

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)
Коноплев Евгений Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ,
кафедра «Электрооборудование и
энергообеспечение АПК» (г. Ставрополь)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный технологический
университет» (г. Краснодар)**

Защита диссертации состоится «23» сентября 2026 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 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 и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан " " 2026 г., размещен на официальном сайте ВАК РФ <https://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

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: Р. А. Амерханов, Г. В. Никитенко, Е. В. Соломин, Я. М. Кашин, Е. В. Коноплев, И. В. Диведеркин, В. И. Велькин, О. В. Григораш, Н. И. Богатырев, Б. В. Лукутин, С. М. Воронин, Х. С. Сангов, С. А. Цырук и многие другие.

Проблематикой, ставшей предметом диссертационного исследования, занимались ученые Н. Д. Торопцев, В. Н. Ванурин, С. И. Кицис, Е. Я. Казовский, А.-З. Р. Джендубаев, О. В. Григораш, А. В. Нетушил, Н. С. Баракин, А. Н. Соболев, Я. А. Ильченко, А. С. Креймер, А. В. Сеницын, С. Г. Герман-Галкин, А. С. Оськина, О. В. Вронский, П. А. Кунцевич, А. П. Фаренюк, Р. В. Фильц и другие авторы. В их публикациях рассмотрена работа АГ в различных режимах, а также 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, методы статистической 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 отсутствии 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 критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной характеристикой магнитной системы, математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения 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 «ветродвигатель – 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 патента РФ на изобретение, 3 монографии 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 $R=0$.

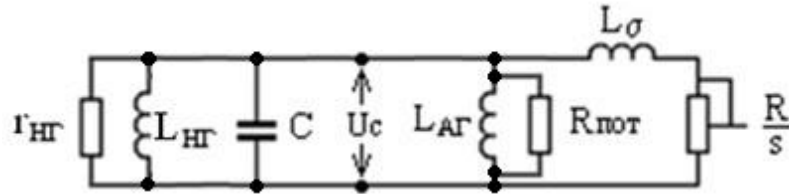


Рисунок 1 – Схема замещения одной фазы АГ:

$r_{HГ}$ и $L_{HГ}$ – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $L_{АГ}$ – индуктивность намагничивания АГ; L_{σ} – индуктивность рассеяния магнитных потоков статора и ротора; C – емкость возбуждения; $R_{пот}$ – активное сопротивление, учитывающее потери на намагничивание; R/s – активное сопротивление роторной цепи, приведенное к статору

Если перейти к обобщенным величинам:

$$R_{H2} = \frac{r_{H2} R_{nom}}{r_{H2} + R_{nom}}, \quad L_m = \frac{L_{АГ} L_{HГ}}{L_{АГ} + L_{HГ}}, \quad (1)$$

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

$$\frac{1}{2CR_{H2}^2} < \frac{1}{2L_{\sigma}} + \frac{1}{L_m}. \quad (2)$$

Путем преобразований получается уравнение окружности W в осях A и $\frac{\omega^2}{R_{H2}^2}$ (рисунок 2) со смещенным центром:

$$\left(A + \frac{1}{2L_{\sigma}}\right)^2 + \frac{\omega^2}{R_{H2}^2} = \left(\frac{1}{2L_{\sigma}}\right)^2, \quad (3)$$

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 $\frac{\omega^2}{R_{H2}^2}$ эта функция на рисунке 2 представлена параболой 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.

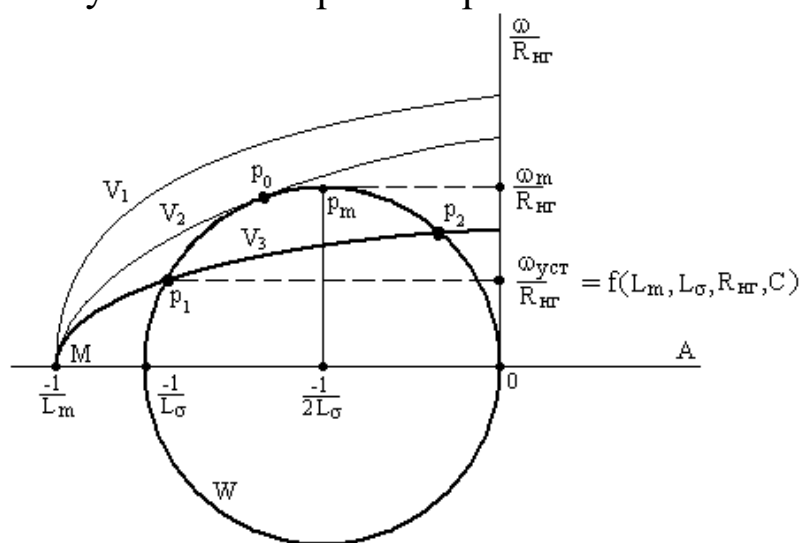


Рисунок 2 – Диаграмма, поясняющая определение установившегося значения ω при линейной индуктивности намагничивания АГ

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 $M_*(B)$ – функции нелинейности характеристики намагничивания АГ от значения индукции в воздушном зазоре. $M_*(B)$ зависит от конструктивных особенностей АГ (расположения обмоток в расточке статора, материала сердечника и т.д.).

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

Относительное значение изменения $M_*(B)$ при изменении индукции определяется как отношение магнитной проницаемости при индукции $B = B_k$ к магнитной проницаемости в начальном состоянии магнитной системы B_0 :

$$M_*(B) = \frac{\frac{kz \cdot (1 - lz_* - \delta_*)}{a - b \cdot B_0 \cdot kz} + \frac{lz_*}{a - b \cdot B_0} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}{\frac{kz \cdot (1 - lz_* - \delta_*)}{a - b \cdot B_k \cdot kz} + \frac{lz_*}{a - b \cdot B_k} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}, \quad (6)$$

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

С применением полученного значения $M_*(B)$ в матрице связи токов и потокосцеплений изменяется величина взаимоиндукции M :

$$M_* = M \cdot M_*(B). \quad (7)$$

Изменение индуктивности рассеяния также учитывается с помощью полученного значения $M_*(B)$ за счет изменения величин L_s и L_r в матрице $M_{\alpha, \beta, \gamma}$ путем пересчета её диагональных составляющих:

$$\begin{aligned} L_{*s} &= M \cdot M_*(B) + L_{\sigma s} [1 + k_\sigma (1 - M_*(B))], \\ L_{*r} &= M \cdot M_*(B) + L_{\sigma r} [1 + k_\sigma (1 - M_*(B))], \end{aligned} \quad (8)$$

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 потокосцеплений $\psi_{\alpha, \beta, \gamma}$ 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.

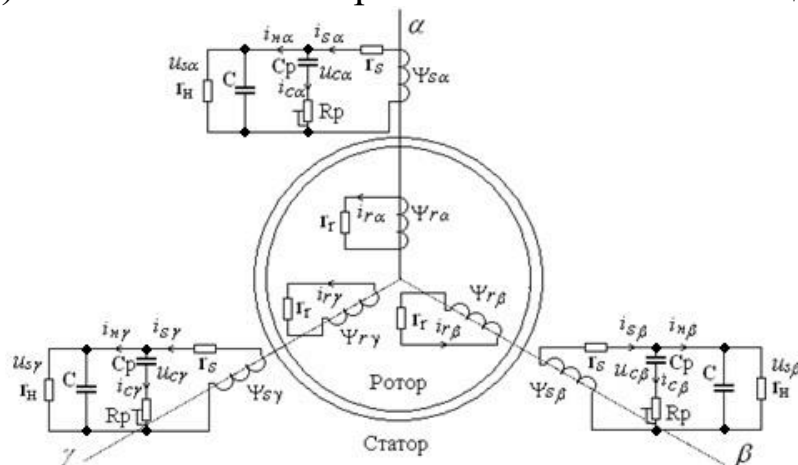


Рисунок 3 – Расчетная пространственная модель АГ с регулируемым R_p

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:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= -r_s i_{s\alpha} - u_{C\alpha}, & \frac{du_{C\alpha}}{dt} &= \frac{i_{s\alpha}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\alpha} - u_{C\alpha} \left(1 + \frac{R_p}{r_n} \right) \right], \\
\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= -r_s i_{s\beta} - u_{C\beta}, & \frac{du_{C\beta}}{dt} &= \frac{i_{s\beta}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\beta} - u_{C\beta} \left(1 + \frac{R_p}{r_n} \right) \right], \\
\frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} &= -r_s i_{s\gamma} - u_{C\gamma}, & \frac{du_{C\gamma}}{dt} &= \frac{i_{s\gamma}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\gamma} - u_{C\gamma} \left(1 + \frac{R_p}{r_n} \right) \right], \\
\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -r_r i_{r\alpha} - \omega_r \frac{\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\alpha}}{dt} &= \frac{u_{C\alpha} - u_{Cp\alpha}}{C_p R_p}, \\
\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -r_r i_{r\beta} - \omega_r \frac{\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\beta}}{dt} &= \frac{u_{C\beta} - u_{Cp\beta}}{C_p R_p}, \\
\frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} &= -r_r i_{r\gamma} - \omega_r \frac{\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}}{\sqrt{3}}, & \frac{du_{Cp\gamma}}{dt} &= \frac{u_{C\gamma} - u_{Cp\gamma}}{C_p R_p}, \\
\frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{p\sqrt{3}}{2J_\Sigma} \cdot M \cdot M_*(B) \cdot (i_{s\alpha} i_{r\gamma} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\gamma} i_{r\beta} - i_{s\alpha} i_{r\beta} - i_{s\beta} i_{r\gamma} - i_{s\gamma} i_{r\alpha}) - \frac{k_M \omega_r - k_e}{J_\Sigma} - \frac{M_{ВД}(v, \omega, b)}{J_\Sigma},
\end{aligned} \tag{9}$$

где $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{s\gamma}$ – потокосцепления статора по осям α , β , γ , Вб; $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$, $\Psi_{r\gamma}$ – потокосцепления ротора 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_n – сопротивление нагрузки, Ом; p – число пар полюсов АГ; ω_r – угловая скорость ротора, рад/с; J_Σ – суммарный момент инерции, кг·м²; $M_*(B)$ – 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.

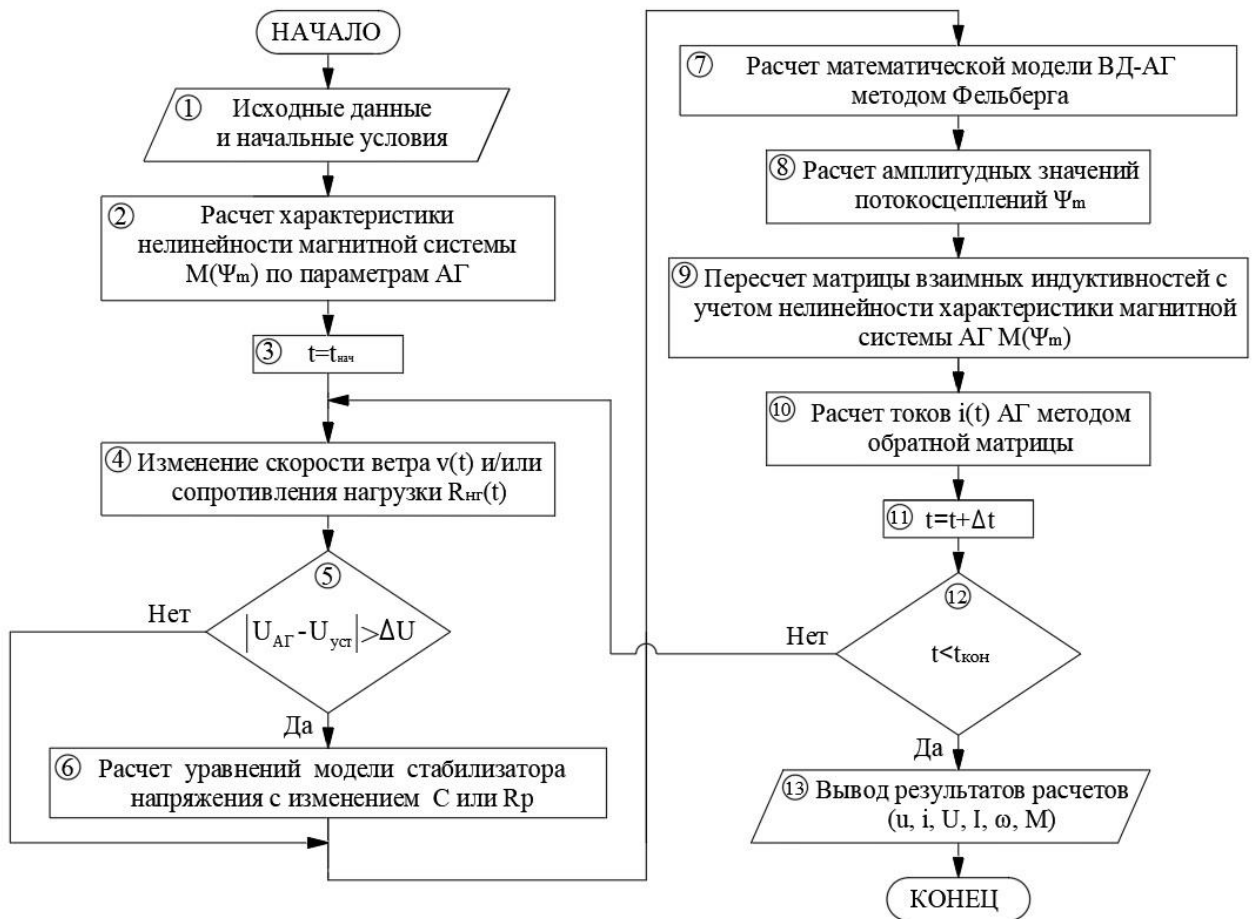


Рисунок 4 – Алгоритм решения уравнений модели «ВД-АГ-нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ВЭУ

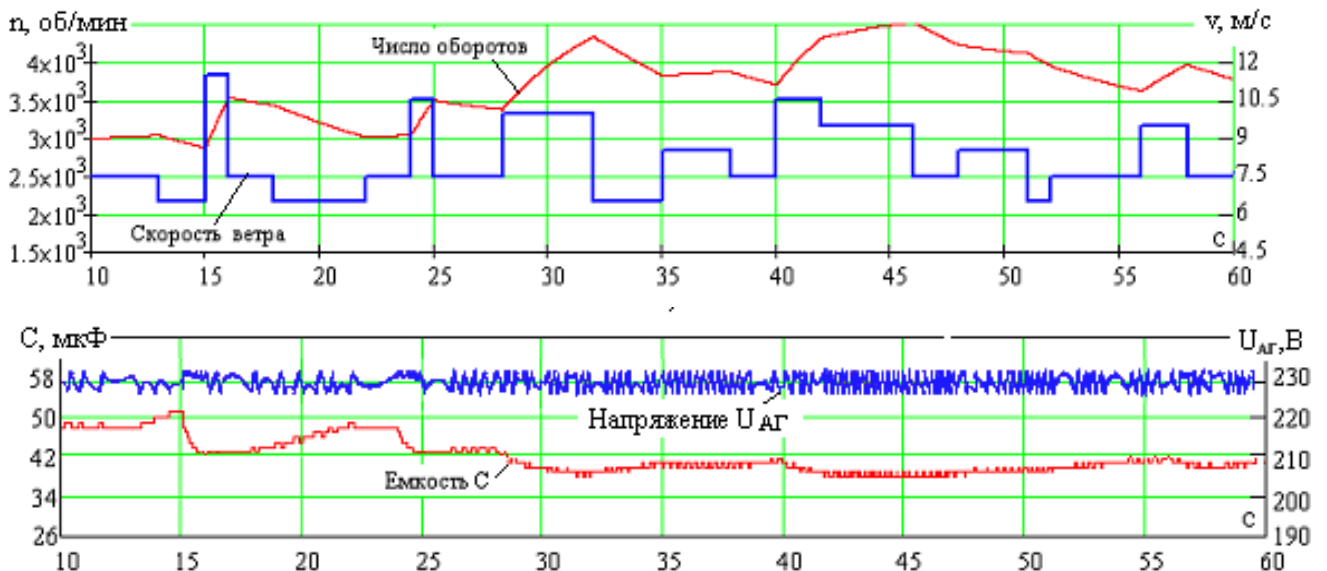


Рисунок 5 – Временные зависимости скорости ветра, частоты вращения ВД, емкости конденсаторов возбуждения и выходного напряжения АГ при дискретном регулировании тока возбуждения

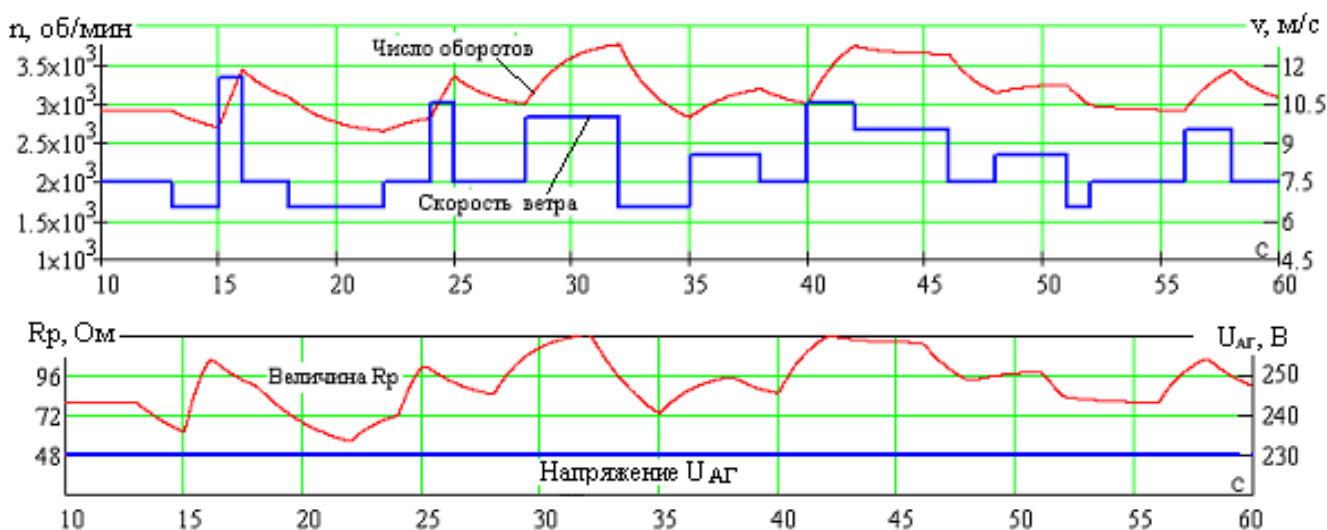


Рисунок 6 – Временные зависимости скорости ветра, частоты вращения ВД, сопротивления регулировочного резистора и выходного напряжения АГ при плавном регулировании тока возбуждения

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_r 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_r 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_r 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.

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 регулированием 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 выходного напряжения от заданной уставки составило не более 1,3 В. Расчетная и экспериментальная осциллограммы представлены на рисунке 9.

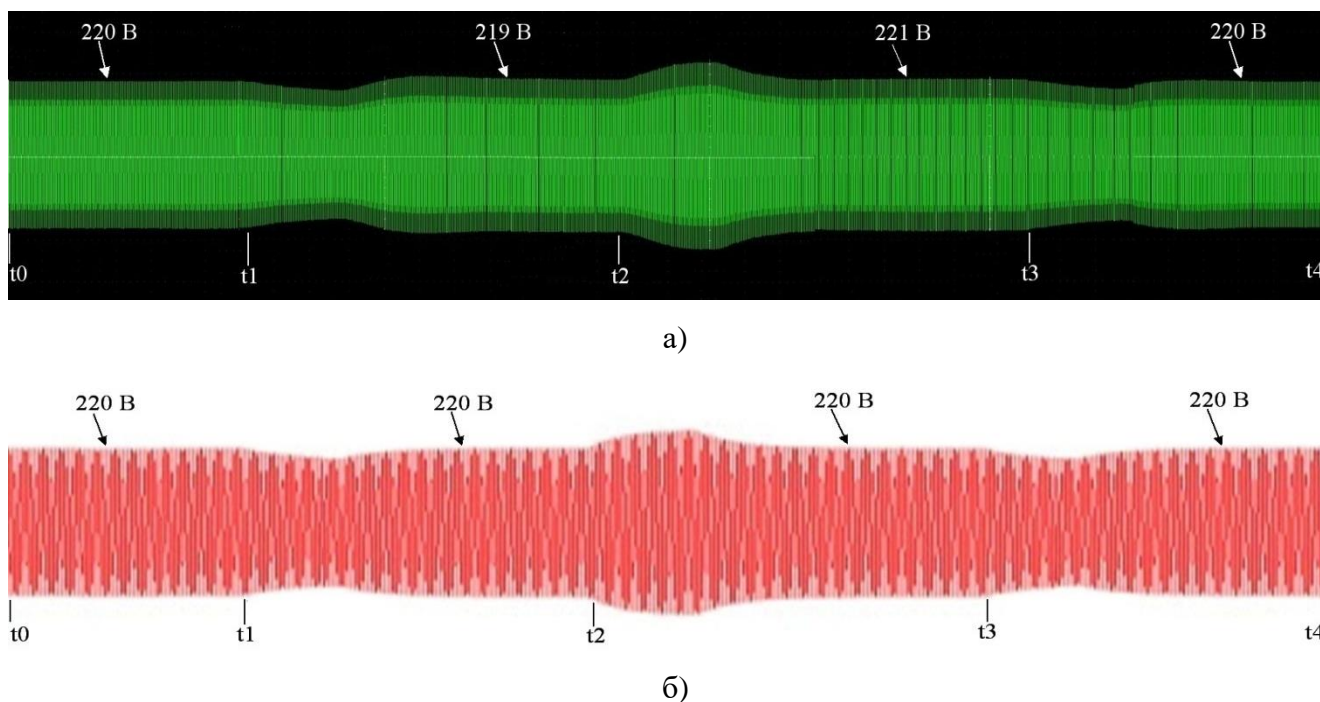


Рисунок 9 – Экспериментальная (а) и расчетная (б) осциллограммы выходного напряжения АГ при плавном регулировании тока возбуждения

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 управле-

ния.

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 животно-

водства.

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 Н02Р 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 Н02Р 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 учре-

ждение 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 «24» июня 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