

На правах рукописи

МОРЕНКО КОНСТАНТИН СЕРГЕЕВИЧ

ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ДВУХРОТОРНЫМ  
ГЕНЕРАТОРОМ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ  
ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

05.14.08 - энергоустановки на основе возобновляемых  
видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Азово-Черноморском инженерном институте ФГБОУ ВПО  
«Донской государственной аграрный университет»  
в г. Зернограде

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент  
**Степанчук Геннадий Владимирович**

Официальные оппоненты **Амерханов Роберт Александрович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника,  
теплотехника и возобновляемые  
источники энергии» ФГБОУ ВПО  
«Кубанский государственный  
аграрный университет»

**Грибков Сергей Владимирович**  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник Научно-  
исследовательского московского  
комплекса ФГУП ЦАГИ им. проф.  
Н. Е. Жуковского

Ведущее предприятие Национальный исследовательский  
университет МЭИ (Московский  
энергетический институт)

Защита диссертации состоится 1 июля 2014 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 006.037.01, созданного на базе Государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» по адресу: 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ВИЭСХ

Автореферат разослан июня 2014 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Алексей Иосифович Некрасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие экономики, расширение промышленного и сельскохозяйственного производства требует качественного обеспечения энергией, необходимой для непрерывного течения процессов в разных отраслях. Основным и наиболее востребованным видом энергии, который наиболее просто может быть преобразован в любой другой вид энергии, является электрическая энергия.

В связи с устареванием существующих систем электроснабжения, развитие альтернативных способов обеспечения электрической энергией и сетей по их распределению позволит существенно улучшить текущее положение и дать импульс для дальнейшего развития экономики страны.

Производство электроэнергии на крупных электростанциях, несомненно, более выгодно, чем на мелких. Тем не менее, следует учитывать значительные потери электрической энергии, происходящие при передаче её на большие расстояния от крупных электростанций. Значительная протяжённость и наличие множества элементов в цепи передачи электрической энергии снижают общую надёжность электроснабжения и повышают издержки и стоимость электроэнергии для потребителя.

Одним из возможных способов выхода из сложившейся ситуации является применение собственных систем генерации электрической энергии, причём не только в качестве резервного источника.

Применение собственных мощностей выводит на первый план проблему снабжения топливом удалённых потребителей. Вместе с тем, существуют виды энергии, распространённые по всей территории планеты. К одному из таких видов энергии можно отнести энергию ветра.

Ветер обладает рядом преимуществ, вызванных его природой: в дневные часы ветер наблюдается чаще, чем в ночные; в зимний период в большинстве регионов сила ветра выше, чем в летний. Таким образом, сама Природа делает ветер идеальным источником энергии, поступление которого совпадает с пиками потребления. Кроме того, ветровой потенциал на территории Российской Федерации составляет 30% всех потребляемых энергоресурсов.

Ветроустановки получают всё большее распространение так же благодаря Федеральному закону от 26 марта 2003 года №35-ФЗ «Об электроэнергетике», который предусматривает выплату компенсаций для предприятий, использующих энергию возобновляемых источников энергии.

Существующие разработки в области ветроэнергетики имеют ряд преград при создании эффективных ветроустановок, что приводит к снижению их распространения. Снижение эффективности ведёт к снижению рентабельности установок и делает их менее экономически привлекательными. Проблемами повышения эффективности работы ветроустановок занимались П. П. Безруких, К. П. Вашкевич, В. И. Виссарионов, С. М. Воронин, С. В. Грибков, В. Г. Еременко, Н. Е. Жуковский, А. А. Красовский, П. А. Кунцевич, В. Г. Николаев, С. В. Оськин, Д. де Рензо, Г. Х. Сабинин, А. К. Сокольский, Е. М. Фатеев, В. И. Харитонов, Я. И. Шефтер, Т. А. Шестопалова и другие.

**Цель работы:** стабилизация частоты выходного напряжения двухроторного генератора и приближённая оптимизация конструкции ветроэлектрической установки по техническим критериям.

**Объект исследования:** процесс выработки электрической энергии двухроторным генератором ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти.

**Предмет исследования:** закономерности влияния режимов работы генератора на частоту выходного напряжения.

**Научная гипотеза.** Частота выходного напряжения генератора ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти может быть стабилизирована путём изменения режима работы двухроторного генератора.

**Задачи исследования:**

1. Исследовать возможность применения двухроторного генератора для управления углом атаки лопасти для стабилизации частоты выходного напряжения.

2. Обосновать конструкцию и параметры двухроторного генератора, позволяющие стабилизировать частоту выходного напряжения.

3. Экспериментально подтвердить достоверность теоретических положений.

4. Оценить экономическую эффективность разработки.

**Методика исследования.** Аналитическое описание процесса выработки электрической энергии двухроторным генератором с применением современного программного обеспечения и компьютерной техники для выявления зависимостей между режимом работы генератора и величиной частоты выходного напряжения. Экспериментальные исследования влияния режима работы генератора на отклонение частоты выходного напряжения на действующей ветроустановке.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана математическая модель ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти на базе двухроторного генератора, позволяющая рассчитывать статические и динамические режимы работы.

2. Получены зависимости частоты вращения вала ветроустановки от режимов работы двухроторного генератора, позволяющие стабилизировать частоту выходного напряжения.

3. Обоснована методика определения соответствия мощности, времени работы и вырабатываемой энергии ветроустановки и потребителей, позволяющая установить эффективность применения и необходимость резервирования.

4. Обоснована экономическая целесообразность применения двухроторного генератора для ветроустановки.

**Практическая ценность:**

1. Разработан способ стабилизации частоты выходного напряжения установки путём изменения угла между роторами двухроторного генератора.

2. Разработана конструкция и обоснованы параметры двухроторного генератора, позволяющие стабилизировать частоту выходного напряжения ветроустановки.

3. Результаты исследований реализованы в экспериментальном образце в ООО «Спец-Энерго».

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель ветроустановки с двухроторным генератором.

2. Способ стабилизации частоты вращения вала ветроустановки изменением угла между роторами.

3. Методика определения эффективности применения и необходимости резервирования ветроустановки.

**Реализация результатов исследования.** Результаты научных исследований были использованы при выполнении НИР по заказу МСХ РФ за счёт средств федерального бюджета по теме «Проведение научных исследований и разработка систем комплексного энергообеспечения животноводческих объектов на базе использования энергоэффективных установок различного типа для получения энергии». Действующая конструкция используется в личном подсобном хозяйстве по адресу: Ростовская область, Зерноградский район, х. Ракитный, 75.

**Апробация работы.** Результаты работы апробированы на следующих научных конференциях:

7-я и 8-я международные научно-практические конференции ГНУ СКНИИМЭСХ «Агроинженерная наука в повышении энергоэффективности АПК», г. Зерноград, 2012, 2013 гг.;

I, II, III турах всероссийских конкурсов на лучшую научную работу среди аспирантов вузов Минсельхоза России в номинации «Технические науки», г. Зерноград, г. Саратов, 2012, 2013 гг.;

научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург, 2012 г.;

международная научно-практическая конференция ФГБОУ ВПО АЧГАА «Научно-техническое обеспечение АПК Юга России», г. Зерноград, 2012, 2013 гг.

VI, VII международные научно-практические конференции ФГБОУ ВПО СтГАУ «Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе», г. Ставрополь, 2012, 2013 гг.;

научно-практическая конференция ГНУ ВИЭСХ «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», г. Москва, 2012, 2013 гг.;

международная научно-практическая конференция ФГБОУ ВПО МГАУ «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии в АПК», г. Москва, 2012 г.;

V международная научно-практическая и учебно-методическая конференция, посвященная памяти Мартыненко И. И. «Энергообеспечение технологических процессов АПК», г. Мелитополь, Украина, 2012 г.;

научно-практическая конференция, посвящённая 75-летию Ростовской области, г. Зерноград, 2013 г.;

2-я конференция молодых учёных и специалистов «Научное обеспечение инновационных процессов в агропромышленной сфере», ГНУ ВИЭСХ, г. Москва, 2013 г.

**Публикация результатов исследований.** По результатам исследований опубликовано шестнадцать статей, в том числе две из перечня ВАК, получен патент РФ на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 133 страницах, содержит 59 иллюстраций, 6 таблиц, список литературы из 125 наименований, в том числе 47 на иностранных языках, и приложений на 4 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы, определены объект и предмет исследования, поставлена цель работы и задачи, определена научная гипотеза, указаны основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Состояние и перспективы развития использования возобновляемых источников энергии» рассмотрены существующие устройства на базе возобновляемых источников энергии для получения электрической энергии, указаны преимущества использования ветровой энергии.

В настоящее время значительным препятствием на пути широкого распространения малых ветроустановок является невозможность получения непосредственно на выходе генератора напряжения промышленного качества.

В общем случае ветроустановка состоит из двух узлов: преобразователя энергии поступательного движения ветра во вращательную — ветроколеса, и преобразователя вращательной энергии в электрическую — генератора. Наибольшим коэффициентом использования энергии ветра среди существующих типов ветроколёс обладает крыльчатое ветроколесо. К его преимуществам следует отнести низкую материалоемкость и широкие возможности регулирования. В виду возможности достижения высоких значений быстроходности, допустимо применение этих ветроколёс без необходимости включения мультипликатора для достижения требуемой частоты вращения вала генератора.

Наиболее распространённые на сегодняшний день для малых ветроустановок синхронные генераторы с постоянными магнитами обладают рядом недостатков: высокая стоимость магнитов, отсутствие возможности стабилизации величины выходного напряжения и его частоты, высокий удельный вес; необходимость применения в цепи преобразования энергии инвертора для получения напряжения промышленного качества. Другие типы генераторов предъявляют высокие требования к стабильности частоты вращения вала.

Для устранения этого недостатка был предложен ряд конструкций машин двойного питания, обладающих широким диапазоном допустимых частот вращения. Основным недостатком таких конструкций является присутствие инвертора в цепи возбуждения, что приводит к появлению значительного количества высших гармоник в выходном напряжении и росту потерь в питаемых цепях.

В иностранной литературе уделяется внимание генераторам с двумя коаксиально расположенными роторами, которые позволяют значительно расширить диапазон допустимых частот вращения. Они не содержат устройств преобразования энергии на базе полупроводниковых элементов и не генерируют высшие гармоники.

Основным препятствием на пути применения таких конструкций в малой ветроэнергетике является сложность изготовления устройства.

Разработка более простой в изготовлении конструкции генератора, позволяющего получать непосредственно на выходных зажимах напряжение промышленного качества позволит значительно расширить возможности применения малых ветроустановок.

**Вторая глава** «Теоретическое обоснование способа регулирования частоты выходного напряжения генератора ветроустановки» посвящена

разработке теоретических положений. Рассмотрено устройство, в котором функции регулирования распределены между генератором и ветроколесом. В такой конструкции ветроколесо является как воспринимающим органом, так и регулирующим, генератор является не только узлом преобразования энергии, но и управляющим элементом.

Двухроторный генератор (рисунок 1) позволяет создавать противодействующий повороту лопасти момент вращения и передать его лопасти с помощью моментного моста из конических шестерён.

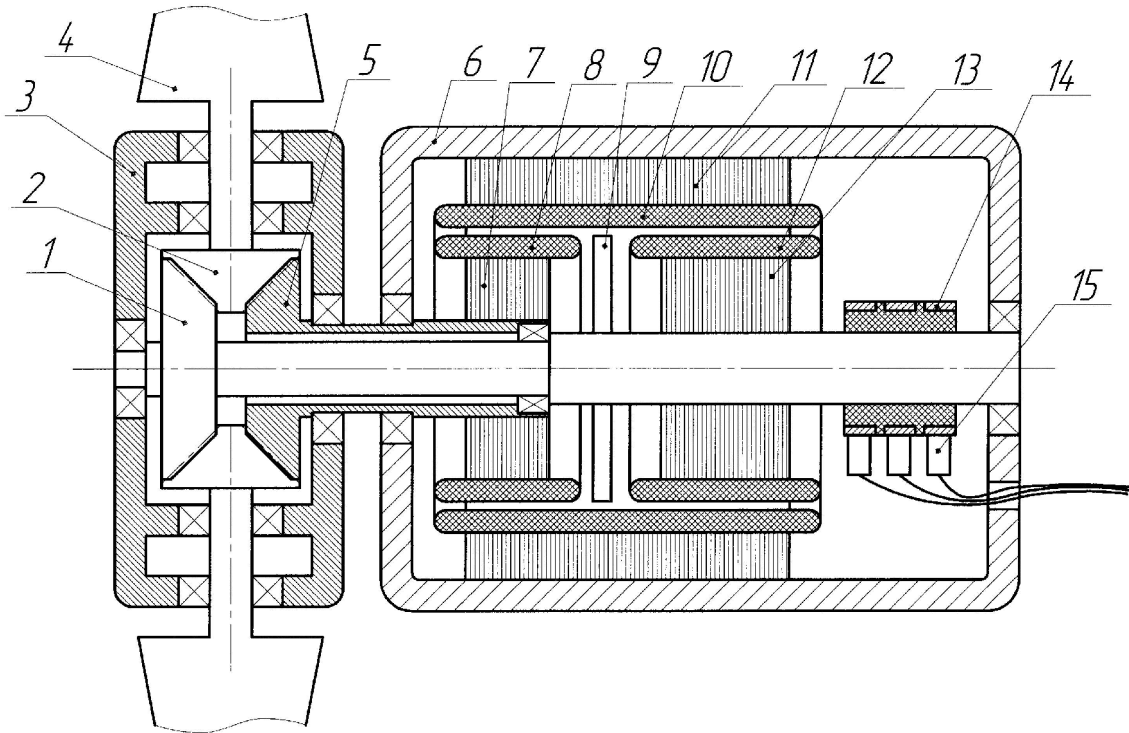


Рисунок 1 — Устройство двухроторного генератора

Внутри корпуса 6 находятся статор 11 с обмоткой возбуждения 10, внутри которого аксиально расположены основной ротор 13 и регулирующий ротор 7, которые через конические шестерни 1, 2, 5 связаны с лопастями ветроколеса 4. Опорой шестерён служит корпус 3.

Трёхфазная обмотка 12 основного ротора подключается к нагрузке через контактные кольца 14 и щётки 15. Управление шунтированием обмотки 8 регулирующего ротора осуществляется блоком контроля 9.

При вращении лопастей приводится во вращение основной и регулирующий роторы в поле статора. В обмотке основного ротора наводится ЭДС, пропорциональная напряжённости поля, с частотой, определяемой скоростью вращения и числом полюсов обмотки.

Регулирование угла атаки лопасти происходит благодаря повороту регулирующего ротора относительно основного изменением величины шунтирования обмотки регулирующего ротора, при этом он поворачивается относительно основного ротора, поворачивает шестерню, изменяя угол атаки.

При изменении частоты вращения ветроколеса изменяется частота тока в обмотке основного ротора, что приводит к изменению величины шунтирования обмотки регулирующего ротора и к изменению угла атаки лопасти, направленному на восстановление частоты вращения основного ротора.

При изменении нагрузки происходит изменение частоты тока в обмотке и изменение шунтирования обмотки регулирующего ротора блоком управления, направленное на восстановление частоты вращения путём поворота лопасти. Измерение частоты и величины тока, протекающего по обмотке основного ротора, обеспечивается трансформаторами тока, подключенными к блоку управления.

Разъяснение направлений действия моментов в описанной конструкции представлено на рисунке 2. На нём указаны моменты, воздействующие на лопасти, число которых равно  $n$ , вызывающие поворот лопасти  $M_{0r}$  и вращение ветроколеса  $M$ , и противодействующие им моменты сопротивлений роторов генератора  $M_1$  и  $M_2$ .

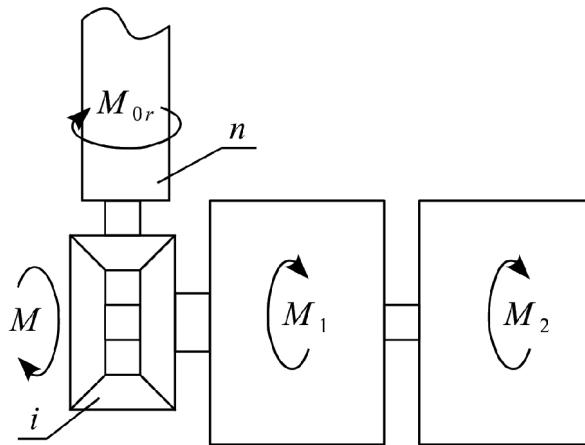


Рисунок 2 — Схема направлений моментов

Анализируя направления каждого из указанных моментов, получим

$$M = \frac{M_1 + M_2}{2}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (1)$$

$$M_{0r} = i \frac{M_1 - M_2}{2n}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

где  $i$  — передаточное число моментного моста.

Для обеспечения работы ветроколеса необходимо, чтобы на свободно поворачивающейся лопасти возникал противодействующий момент, удерживающий её под углом к потоку ветра. Из уравнения (2) следует, что данный момент образуется на лопасти как разность моментов сопротивления роторов. Момент сопротивления вращению ветроколеса, образующий полезную мощность, является суммой указанных моментов согласно уравнению (1).

Для изменения угла атаки лопасти следует сохранять сумму моментов на роторах постоянной, изменяя их разность между роторами. При изменении момента сопротивления генератора необходимо одновременно на равную величину изменять моменты на роторах, тогда разность моментов сохранится постоянной, как и момент, противодействующий повороту лопасти.

Моменты воздействия ветра на лопасти и ветроколесо определялись согласно формулам

$$M = 2 \pi \rho R^5 \omega^2 \bar{M}(\phi_0, Z), \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (3)$$

$$M_{0r} = 2 \pi \rho R^5 \omega^2 \bar{M}_{0r}(\phi_0, Z), \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $R$  — радиус ветроколеса, м;  
 $\omega$  — угловая скорость вращения ветроколеса,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $\bar{M}$  и  $\bar{M}_{0r}$  — отвлечённые аэродинамические моменты: вращающий ветроколесо и поворачивающий лопасть соответственно,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  
 $\phi_0$  — угол установки лопасти ветроколеса, радиан;  
 $Z$  — быстроходность ветроколеса,

и типовым кривым отвлечённых аэродинамических моментов для ветроколёс с обтекаемыми профилями согласно исследованиям ЦАГИ.

Сопротивления, создаваемые роторами генератора определялись с помощью формул

$$M_{r1} = \frac{D \cdot L_{m1} \cdot w_{r1}}{2 \cdot q_1} \sum_1^3 \left( I_{r1} \cdot \sum_1^{n_2} (B_{r1} \cdot K_{m1}) \right), \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (5)$$

$$M_{r2} = \frac{D \cdot L_{m2} \cdot w_{r2}}{2 \cdot q_2} \sum_1^3 \left( I_{r2} \cdot \sum_1^{n_2} (B_{r2} \cdot K_{m2}) \right), \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (6)$$

где  $D$  — средний диаметр воздушного зазора, м;  
 $L_{m1}, L_{m2}$  — длина пакетов стали первого и второго роторов, м;  
 $w_{r1}, w_{r2}$  — число витков в катушках обмоток;  
 $K_{m1}, K_{m2}$  — коэффициенты, определяющие влияние индукции зубца на момент электрической машины;  
 $B_{r1}, B_{r2}$  — значения индукции в зубцах роторов, Тл;  
 $I_{r1}, I_{r2}$  — токи в обмотках роторов, А.

При конструировании ветроустановки следует обратить внимание на эффективность использования ветроколеса и возможное количество вырабатываемой энергии. В связи с тем, что ветроустановка работает на номинальной мощности во всём рабочем диапазоне скоростей, причём система защиты от штормовых ветров не требуется из-за наличия регулирования угла атаки лопасти, главный размерный параметр используемого на ветроустановке ветроколеса — радиус — определяет начальную рабочую и номинальную скорости ветра и число часов использования максимума установленной мощности ветроустановки.

На малых установках цена одного погонного метра лопасти мало связана с длиной лопасти, что вызвано тем, что ширина и толщина лопасти мало изменяются для разных размеров лопастей, поэтому длина лопасти была выбрана как основной параметр, определяющий цену ветроколеса ветроустановки, подразумевая, что количество лопастей остаётся постоянным.

Для того, чтобы оценить эффективность изменения размеров ветроколеса (и начальной скорости ветра) использовано отношение вероятности работы ветроустановки  $w(v)$  при работе от скорости ветра  $v$  к размеру ветроколеса,

$$E(v) = \frac{1 - \int_0^v w(v) dv}{r(v)}, \text{ м}^{-1}, \quad (7)$$

которое было приведено к его значению при базовой скорости ветра  $v_{баз} = 8 \text{ м/с}$  по формуле

$$E_{баз}(v) = \frac{E(v)}{E(v_{баз})}. \quad (8)$$

Для того, чтобы сохранить поток мощности через ветроколесо при изменении стартовой скорости ветра, его радиус должен быть изменён относительно базового согласно формуле

$$r(v) = \left(\frac{v_{баз}}{v}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot r_{баз}, \text{ м}. \quad (9)$$

Результаты расчётов согласно уравнениям (7–9) приведены на рисунке 3.

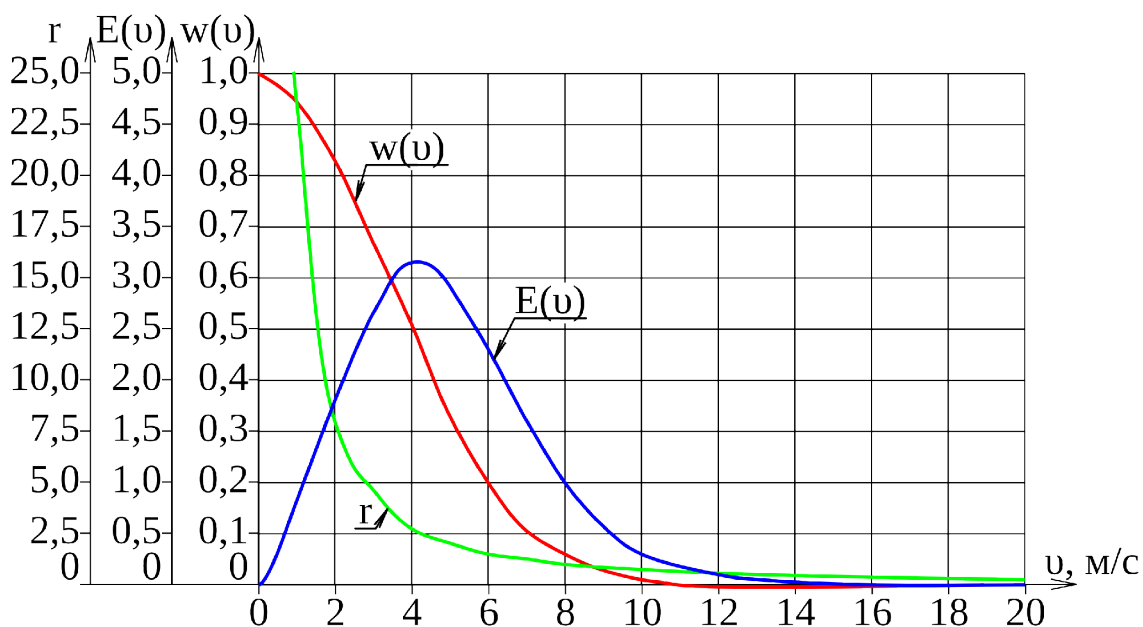


Рисунок 3 — Эффективность использования ветроколеса

Согласно представленному рисунку 3, наибольшая эффективность использования ветроколеса в зоне предполагаемой установки наблюдается при установке стартовой скорости ветра равной 4 м/с. Поскольку быстроходность ветроколеса не может быть увеличена далее, увеличение размера ветроколеса приведёт к снижению его частоты вращения: скорость конца лопасти снизится, а проходимый ею путь увеличится. Такое снижение частоты вращения вызовет необходимость применения генератора с бóльшим числом пар полюсов.

Таким образом, увеличивается габаритный размер генератора, снижается значение коэффициента полезного действия и значительно возрастает величина индуктивного сопротивления, что требует дополнительной компенсации, снижает надёжность и увеличивает стоимость.

Исходя из указанных предпосылок, было принято решение установить в качестве начальной рабочей скорости ветра ветроустановки для дальнейшего анализа скорость ветра, равную 6 м/с.

При проектировании ветроустановок требуется определить необходимое значение потребляемой мощности, что не всегда возможно, особенно в случаях, когда объект электроснабжения ещё не введён в строй и фактических данных о его энергопотреблении нет.

Рассмотрены следующих параметров каждого потребителя:

- мощность потребителя  $P$  — мощность потребления без учёта пусковых токов;
- время работы  $T$  — фактическое время работы потребителя за рассматриваемый период;
- необходимость включения  $b$  — логический параметр, принимающий значения «1» (да) или «0» (нет) — необходимость включения нагрузки для соблюдения технологических процессов, либо других условий работы предприятия или проживания людей;
- независимость потребителя  $t$  позволяет учитывать возможность одновременности включения некоторых потребителей. К потребителям, имеющим значение  $t=1$ , относят тех, которые могут быть включены совместно с другими (освещение или холодильник, автоматически включающийся для поддержания температуры в холодильной камере).

На основании анализа этих параметров определяется необходимое время работы установки в пределах суток и необходимое значение мощности для обеспечения потребности в электрической энергии.

Для выявления сравнительной эффективности работы предлагаемой ветроустановки с другими ветроэлектрическими агрегатами соизмеримой мощности, в качестве основного удельного параметра был выбран коэффициент использования максимума установленной мощности, выраженный в количестве часов в год.

В качестве установок для сравнения были выбраны: проектируемая ветроустановка мощностью 2 кВт, ветроустановка с фиксированным углом установки лопастей Low Wind мощностью 3,5 кВт и ветроустановка с центробежным регулятором угла установки лопастей Storm Use мощностью 3 кВт.

Для того, чтобы повысить точность при определении числа часов использования максимума установленной мощности, расчёт производился численным методом, при этом интервал деления диапазона скоростей ветра был принят равным  $1\text{ м/с}$ . Результаты расчётов представлены на рисунке 4.

Согласно представленным результатам, коэффициент использования установленной мощности предлагаемой установки выше в зоне скоростей  $6-8\text{ м/с}$ , несмотря на то, что в диапазоне  $2-4\text{ м/с}$  энергия не вырабатывается. Общий коэффициент использования установленной мощности выше на 19%, в сравнении с существующими конструкциями.

Для того, чтобы оценить максимальное влияние отклонений ветрового потока на частоту выходного напряжения, использовалось уравнение, учитывающее скорость ветра  $v_{\text{ветра}}(t)$ , скорость  $v_{\text{ветра установка}}(t)$ , на которую настроен угол атаки лопастей, потребляемую мощность  $P_{\text{потреб}}$ , момент инерции вращения  $J$  и частоту вращения ветроколеса  $\omega_{\text{установ}}$

$$\omega_{\%} = \int \left( \left[ \frac{v_{\text{ветра}}(t)}{v_{\text{ветра установка}}(t)} \right]^3 - 1 \right) \cdot \frac{P_{\text{потреб}}}{J \cdot \omega_{\text{установ}}} dt. \quad (10)$$

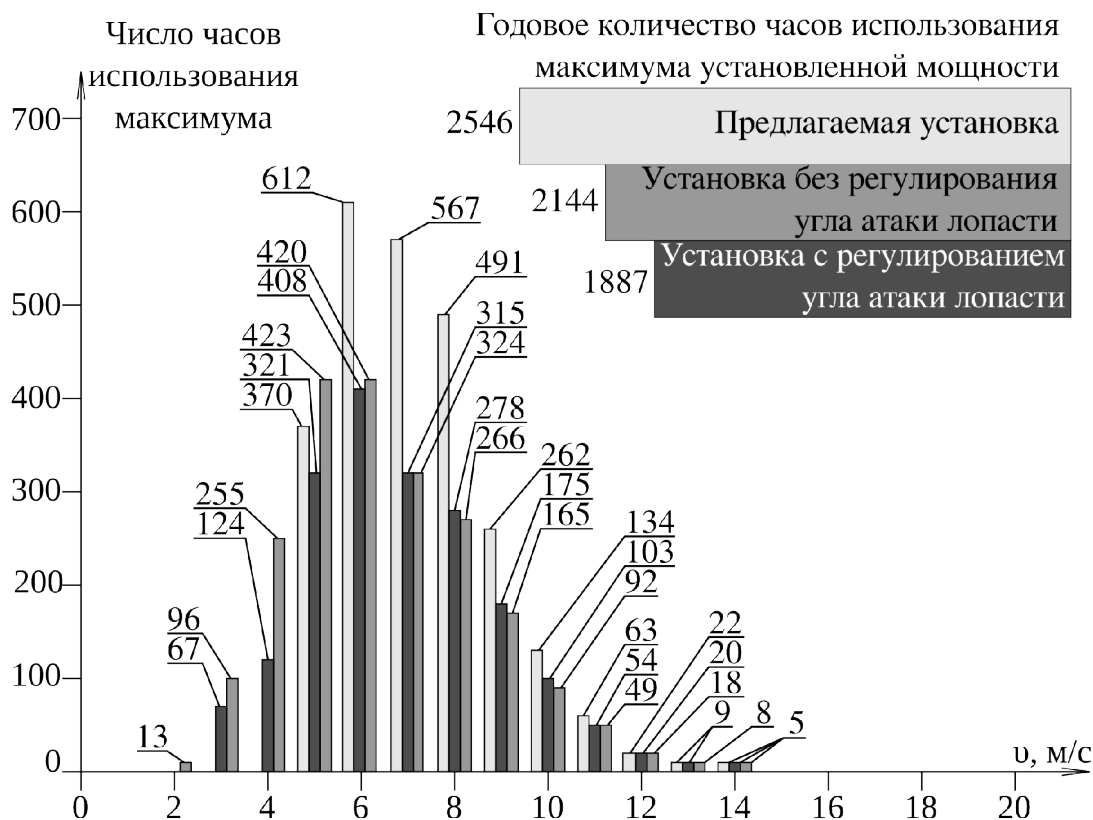


Рисунок 4 — Число часов использования максимума установленной мощности по скоростям ветра

Для проведения теоретических исследований режимов работы ветроустановки разработана математическая модель, построенная на основании современных знаний о процессах преобразования энергии в ветроколесе и генераторе.

В качестве входных параметров модели приняты: действующая скорость ветра  $u$ , напряжение возбуждения на статоре  $U_{\text{возб}}$  и сопротивления нагрузок каждого из роторов  $R_{d1}$  и  $R_{d2}$ . Выходными параметрами модели могут быть различные; для целей проводимого исследования основным выходным значением была выбрана частота выходного напряжения.

Структурная схема разработанной математической модели, позволяющая изучать протекающие процессы в ветроустановке с регулированием угла атаки лопасти двухроторным генератором, представлена на рисунке 5.

В работе ветроустановки интерес представляют следующие переходные режимы: разгон, изменение нагрузки, изменение скорости ветра, останов.

В процессе исследований на модели установлено, что напряжение не выходит за границы  $\pm 5\%$  установившегося значения через 1 с после включения генератора, а частота не выходит за границы  $\pm 2\%$  через 1,6 с после запуска, при этом максимальное перерегулирование по напряжению не превышает 15 %, по частоте — 30 %.

При прямом пуске асинхронного электродвигателя наблюдается значительное отклонение частоты и напряжения. Так, для напряжения перерегулирование в процессе разгона составляет 17 %, время установления — 1,1 с, для частоты перерегулирование составляет 16 %, время установления — 2,2 с (рисунок 6).

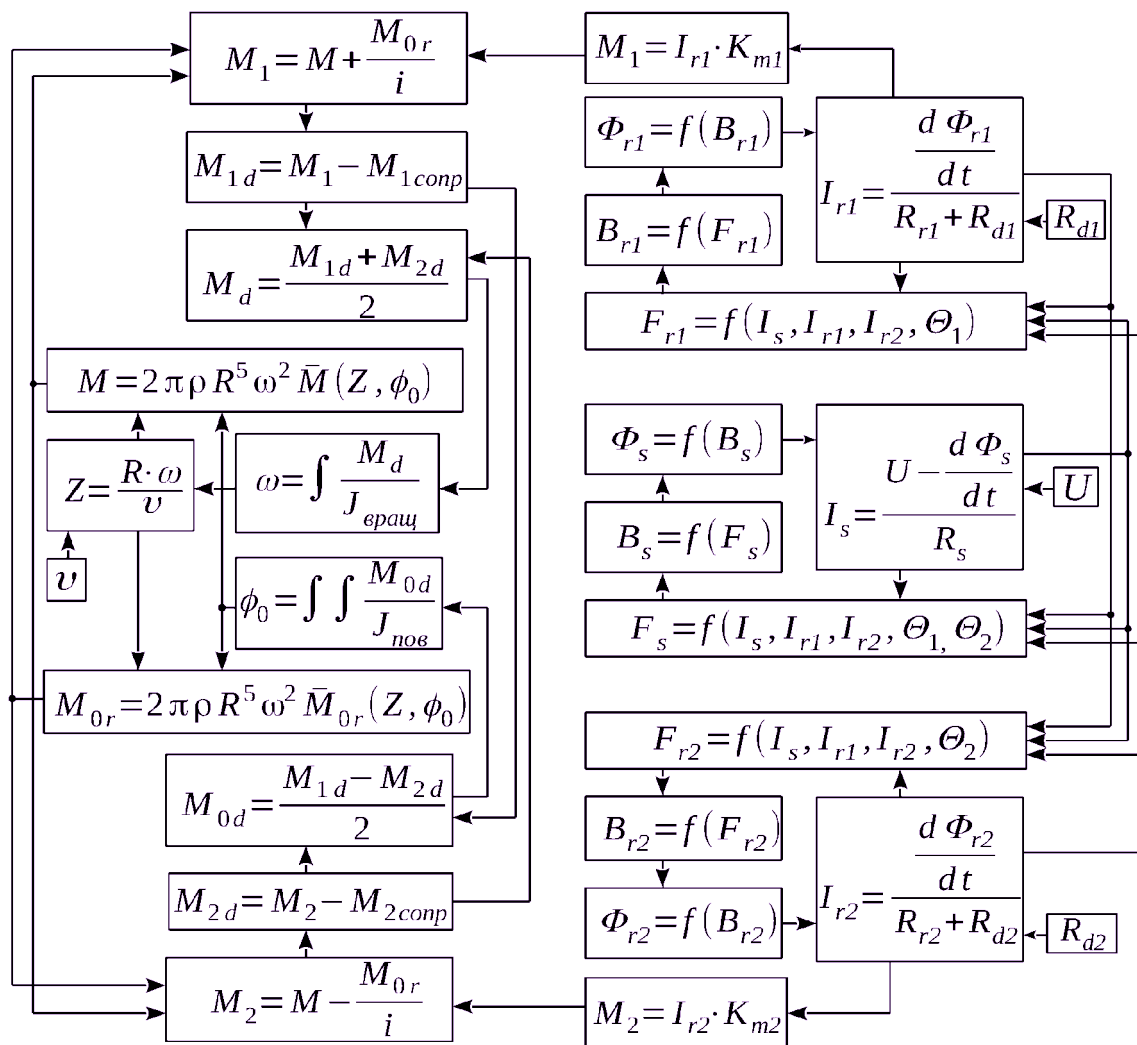


Рисунок 5 — Структурная схема математической модели ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти на базе двухроторного генератора

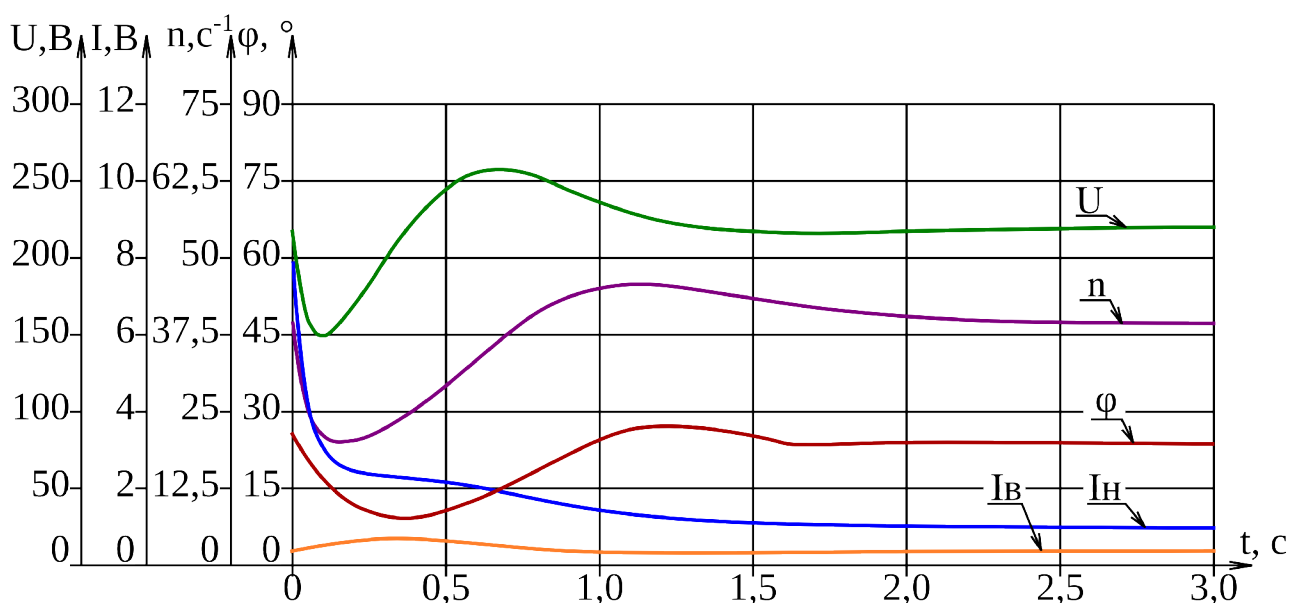


Рисунок 6 — Моделирование прямого пуска электродвигателя от ветроэлектрической установки

В результате анализа режима работы установки при изменении скорости ветра выяснено, что установка справляется с такими изменениями без значительных отклонений частоты вращения вала ветроколеса и выходного напряжения.

Во всём диапазоне расчётных скоростей ветра установка работает с номинальной частотой вращения вала, что свидетельствует о возможности подстройки угла атаки лопасти установки к любой скорости ветра в рабочем диапазоне для стабилизации частоты выходного напряжения.

По результатам испытаний ветроустановки в процессе торможения сделан вывод о возможности останова ветроколеса при любой рабочей скорости ветра не подвергая его перегрузке.

**Третья глава** «Экспериментальные исследования ветроустановки с двухроторным генератором» посвящена методике экспериментальных исследований ветроустановки и их результатам. Прежде чем проводить полевые испытания, проводились лабораторные исследования для выяснения возможности работы генератора на ветроустановке.

В ходе лабораторных экспериментальных исследований определены характеристики холостого хода и короткого замыкания генератора, регулировочная и нагрузочная характеристики.

Для выяснения возможности использования генератора на ветроустановке определены моменты сопротивлений, создаваемые роторами генератора. Для этого в лабораторных условиях генератор был установлен на вращающиеся опоры и через рычаг длиной 1 м воздействовал на весы.

Возбуждение генератора осуществлялось от автотрансформатора, выпрямительного моста и блока сглаживающих конденсаторов, нагрузка выполнена в виде ТЭНов, включённых через автотрансформаторы для регулирования величины загрузки генератора. Привод осуществляется от двигателя постоянного тока через ремённую передачу.

В результате лабораторных испытаний установлено, что на холостом ходу напряжение достигает номинального значения при токе возбуждения 0,2 А. В результате анализа нагрузочной характеристики выяснено, что при загрузке генератора номинальным током происходит снижение напряжения до 130 В.

Результаты опытов свидетельствуют о необходимости включения в состав установки регулятора тока возбуждения. Регулировочная характеристика позволяет установить диапазон регулирования тока возбуждения — 0,2–0,3 А.

Лабораторные эксперименты показали возможность использования генератора на ветроустановке в предусматриваемых режимах работы.

Разработана программа экспериментальных исследований для определения инерции вращающейся части ветроустановки для определения влияния отклонений скорости ветра на изменение частоты вращения вала генератора, полученное значение полного момента инерции ветроустановки составляет  $26,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Обоснованы классы точности приборов, необходимые для проведения соответствующих измерений.

В ходе планирования полевых экспериментальных исследований определено необходимое количество опытов; для получения результата с достоверностью 95% их количество должно быть не менее 39.

Экспериментальные исследования проводились на действующей ветроустановке с регулируемым углом атаки лопасти, внешний вид которой

приведён на рисунке 7. При этом проводились измерения напряжения на роторах, протекающие токи, частота вращения вала генератора и скорость ветра. В ходе испытаний было произведено не менее 100 отсчётов.

Проверка на нормальность закона распределения производилась с помощью критерия согласия Пирсона. Разброс точек относительно среднего был разбит на двадцать карманов, после чего подсчитаны частоты попадания точек в соответствующие интервалы.

Значением доверительной вероятности для проверки нормальности закона распределения было выбрано  $P=0,95$ . Расчётное значение критерия согласия Пирсона составило  $\chi^2_{расч}=0,244$ , в то время как соответствующее ему табличное значение  $\chi^2_{табл}=10,11$ . В связи с тем, что  $\chi^2_{расч} < \chi^2_{табл}$ , сделан вывод о соответствии закона распределения экспериментальных значений нормальному закону распределения.

После проверки гипотезы о нормальности распределения исходных данных полученные результаты измерений были проверены на воспроизводимость. Для этого они были разбиты на пять выборок одинакового объёма и для каждой из выборок определена дисперсия. Расчётное значение критерия Кохрена составляет  $Q=0,301$ , табличное значение составляет  $G=0,699$ . Полученный результат  $Q < G$ , свидетельствует об однородности дисперсий и воспроизводимости результатов экспериментальных исследований



Рисунок 7 — Внешний вид действующей ветроустановки для проведения экспериментальных исследований

Адекватность полученной математической модели была проверена с помощью критерия согласия Пирсона, расчётное значение которого составило  $F_{расч} = 1,899$ , табличное значение —  $F_{табл} = 2,600$ . Поскольку  $F_{расч} < F_{табл}$ , математическая модель адекватно отражает результаты экспериментальных исследований с вероятностью  $P = 0,95$ . Внешний вид полученных теоретических и экспериментальных кривых приведён на рисунке 8.

Для оценки эксплуатационных характеристик установки была произведена проверка возможности запуска асинхронного электродвигателя. Результат проверки показал наличие такой возможности. В результате испытаний установлено, что время запуска не превышает 3,0 с на холостом ходу. Непосредственно после подключения двигателя возникает провал напряжения до 150 В, ликвидируемый системой регулирования угла атаки лопасти и системой регулирования возбуждения в течение одной секунды (к моменту времени 1,5 с), после которого происходит подстройка угла атаки лопасти соответственно потребляемому электродвигателем току и мощности.

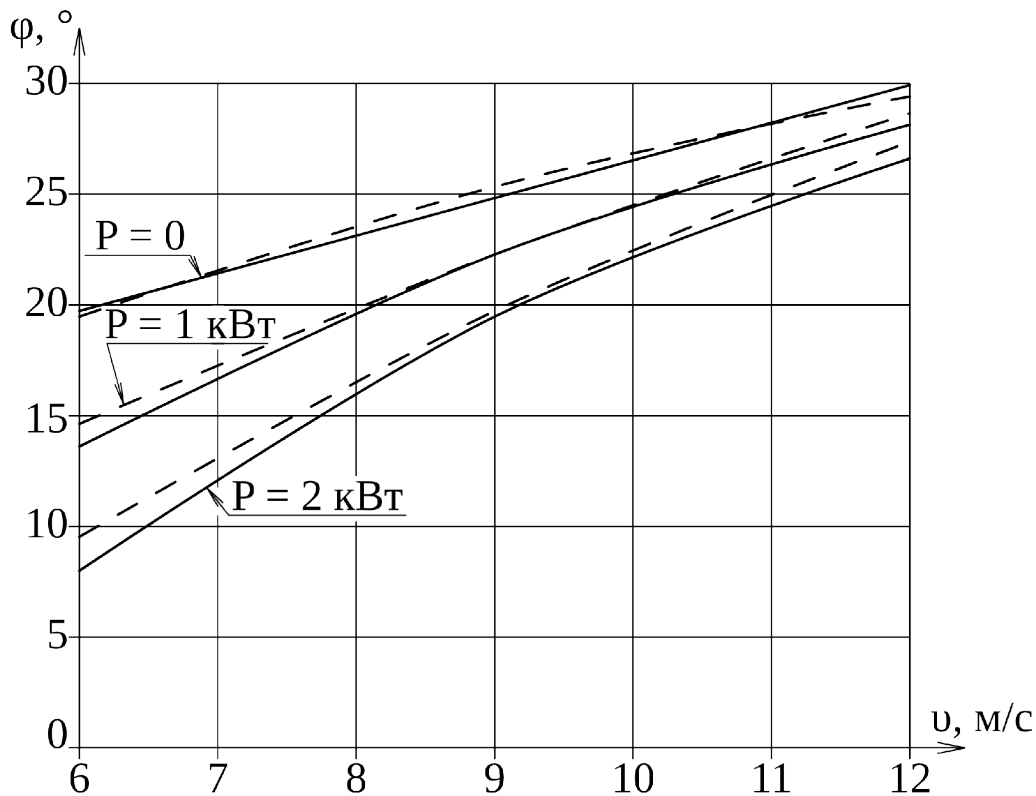


Рисунок 8 — Внешний вид теоретических и экспериментальных кривых

**В четвёртой главе** «Технико-экономическое обоснование применения ветроэлектрической установки» произведена оценка экономической эффективности предлагаемой ветроустановки, мощностью 2,2 кВт и сравнение с серийно выпускаемыми ветроустановками Low Wind 3,5 кВт и Storm Use 3 кВт, результаты которого приведены в таблице 1. Использование устройства позволяет снизить стоимость получаемой электроэнергии, что приводит к общему снижению себестоимости получаемой продукции и росту рентабельности производства.

Таблица 1 – Результаты расчета экономической эффективности разработки

Наименование показателя	Проект. вариант	Low Wind	Storm Use
Капитальные вложения, руб.	149 742	209 459	157 272
Эксплуатационные затраты, руб.	12 707	17 595	13 211
Годовое количество вырабатываемой электроэнергии, кВт-ч	5 600	7 500	5 700
Стоимость электроэнергии, руб./кВт-ч	2,27	2,35	2,32
Годовая экономия эксплуатационных затрат, руб.	19 712	26 369	20 074
Срок окупаемости капиталовложений, лет	10,2–12,2	10,8–13,1	10,6–12,8
Индекс доходности дополнительных капиталовложений	1,33–1,07	1,26–1,08	1,27–1,09
Внутренняя норма доходности, %	10,0	9,3	9,5
Чистый дисконтированный доход			
при $E = 12,0\%$ , $r = 6\%$ , руб.	+49 810	+53 469	+42 884
при $E_p = 8,0\%$ , руб.	+18 982	+16 235	+14 540

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты исследований предложенной конструкции с помощью разработанной математической модели показали возможность применения двухроторного генератора на ветроустановках с управляемым углом атаки лопасти для стабилизации частоты выходного напряжения; разработанная математическая модель позволяет рассчитывать установившиеся и переходные процессы в ветроустановках данной конструкции. Процессы пуска, включения нагрузки, изменения скорости ветра и торможения сопровождаются допустимыми отклонениями частоты и величины напряжения — не более 17%.

2. Разработана конструкция двухроторного генератора для ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти (Патент RU2443301), которая позволяет объединить в одном узле генератор и устройство управления углом атаки лопасти для стабилизации частоты выходного напряжения генератора.

3. Исследование режимов работы генератора на лабораторном стенде указывает на возможность применения двухроторного генератора на ветроустановках с управляемым углом атаки лопасти и соответствие выходных параметров генератора требованиям, предъявляемым к ним государственными стандартами на частоту выходного напряжения.

4. Результаты полевых экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о работоспособности двухроторного генератора на ветроустановках данного типа и о соответствии результатов теоретических исследований двухроторного генератора экспериментальным результатам. Полученное отклонение частоты выходного напряжения составляет не более  $0,66 \pm 0,09$  Гц.

5. Применение ветроустановки на базе двухроторного генератора позволяет снизить стоимость электрической энергии для потребителя и достичь чистого дисконтированного дохода в размере 19–50 тыс. руб. на одну установку. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составляет 10,2–12,2 года.

**Основное содержание исследования опубликовано в работах:  
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Моренко, К. С. Оптимизация режима работы малой ветроустановки регулированием угла атаки лопасти [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2014. — №2. — С. 26–27.

2. Моренко, К. С. Оценка влияния нестабильности ветрового потока на частоту вращения ветроколеса в ходе экспериментальных исследований / К. С. Моренко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. — Краснодар: КубГАУ, 2013. — №90(06). — Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/02.pdf>.

**Публикации в других изданиях:**

3. Моренко, К. С. Двухроторный электрогенератор для ветроустановки [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Физико-технические проблемы создания новых экологически чистых технологий в агропромышленном комплексе: материалы VI Российской научно-практической конференции. — Ставрополь: Ставропольское издательство «Параграф», 2011. — С. 153–159.

4. Моренко, К. С. Основные результаты моделирования двухроторного генератора для ветроустановки [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Пленарные доклады и тезисы сообщений Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». — М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. — С. 137–138.

5. Моренко, К. С. Результаты исследования двухроторного генератора для ветроустановки на математической модели [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Инновации в животноводстве: разработка, исследования, испытания. — Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2012. — С. 101–104.

6. Моренко, К. С. Устойчивость работы ветроустановки на основе двухроторного генератора [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 8-й Международной научно-технической конференции (16–17 мая 2012 года, г.Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. — Часть 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. — С. 168–173.

7. Моренко, К. С. Выбор рабочей скорости ветра ветроустановки на базе двухроторного генератора [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Инновации в сельском хозяйстве. — М.: ГНУ ВИЭСХ. — 2013. — №1(3). — С. 66–70.

8. Моренко, К. С. Расчёт регулировочной характеристики лопастного ветроколеса для двухроторного генератора средствами MatLab [Текст] / К. С. Моренко // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (г. Ставрополь, 15–18 мая 2012 года). — Ставрополь: ставропольское издательство «Параграф», 2012. — С. 53-56.

9. Моренко, К. С. Обоснование передаточного числа редуктора для двухроторного электрического генератора ветроустановки [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. — Мелітополь: ТДАТУ, 2012. — Вып. 2, Т. 4. — С. 159–164.

10. Моренко, К. С. Выбор основных параметров двухроторного генератора для ветроустановки [Текст] / К. С. Моренко // Пленарные доклады и

тезисы сообщений Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсосберегающие технологии». — М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. — С. 134–136.

11. Моренко, К. С. Использование низкокачественной электроэнергии ветроэлектростанции с двухроторным генератором [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Инновации в сельском хозяйстве. — М.: ГНУ ВИЭСХ. — 2013. — №1(3). — С. 63–65.

12. Моренко, К. С. Перспективы применения двухроторного генератора для ветроустановки с управляемым углом атаки лопасти [Текст] / К. С. Моренко // Вестник ВИЭСХ. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2013. — №2(11). — С. 71–73.

13. Моренко, К. С. Выбор факторов при планировании экспериментальных исследований ветроустановки на базе двухроторного генератора [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Донская аграрная научно-практическая конференция «Инновационные пути развития агропромышленного комплекса: задачи и перспективы»: международный сборник научных трудов // Высокоэффективные технологии и технические средства в сельском хозяйстве. — Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. — С. 159–162.

14. Моренко, К. С. Выбор типа ветроэлектрического агрегата для автономного электроснабжения фермерского хозяйства [Текст] / К. С. Моренко, С. А. Моренко // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: Сборник научных трудов ФГБОУ ВПО АЧГАА. — Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2011. — Вып. 8, Т. 1. — С. 20–24.

15. Моренко, К. С. Двухроторные электрические генераторы для ветроустановок [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Вестник аграрной науки Дона. — Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2011. — №2(14). — С. 66–73. — ISSN 2075–6704

16. Моренко, К. С. Улучшение режима работы ветроколеса ветроустановки применением двухроторного генератора [Текст] / К. С. Моренко, Г. В. Степанчук // Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК. Сборник научных трудов 8-й международной научно-практической конференции «Инновационные разработки для АПК» (28–29 марта 2013 года, г. Зерноград). — Зерноград: ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2013. — С. 203–206.

17. Пат. 2433301 Российская Федерация, МПК7 F 03 D 1/02, F 03 D 7/04. Двухроторный ветрогенератор [Текст] / Моренко К. С. ; заявитель и патентообладатель Моренко К. С. — № 2009140845/06 ; заявл. 03.11.2009 ; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. — 7 с. : ил.

ЛР 65–13 от 15.02.99. Подписано в печать  
Формат 60x84/16. Уч.–изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

РИО Азово–Черноморского инженерного института ФГБОУ ВПО  
«Донской государственной агроинженерный университет» в г. Зернограде  
347740, Зерноград, Ростовской области, ул. Советская, 15.