующей ключевой ставке ЦБ РФ, при оптимистичном среднесрочном прогнозе величины ключевой ставки и за счет собственных средств. В первом варианте ЧДД составил 4680 тыс. рублей при сроке окупаемости 6 лет и 9 месяцев. Во втором варианте ЧДД составил 11989 тыс. рублей при сроке окупаемости проекта 5 лет и 7 месяцев. В третьем варианте ввиду использования собственных средств ЧДД оказался самым высоким и составил 22640 тыс. рублей при сроке окупаемости проекта 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. Получены критерии возникновения режима устойчивого самовозбуждения АГ при линейной характеристике магнитной системы, когда выходное напряжение ограничено мощностью приводного двигателя, и показана необходимость учета нелинейности характеристики для корректного анализа процессов стабилизации напряжения АГ.

2. Предложен способ учета насыщения магнитной системы АГ с применением расчетной функции изменения магнитной связи между обмотками для разработки математической модели АГ, позволяющей анализировать процессы в системе «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка».

3. Разработаны математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка», позволяющие анализировать параметры переходных и установившихся процессов в системе при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ и показывающие преимущество плавного регулирования тока.

4. На основе разработанного алгоритма решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты 5-го порядка в модификации Фельберга модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» определены параметры и режимы работы ВЭУ. Установлено, что стабилизация напряжения путем плавного регулирования тока возбуждения является более эффективной по сравнению с дискретным изменением емкости за счет того, что при диапазонах изменения скорости ветра 6,5-11,5 м/с обеспечивает более узкий диапазон выходного напряжения в пределах ± 2 В в сравнении с дискретным регулированием, где диапазон составляет ± 5 В при шаге регулирования емкости возбуждения 0,25 мкФ, а также ограничивает скорость вращения ротора АГ диапазоном 2700-3750 об/мин за счет демпфирования части избыточной мощности регулировочным резистором по сравнению с дискретным регулированием тока, при котором скорость составляет 2900-4500 об/мин, создавая риск выхода ВЭУ в недопустимый режим работы.

5. Разработаны функциональная и принципиальная электрические схемы стабилизатора напряжения ВЭУ с плавным регулированием тока возбуждения (патент на изобретение РФ № 2724622) на базе микроконтроллера ATmega 328p, а также алгоритм работы системы управления.

6. Изготовлена экспериментальная установка с АГ на базе АД марки 4А100S4У3 с приводным ДПТ марки П-31, на которой получены осциллограммы выходного напряжения АГ при изменении скорости приводного двигателя в режимах без стабилизации и со стабилизацией выходного напряжения АГ. Сопоставление результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показало, что различия между ними статистически незначимы: при дискретном регулировании тока возбуждения отклонение экспериментальных значений от расчетных составило не более 2,3 В в абсолютном выражении и 1,01 % в относительном и при уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,56; +0,51$ В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 5,0 В; при плавном регулировании тока возбуждения отклонение экспериментальных значений от расчетных составило не более 1,1 В в абсолютном выражении и 0,503 % в относительном и при уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,3; +0,23$ В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 1,3 В.

7. Выполнена оценка экономической эффективности серийного производства ВЭУ с предложенным стабилизатором. Установлено, что при объеме выпуска 100 штук в год ЧДД составит от 4680 до 22640 тыс. рублей при сроках окупаемости проекта 5-7 лет.

Рекомендации производству

Для разработки и серийного выпуска энергоэффективных ВЭУ малой мощности на базе АГ с разработанным стабилизатором напряжения, предназначенных для электроснабжения рассредоточенных потребителей АПК, необходимо использовать функциональную и принципиальную электрическую схемы предложенного стабилизатора напряжения как базовое, патентно-защищенное решение, обеспечивающее плавную стабилизацию выходного напряжения.

Проектным и монтажным организациям, занимающимся созданием АСЭ для сельского хозяйства, целесообразно включать предлагаемую ВЭУ с АГ и стабилизатором напряжения в качестве рекомендуемого источника энергии для МФХ и ЛПХ. Это повысит надежность электроснабжения технологических процессов (обогрев молодняка, водоподъем), улучшит условия труда и, как следствие, рентабельность животноводства.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование технико-экономических и эксплуатационных характеристик как всей ВЭУ, так и ее ключевых функциональных элементов.

Совершенствование системы стабилизации и управления:

Необходимо продолжить исследования по интеграции в контроллер алгоритмов управления балластной активной нагрузкой (ТЭНами) для утилизации избыточной энергии на технологические нужды (подогрев воды, отопление) и создания дополнительного демпфирующего момента на валу АГ.

Целесообразна разработка адаптивных алгоритмов управления, самонастраивающихся под параметры конкретного экземпляра ВЭУ с АГ.

Перспективным направлением является создание на базе разработанной ВЭУ гибридных энергокомплексов «ветро-дизель» или «ветро-солнце» с единой системой управления, обеспечивающей приоритетное использование возобновляемой энергии.

Конструктивные и схемные решения стабилизатора применимы для систем стабилизации напряжения в других типах автономных генераторных установок (на базе двигателей внутреннего сгорания, микро-ГЭС).

Основные положения диссертации опубликованы

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Амерханов, Р. А. Ветро-солнечные электростанции фермерских хозяйств / Р. А. Амерханов, **А. В. Квитко**, А. А. Азарян // Сельский механизатор. – 2023. – № 12. – С. 2–3. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-12-2-3-7.

2. Интегрированная система электропитания с применением ВИЭ для децентрализованных потребителей / Н. И. Богатырев, Е. А. Денисенко, **А. В. Квитко**, В. А. Пархоменко // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 12 (318). – С. 39–41. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-12-39-41.

3. Богдан, А. В. Устойчивое самовозбуждение асинхронного генератора без насыщения его магнитной системы / А. В. Богдан, В. А. Богдан, **А. В. Квитко** // Сельский механизатор. – 2022. – № 2. – С. 34–36.

4. Квитко, А. В. Автономные ветроэлектрические установки и системы / **А. В. Квитко**, Я. А. Семенов, Г. С. Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 1003–1015.

5. **Квитко, А. В.** Генераторы электроэнергии ветроэлектрических установок и способы стабилизации их напряжения / **А. В. Квитко**, А. О. Хицкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 98. – С. 255–269.

6. **Квитко, А. В.** К вопросу классификации и основные требования к проектированию ветроэлектрических установок / **А. В. Квитко**, А. А. Гончаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 593–605.

7. **Квитко, А. В.** Расчёт мощности и выбор основных функциональных узлов ветроэлектрической установки / **А. В. Квитко**, А. А. Гончаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 98. – С. 429–456.

8. Григораш, О. В. Стабилизаторы напряжения и частоты тока ветроэлектрических установок на непосредственных преобразователях частоты / О. В. Григораш, **А. В. Квитко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 589–617.

9. Григораш, О. В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, **А. В. Квитко**, Ю. М. Петренко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. – № 26. – С. 140–143.

Патенты:

10. Патент № 2724622 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/30. Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки : № 2019141750 : заявл. 13.12.2019 : опубл. 25.06.2020 / **Квитко А. В.**, Сидоренко А. Д., Гончаров А. А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

11. Патент № 2499352 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/06. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэлектрической установки : № 2012121218/07 : заявл. 23.05.2012 : опубл. 20.11.2013 / Григораш О. В., **Квитко А. В.**, Сулейманов Р. А., Буторина Е. О. ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

12. Патент № 2443903 С2 Российская Федерация, МПК F03D 9/00, H02P 9/06, H02P 9/30. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки : № 2010119204/06 : заявл. 12.05.2010 : опубл. 27.02.2012 / Григораш О. В., Гарькавый К. А., **Квитко А. В.** [и др.] ; заявитель федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет».

Монографии:

13. Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электроснабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств / О. В. Григораш, Е. А. Денисенко, **А. В. Квитко** [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2023. – 180 с. – ISBN 978-5-6047400-1-9.

14. Квитко, А. В. Особенности проектирования ветроэнергетических станций : монография / **А. В. Квитко**, А. А. Азарян. – Краснодар : КубГАУ, 2022. – 112 с. – ISBN 978-5-6047401-8-7.

15. Ветроэлектрические станции / **А. В. Квитко**, О. В. Григораш, А. Ю. Попов [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 192 с. – ISBN 978-5-6040179-0-6.

– в других изданиях:

16. Григораш, О. В. К вопросу стабилизации напряжения возобновляемых источников электроэнергии / О. В. Григораш, **А. В. Квитко**, В. И. Таразан // *Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс* : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 марта 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Манускрипт", 2023. – С. 197-199.

17. **Квитко, А. В.** Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края / **А. В. Квитко**, А. Д. Сидоренко, А. А. Гончаров // *Геоэнергетика - 2019* : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Грозный, 06–07 ноября 2019 года / Под редакцией М.Ш. Минцаева. – Грозный: НПП "Геосфера", 2019. – С. 123-128.

Автореферат

Квитко Андрей Викторович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОВЦЕФЕРМЫ**

Подписано в печать «16» апреля 2026 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бум. тип. № 1. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 357.

Отпечатано в ООО Крон.
350051, г. Краснодар, ул. Дальняя, 39/3