

На правах рукописи



Христофоров Михаил Сергеевич

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОНИЗИРОВАННОЙ
ДВУХВХОДОВОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЭ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
БИОФАБРИК АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»)

Научный
руководитель

Кашин Яков Михайлович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин.

Официальные
оппоненты:

Юдаев Игорь Викторович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологии»;

Коноплев Евгений Викторович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Применения электроэнергии в сельском хозяйстве».

Ведущая
организация:

Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (г. Зерноград)

Защита состоится «28» февраля 2022 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время сельское хозяйство в Российской Федерации развивается опережающими темпами. Растущий объем сельскохозяйственного сектора экономики требует увеличения перерабатывающих мощностей. Современные предприятия АПК требуют качественного и бесперебойного электроснабжения. Низкое качество электроснабжения приводит зачастую к массовому браку и потерям продукции. С подобными проблемами столкнулись ряд биофабрик, производящих продукцию для животноводства, находящихся вдали от генерирующих электроэнергию центров.

Актуальным экологически чистым методом решения проблем недостатка генерирующих мощностей является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). С одной стороны есть понимание, что природные ресурсы не безграничны, и ископаемые запасы топлива рано или поздно закончатся. С другой стороны, использование традиционной (невозобновляемой) энергетики приводит к все более заметным экологическим последствиям (загрязнение окружающей среды, увеличение количества углекислого газа в атмосфере, глобальное потепление и т.п.).

Разработка и исследование систем электроснабжения с фотоэлектрическими модулями, ветроэнергетическими установками и улучшения их технических характеристик для обеспечения возможности параллельной работы с центральной электросетью трехфазного переменного тока, является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» № 2.1.1.1.16-20; 2.1.2.16-20, хоздоговорной НИР № 2.45.05.01-16, заказчик ООО «ДЕФОТЕК», хоздоговорной НИР №20а/21 заказчик ООО «БИОСТИМ».

Степень разработанности темы. На данный момент имеется большое количество исследований, посвященных теме развития возобновляемой энергетики. Разработаны и существуют на рынке установки, преобразующие солнечную и ветровую энергии в электрическую. Общеизвестно, что наиболее эффективными являются гибридные солнечно-ветровые электростанции. Они позволяют добиться большей стабильности работы ввиду прерывистого и неуправляемого поступления ВИЭ. На уровне изобретений разрабо-

тан ряд генераторов и генераторных установок, позволяющих суммировать энергию ветра и солнца с одновременным преобразованием полученной суммарной энергии в электроэнергию постоянного и переменного тока. Однако, задачу работы генераторной установки на базе ВИЭ непосредственно параллельно с сетью трехфазного переменного тока разработанные конструкции напрямую не решают.

Работы в области возобновляемой энергетики, ее использования в сельском хозяйстве в РФ вызывают значительный интерес, однако ведутся, в основном, группами ученых и инженеров-энтузиастов. Работы в области использования ВИЭ для электрификации сельского хозяйства широко ведутся учеными в аграрных университетах: С.М. Воронин, Н.И. Богатырев, О.В. Григораш, Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев, Б.Х. Гайтов, М.М. Украинцев, И.В. Юдаев, В.В. Цыганов, С.К. Шерьязов.

Научная гипотеза. Применение двухвходовой генераторной установки с использованием ВИЭ, синхронизированной с трехфазной сетью центрального электроснабжения, может покрыть дефицит мощности биофабрик АПК.

Цель работы. Обоснование параметров и режимов работы синхронизированной двухвходовой генераторной установки с использованием ВИЭ для покрытия дефицита мощности биофабрик.

Задачи исследований.

1. Провести анализ источников и потребителей электроэнергии биофабрик АПК.

2. Разработать и реализовать математическую модель синхронизированной двухвходовой генераторной установки для обеспечения электроснабжения биофабрик.

3. Разработать и изготовить конструкцию двухвходовой генераторной установки, позволяющей одновременно преобразовывать световую энергию Солнца и кинетическую энергию ветра, синхронизированной с трехфазной сетью центрального электроснабжения.

4. Провести исследование синхронизированной двухвходовой генераторной установки (СДГУ) в различных режимах ее работы, используя ее математическую модель и программное обеспечение, сравнить с экспериментально полученными характеристиками.

5. Определить экономическую эффективность внедрения синхронизированной двухвходовой генераторной установки на биофабриках по производству ветеринарных препаратов.

Методы исследования базируются на теоретических основах электротехники, законах электромеханики, теории планирования эксперимента. Программное обеспечение: MATLAB Simulink, Mathcad.

Объектом исследований является: синхронизированная двухвходовая генераторная установка.

Предмет исследований: параметры и режимы работы синхронизированной двухвходовой генераторной установки, включая регулировочные, энергетические и рабочие, характеристики.

Научная новизна работы.

1. Математическая модель функционирования синхронизированной двухвходовой генераторной установки с трехфазной сетью переменного тока центрального электроснабжения для обоснования параметров и режимов работы СДГУ.

2. Обоснованные параметры и режимы работы синхронизированной двухвходовой генераторной установки.

3. Внешние и регулировочные характеристики СДГУ для проектирования генераторных установок.

Теоретическую и практическую значимость составляют:

- разработанная на уровне изобретения СДГУ позволяет осуществлять резервное электроснабжение электрооборудования предприятий АПК, а также способна работать параллельно с внешней трехфазной сетью переменного тока, а, следовательно, выступать дополнительным источником электроснабжения и поддерживать параметры выходного напряжения (амплитуду и частоту) при изменении внешних факторов (скорость ветра и интенсивность солнечного излучения) в заданных пределах;

- разработанная математическая модель СДГУ позволяет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами разработанной СДГУ, которые позволяют получить регулировочные и рабочие характеристики проектируемых СДГУ до их натурального изготовления;

- полученные рабочие характеристики СДГУ, дают возможность учитывать влияние параметров СДГУ и внешних факторов на параметры выходного напряжения установки, а также их можно использовать при проектировании генераторных установок синхронизированных с трехфазной сетью;

- полученные рабочие характеристики позволяют оценивать энергетические показатели генераторной установки при различных значениях нагрузки;

- полученные регулировочные характеристики позволяют разработать алгоритмы регулирования параметров выходного напряжения СДГУ.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Математическая модель функционирования синхронизированной двухвходовой генераторной установки с трехфазной сетью переменного тока центрального электроснабжения.

2. Экспериментально полученные внешние и регулировочные характеристики СДГУ и результаты сопоставления натурального и вычислительного экспериментов с теоретическими исследованиями.

3. Техничко -экономическое обоснование эффективности применения СДГУ для покрытия дефицита мощности биофабрики.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты исследований внедрены в ООО «Дефотек» (акт производственных испытаний от 11.05.2018 г., акт реализации от 31.05.2018 г.), заключено лицензионное соглашение с ООО «Дефотек» на продажу лицензии на изобретение (пат. РФ. № 2647708) «Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка» (договор № 12/2018 от 20.09.2018 г.), результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» в институте нефти, газа и энергетики (акт об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы от 27.04.2021 г.).

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены на IX Международной научной конференции «Технические и технологические системы ТТС-17» (22-24.11.2017, г. Краснодар), Международной конференция по актуальным вопросам машиностроения (Engineering Research / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017)), I Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (31.03.2017 г. Краснодар), II Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (31.03.2018, г. Краснодар), Международной конференция по актуальным вопросам машиностроения International Conference on Actual Issues of Mechanical

Engineering (AIME 2018 г.), X Международной научной конференции «Технические и технологические системы ТТС-19» (7.02.2019, г. Краснодар), Международной научно-технической конференции «Пром. Инжиниринг» (International Conference on Industrial Engineering Applikation and Manufacturing, ICIEAM 2019» 25-29.03.2019, г. Сочи). Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка отмечена золотой медалью XIV Международного Салона изобретений и новых технологий «Новое время», Призом Правительства (Золотым кубком) г. Севастополя (27-29.09.2018, г. Севастополь), дипломом Федеральной службы России по интеллектуальной собственности (г. Москва), золотой медалью Международной Варшавской выставки изобретений «IWIS 2018» (15-17.10.2018 г. Варшава, Польша), золотой медалью Международного конкурса инноваций и изобретений «ИПС 2018» (08.11.2018, о. Тайвань).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 2 патента на изобретения и 29 статей, в том числе 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК и 4 статьи в изданиях индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Объём и структура работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований, приведены цель работы, научная новизна, практическая значимость, и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ электроснабжения предприятий по переработке продукции АПК на основе статистических данных РЭС Юга России, который показывает в динамике ряд характерных тенденций в изменении уровня надежности электроснабжения. Увеличение потока отказов может быть вызвано следующими негативными факторами: устаревает обслуживающая техника, резко нарастает износ линий и оборудования (амортизация составляет более 70%), недостаточное финансирование и т.д.

Сегодня сельскохозяйственные предприятия активно развиваются, существующие - расширяются, что приводит к росту по-

требления электроэнергии, а так же возникают новые предприятия, которые также нуждаются в электроснабжении.

Стратегической задачей ряда биофабрик РФ является увеличение доли сухих вакцин, так как нативные препараты влекут за собой дополнительные затраты при их транспортировке и хранении, увеличивается срок хранения в 1,5 раза, гарантированно сохраняется активность. Существующий лимит электроэнергии не позволяет увеличить выпуск продукции. Например, за 12 месяцев 2017 года на Армавирской биофабрики было потреблено электроэнергии – 7346 тыс. кВт·ч, что на 10,04% больше, чем в 2016 году (6675,4 тыс. кВт·ч), в физическом выражении увеличение составило 670,6 тыс. кВт·ч, в денежном выражении 6789,3 тыс. рублей (увеличение на 18,2%, при росте цены на 7,3%). В это же время произошло увеличение выпуска продукции на 13,5%, в физическом выражении – 126,4 т. Итого: обоснованное увеличение составило порядка 662,34 тыс. кВт·ч.

Строить ТЭС небольшой мощности для электроснабжения биофабрик экономически нецелесообразно, а возводить более мощные нет смысла, в силу отсутствия рядом других крупных потребителей. Актуальным экологически чистым методом решения проблем недостатка генерирующих мощностей является использование возобновляемых источников энергии. Использование одного вида ВИЭ приводит к перебоям снабжения электроэнергией и, соответственно, к экономической неэффективности такой системы, повышению себестоимости генерируемой ею электроэнергии. Вследствие этого необходимо сооружать накопители большой мощности. Что также экономически невыгодно. Применение двухвходовой генераторной установки (поступление солнечной и ветровой энергии) с использованием ВИЭ, синхронизированной с трехфазной сетью центрального электроснабжения, может покрыть дефицит мощности биофабрик АПК.

Во второй главе представлены теоретические исследования и математическое моделирование синхронизированной двухвходовой генераторной установки для обеспечения электроснабжения биофабрик.

На основании определенных требований к электроснабжению биофабрик разработана электрическая схема синхронизированной двухвходовой генераторной установки (Рисунок 1). Принцип рабо-

ты СДГУ состоит в следующем. Вращающий момент, создаваемый ветротурбиной, вызывает вращение постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя, жестко закрепленного на валу установки. При вращении постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 2 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы неподвижного магнитопровода, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется первым многофазным двухполупериодным выпрямителем 3 и подается на основную однофазную обмотку 4 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы неподвижного магнитопровода. При этом в основной однофазная обмотка 4 создает магнитный поток.

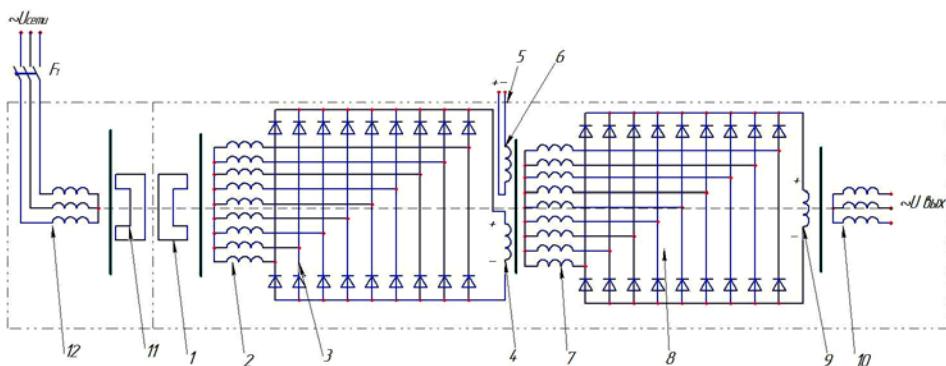


Рисунок 1 – Электрическая схема синхронизированной двухвыходовой генераторной установки

Одновременно постоянный ток (от ФЭП) протекающий по дополнительной обмотке возбуждения возбудителя 6 создает магнитный поток, направленный согласно с магнитным потоком, создаваемым основной однофазной обмоткой 4. Суммарный магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 7 якоря возбудителя и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным двухполупериодным выпрямителем 8 и подается на однофазную обмотку возбуждения 9 основного генератора. Магнитный поток однофазной обмотки 9 возбуждения основного генератора взаимодействует с трёхфазной обмоткой 10 якоря

основного генератора и наводит в ней трёхфазную систему ЭДС, которая подается в сеть.

При уменьшении (увеличении) частоты выходного напряжения, снимаемого с обмотки 10 якоря основного генератора, вызванного изменением частоты вращения вала, частота вращения магнита 11 синхронизатора уменьшается (увеличивается). Это приводит к сдвигу (опережению или запаздыванию) оси полюсов вращающегося магнитного поля обмотки 12 синхронизации по отношению к осям полюсов магнита 11 синхронизатора. Синхронизатор переходит в режим двигателя (генератора), то есть потребляет (вырабатывает) активную электроэнергию из внешней трехфазной сети. Магнитное поле, создаваемое током обмотки 12 синхронизации, создаст дополнительный вращающий момент, направленный согласно (встречно) вращению ротора. Скорость вращения ротора увеличивается (уменьшается), частота напряжения обмотки 10 якоря основного генератора, увеличивается (уменьшается) до частоты напряжения внешней трехфазной сети.

Математическая модель СДГУ приведена к двухфазной модели по осям d , q (рисунок 2) и построена в виде дифференциальных уравнений.

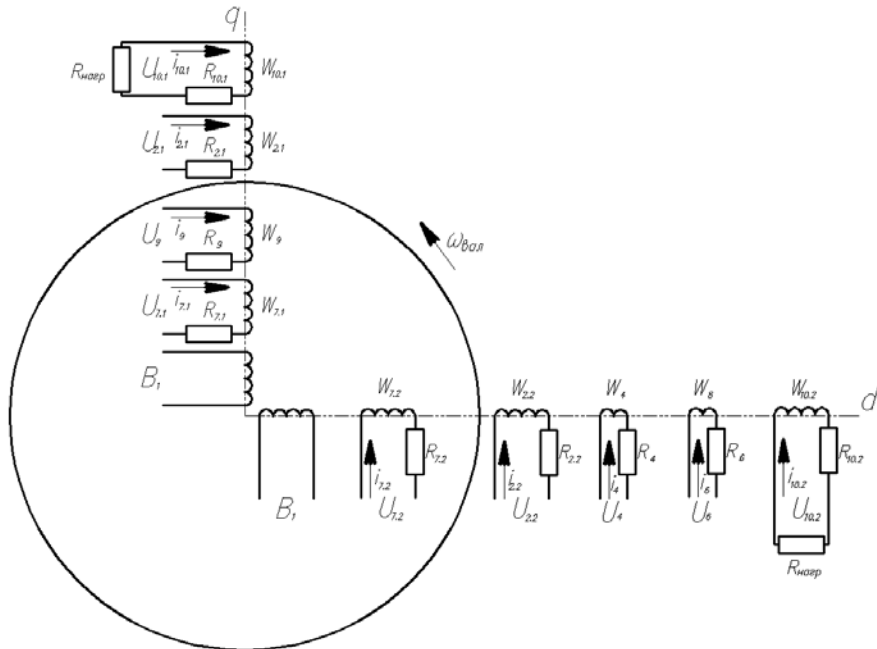


Рисунок 2 – Пространственная модель СДГУ по осям d , q

Скорость ветра в функции времени $V_d(t)$ описывается линейным уравнением:

$$V_d(t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(n_1 \cdot \omega_{вет} \cdot t) + \dots + A_n \cdot \sin(n_n \cdot \omega_{вет} \cdot t) \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая, не допускающая отрицательного значения функции $V_d(t)$, A_1, A_2, A_n – амплитудные значения 1-ой, 2-ой и последующих гармоник, $\omega_{вет}$ – угловая скорость ветроколеса, $n_1 \dots n_n$ – номер с 1-й по n -ю гармонику.

Изменение индуцируемой ЭДС e_2 в обмотке 2 якоря подвозбудителя, разложенную по осям d ($e_{2.1}(t)$) и q ($e_{2.2}(t)$). ЭДС e_2 зависит от параметров обмотки (активного сопротивления ($R_{2.1}, R_{2.2}$) и индуктивности L_2), скорости ветра и величины магнитной индукции (B_1), создаваемой постоянным многополюсным магнитом индуктора подвозбудителя 1, и изменения средневывпрямленного значения напряжения на однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя ($U_{2.1cp}(t)$), зависящего от тока ($i_{2.1}(t), i_{2.2}(t)$), протекающего по обмотке 2 и вызванного ЭДС e_2 , и потокосцепления ψ_2 ($\psi_{2.1}(t), \psi_{2.2}(t)$) многофазной обмотки 2 якоря подвозбудителя, которые определяются индуктивностью L_2 обмотки, взаимною индуктивностью M , токами, протекающими по обмоткам, расположенных на соответствующих осях описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{2.1}(t) = B_1 \cdot l_{кам2} \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t); \\ e_{2.2}(t) = B_1 \cdot l_{кам2} \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ e_{2.1}(t) = (R_{2.1} + R_{3.1}) \cdot i_{2.1}(t) + \frac{d\Psi_{2.1}(t)}{dt}; \\ e_{2.2}(t) = (R_{2.2} + R_{3.2}) \cdot i_{2.2}(t) + \frac{d\Psi_{2.2}(t)}{dt}; \\ U_{2.1}(t) = R_{2.1} \cdot i_{2.1}(t) + \frac{d\Psi_{2.1}(t)}{dt}; \\ U_{2.1cp}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |U_{2.1}(t)| dt. \end{array} \right. \quad (2)$$

где $l_{кам2}$ – длина проводника обмотки 2 якоря подвозбудителя; $R_{3.1}, R_{3.2}$ – сопротивление первого многофазного выпрямителя 3 по осям d и q ; $U_{2.1}(t)$ – значение напряжения на однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя.

Изменение индуцируемой ЭДС e_7 в обмотке 7 многофазной обмотки якоря возбuditеля, разложенную по осям d ($e_{7.1}(t)$) и q ($e_{7.2}(t)$), которая зависит от параметров обмотки (активного сопротивления R_7 и индуктивности L_7), скорости ветра V_d и потокосцепления Ψ_7 ($\Psi_{7.1}(t)$, $\Psi_{7.2}(t)$) многофазной обмотки якоря возбuditеля, и средневыпрямленного значение напряжения на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора ($U_{7.1cp}(t)$), зависящего от тока i_7 ($i_{7.1}(t)$, $i_{7.2}(t)$), протекающего по обмотке 7 и вызванного ЭДС e_7 можно определить из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{7.1}(t) = k_\mu \cdot \frac{W_7}{l_{серд7}} \cdot l_{кам7} \cdot (i_4(t) + i_6(t)) \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t); \\ e_{7.2}(t) = k_\mu \cdot \frac{W_7}{l_{серд7}} \cdot l_{кам7} \cdot (i_4(t) + i_6(t)) \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ e_{7.1}(t) = (R_{7.1} + R_{8.1}) \cdot i_{7.1}(t) + \frac{d\Psi_{7.1}(t)}{dt}; \\ e_{7.2}(t) = (R_{7.2} + R_{8.2}) \cdot i_{7.2}(t) + \frac{d\Psi_{7.2}(t)}{dt}; \\ U_{7.1}(t) = R_{7.1} \cdot i_{7.1}(t) + \frac{d\Psi_{7.1}(t)}{dt}; \\ U_{7.1cp}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |U_{7.1}(t)| dt. \end{array} \right. \quad (3)$$

где k_μ – коэффициент магнитной проницаемости; $l_{кам7}$ – длина проводника многофазной обмотки 7 якоря возбuditеля; $l_{серд7}$ – длина средней линии сердечника якоря возбuditеля; $R_{8.1}$, $R_{8.2}$ – сопротивление второго многофазного двухполупериодного выпрямителя по осям d и q ; $U_{7.1cp}(t)$ – средневыпрямленное значение напряжения на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора.

Изменения напряжения U_9 на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора, зависящего от $U_{7.1cp}$ и вызывающего ток i_9 в обмотке описывают уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_9(t) = \frac{K_B \cdot U_{7.1cp}(t)}{1 + K_D}; \\ i_9(t) = \frac{U_9(t)}{R_9}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Изменения напряжения U_4 на основной однофазной обмотке 4 возбуждения возбuditеля, зависящего от $U_{2.1cp}$ и вызывающего ток i_4 в обмотке, и напряжения U_6 на дополнительной однофазной

обмотке 6 возбуждения возбудителя в функции времени, зависящего от освещенности ФЭП и вызывающего ток i_6 в обмотке можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} U_4(t) = \frac{K_B \cdot U_{2.1cp}(t)}{1 + K_{II}}; \\ i_4(t) = \frac{U_4(t)}{R_4}; \\ U_6(t) = C_0 + C_1 \cdot \sin(n_1 \cdot \omega_c \cdot t) + \dots + C_n \cdot \sin(n_n \cdot \omega_c \cdot t); \\ i_6(t) = \frac{U_6(t)}{R_6}. \end{cases} \quad (5)$$

где K_B , K_{II} – коэффициенты выпрямления и пульсации, соответственно; C_0 – постоянная составляющая, не допускающая отрицательного значения функции $U_6(t)$; C_1 , C_2 , C_n – амплитудные значения 1-й, 2-й и последующих гармоник; ω_c – угловая частота изменения напряжения, поступающего от ФЭП.

Изменение индуцируемой ЭДС e_{10} в обмотке 10 якоря основного генератора, разложенной по осям d ($e_{10.1}(t)$) и q ($e_{10.2}(t)$), которая зависит от параметров обмотки (активного сопротивления R_{10} и индуктивности L_{10}), скорости ветра V_d и потокосцепления Ψ_{10} ($\Psi_{10.1}(t)$, $\Psi_{10.2}(t)$) обмотки якоря основного генератора отражает система уравнений.

$$\begin{cases} e_{10.1}(t) = k_\mu \cdot \frac{W_{10}}{l_{серд10}} \cdot l_{кам10} \cdot i_9(t) \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t); \\ e_{10.2}(t) = k_\mu \cdot \frac{W_{10}}{l_{серд10}} \cdot l_{кам10} \cdot i_9(t) \cdot V_d(t) \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ e_{10.1}(t) = (R_{10.1} + R_{нагр}) \cdot i_{10.1}(t) + \frac{d\Psi_{10.1}(t)}{dt}; \\ e_{10.2}(t) = (R_{10.2} + R_{нагр}) \cdot i_{10.2}(t) + \frac{d\Psi_{10.2}(t)}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

где $l_{серд10}$ – длина средней линии сердечника катушки якоря основного генератора; $l_{кат7}$ – длина проводника катушки якоря основного генератора; $R_{нагр}$ – сопротивление нагрузки.

Потокосцепления, описанные в системах уравнений 1-6, формируются токами обмотки якоря подвозбудителя, обмоток якоря возбудителя и обмоток якоря основного генератора определяются с помощью системы уравнений потокосцеплений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{2.1} = L_2 \cdot i_{2.1} + M \cdot i_{7.1} + M \cdot i_9 + M \cdot i_{10.1} + B_1 \cdot S_1; \\ \Psi_{2.2} = L_2 \cdot i_{2.2} + M \cdot i_4 + M \cdot i_6 + M \cdot i_{7.2} + M \cdot i_{10.2} + B_1 \cdot S_1; \\ \Psi_{7.1} = L_7 \cdot i_{7.1} + M \cdot i_{2.1} + M \cdot i_9 + M \cdot i_{10.1} + B_1 \cdot S_1; \\ \Psi_{7.2} = L_7 \cdot i_{7.2} + M \cdot i_{2.2} + M \cdot i_4 + M \cdot i_6 + M \cdot i_{10.2} + B_1 \cdot S_1; \\ \Psi_{10.1} = L_{10} \cdot i_{10.1} + M \cdot i_{10.1} + M \cdot i_{7.1} + M \cdot i_9 + B_1 \cdot S_1; \\ \Psi_{10.2} = L_{10} \cdot i_{10.2} + M \cdot i_{2.2} + M \cdot i_4 + M \cdot i_6 + M \cdot i_{10.2} + B_1 \cdot S_1. \end{array} \right. \quad (7)$$

где L_2, L_7, L_{10} – индуктивности обмотки якоря подвозбудителя, обмоток якоря возбудителя и обмоток якоря основного генератора; S_1 – площадь сечения постоянного многополюсного магнита индуктора подвозбудителя 1.

Изменения моментов (электромагнитного, сопротивления, синхронизирующих), параметров сети, токов, протекающих по обмоткам СДГУ, описывается системой уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{вет}(t) = \frac{\xi \cdot d_{вк}^3}{4,16} \cdot V_{вет}^2(t); \\ M_{вет.ном}(t) = \frac{\xi \cdot d_{вк}^3}{4,16} \cdot V_{вет.ном}^2; \\ M_{син}(t) = M_{возм}(t) = M_{вет}(t) - M_{вет.ном}; \\ M_{син.мах}(t); t \in (0; 5T); \\ M_{син.1}(t) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{E_{ЭТК} \cdot U_c}{X_{ЭТК}} \cdot \cos(\theta(t)); \\ M_{син.1расч}(t) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{E_{ЭТК} \cdot U_c}{X_{ЭТК}} \cdot \cos(60^\circ); \\ M_{син.М2расч} \geq M_{син.мах}(t) - M_{син.1расч}(t); \\ M_{ЭМ}(t) = \frac{m}{3} \cdot \left[M_2 \cdot i_{2.2}(t) \cdot B_1 \cdot \sin(\omega_{вал}(t) \cdot t) + M_7 \cdot (i_4(t) + \right. \\ \left. + i_6(t)) \cdot i_{7.2}(t) + M_{10} \cdot i_9 \cdot i_{10.2}(t) \right]; \\ M_{сопр}(t) = M_{сопр.Σ}(t); \\ M_{Д}(t) = \frac{1}{p} \cdot j_{суст} \cdot \frac{d\omega_{вал}(t)}{dt}. \end{array} \right. \quad (8)$$

где $M_{вет}(t)$ – крутящий момент ветра в функции времени; ξ – коэффициент использования энергии ветра; $d_{вк}$ – диаметр ветроколеса; $M_{в.ном}$ – номинальный крутящий момента ветра (принятый при данных типоразмерах машины и $V_{в.ном}=5,23$ м/с); $M_{сопрот}(t) = M_{сопротΣ}(t) - M_{сопр}(t)$ – момент сопротивления ДГУ; $M_{син}(t)=M_{возм}(t)$ – момент «возмущения» от ветра (в функции времени); $\Theta(t)$ – угол нагрузки (при расчете принят равным 60°); U_c – напряжение внешней сети;

$X_{\text{ЭТК}}$ – индуктивное сопротивление СДГУ; $M_{\text{ЭМ}}(t)$ – электромагнитный момент, учитывающий процессы электромагнитного взаимодействия, протекающие в подвозбудителе, возбудителе и основном генераторе; $M_{\text{сопр}}(t)$ – момент сопротивления установки, учитывающий момент сопротивления ДГУ, момент сопротивления M_2 (синхронизатора) и сил трения в движущих частях установки; $M_{\text{д}}(t)$ – динамический момент СДГУ; $J_{\text{сист.}}$ – момент инерции СДГУ.

Программа расчета, разработанная в среде «Mathcad», позволяет рассчитать переходные процессы в СДГУ с получением картины этих процессов, определить функциональные зависимости между выходными параметрами СДГУ и внешними факторами, а также функциональные зависимости между выходными параметрами СДГУ и параметрами СДГУ (рисунок 3). Причем, при исследовании рассмотрены режимы работы установки без синхронизатора и с синхронизатором.

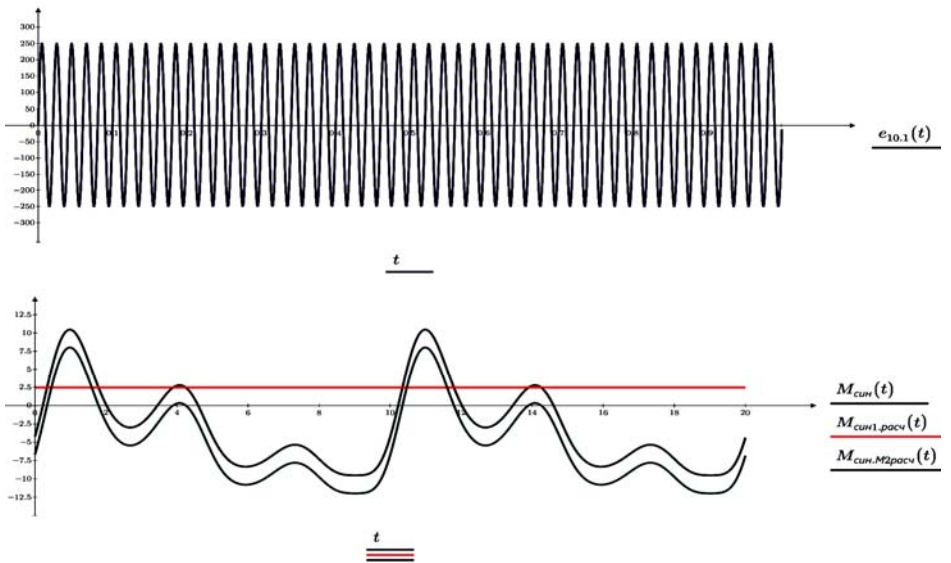


Рисунок 3 – Скриншоты зависимостей $e_{10.1} = \varphi(t)$; $M_{\text{син}} = \varphi(t)$; $M_{\text{син1.расч}} = \varphi(t)$; $M_{\text{син2.расч}} = \varphi(t)$ при переменном ветре с синхронизатором (на рис. по осям абсцисс указано время (t) в сек., по осям ординат указаны ЭДС ($e_{10.1}$) - в В, моменты $M_{\text{син}}$, $M_{\text{син1.расч}}$, $M_{\text{син2.расч}}$ - в Нм)

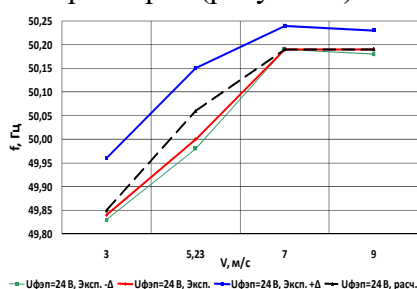
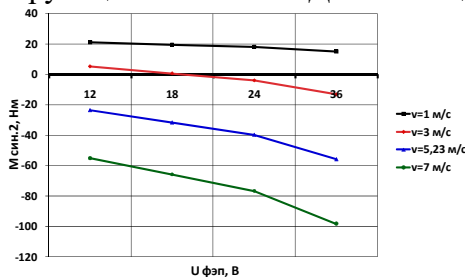
Моделирование СДГУ показало, что при постоянной скорости ветра (5,23 м/с) и постоянном напряжении на зажимах ФЭП

(24 В) электромагнитный момент $M_{эм}$ содержит экспоненциальную составляющую (диапазон изменения $M_{эм}$ составляет от 1,3 Нм до 15,2 Нм). Установлено что для стабилизации напряжения необходим синхронизатор, диапазон изменения момента, который нужно досинхронизировать, составляет от 5 Нм до 12 Нм.

Определены номинальные входные параметры СДГУ мощностью 3 кВт (скорость ветра, 5,23 м/с и напряжение на выходе ФЭП, 24 В).

В третьей главе проведены экспериментальные исследования, которые состоят из двух этапов: вычислительный эксперимент, исследование натурального образца.

Определены показатели планирования эксперимента объекта исследования. По полученным значениям целевых функций построена квадратичная модель. По результатам расчетов получены регулировочные характеристики зависимости вращающего и синхронизирующих моментов СДГУ от входных параметров (рисунок 4).



а) Зависимость $M_{син} = U_{ФЭП}(t)$ СДГУ при изменении скорости ветра

б) Зависимость $f_{вых} = V_B$ при напряжении на выходе ФЭП 24 В

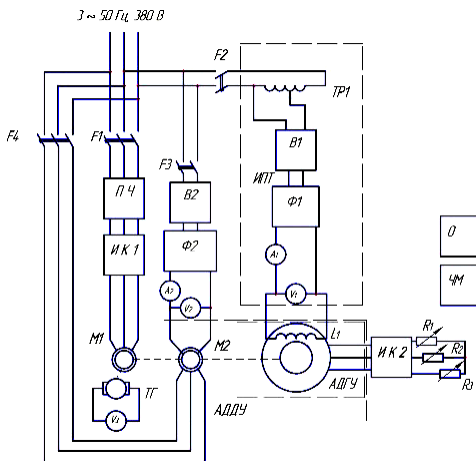
Рисунок 4 – Регулировочные характеристики СДГУ

Наибольшее влияние на величины целевых функций $U_{вых}$ (величина выходного напряжения СДГУ) и $f_{вых}$ (величины частоты выходного напряжения СДГУ), оказывают величины скорости ветра V_B и величина напряжение на выходе ФЭП $U_{ФЭП}$. Частота выходного напряжения СДГУ зависит от скорости ветра и не зависит от напряжения на выходе ФЭП. На величину выходного напряжения СДГУ наибольшее влияние из входных параметров оказывает скорость ветра. В целях подтверждения основных теоретических положений проведено экспериментальное исследование натурального

образца мощностью 3 кВт с записью регулировочных и внешних характеристик (рисунок 5).



а) Фото лабораторного стенда



б) Принципиальная электрическая схема

Рисунок 5 – Лабораторный стенд для экспериментальных исследований СДГУ мощностью 3 кВт

Адекватность математической модели и результатов математического экспериментов оценивалось с применением программного комплекса «Statistica». Величины Δ получены из программного комплекса «Statistica» как допустимые отклонения искомой величины (экспериментальные кривые – сплошные линии красного цвета). Как видно из рисунков расчетные кривые находятся в допустимом «коридоре» погрешности (рисунок 6).

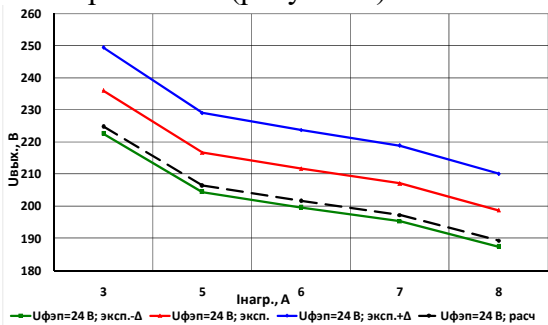


Рисунок 6 - Зависимости действующего значения установленного выходного напряжения СДГУ от тока нагрузки при напряжении на выходе ФЭП 24 В, полученные в ходе вычислительного эксперимента и эксперимента на натурном образце

Наложение графиков натурального эксперимента и математического эксперимента показывают, что отклонение результатов математического эксперимента от натурального находится в пределах 5%.

В четвертой главе приведены анализ ущерба от прерываний электроснабжения, возможности наращивания объемов производства и расчет экономической эффективности применения СДГУ на биофабрике по производству ветеринарных препаратов. Стоимость инвестиций в создание генерирующих мощностей на базе СДГУ можно значительно уменьшить за счет отказа от силовых преобразователей в системе электроснабжения. Дополнительный эффект также получен за счет снижения ущербов от перерывов электроснабжения предприятия. Чисто дисконтированный доход за 5 лет составил 1246 тыс. рублей, что значительно выше в сравнении со случаем применения ДЭС – 83 тыс. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Анализ источников и потребителей электроэнергии биофабрик по производству ветеринарных препаратов показал, что биофабрики имеют необходимость в наращивании объемов производства продукции и дефицит генерирующих мощностей, что приводит к экономическому ущербу порядка 2,5 млн. руб.

2. Разработана математическая модель синхронизированной двухвходовой генераторной установки (СДГУ) на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электро-механические процессы в СДГУ, которая позволяет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами СДГУ. Величина выходного напряжения СДГУ пропорциональна скорости ветра в степени 2,5.

3. Результаты математической модели показали необходимость применения синхронизатора напряжения для получения на выходе СДГУ синусоидального выходного напряжения и создания синхронизирующего момента. Диапазон изменения момента синхронизации составляет от 0,1 Нм до 5,8 Нм (при изменении скорости ветра от 0,3 м/с до 9 м/с). Величина мощности синхронизатора напряжения СДГУ должна составлять 0,525 кВт.

4. Разработана конструкция синхронизированной двухвходовой генераторной установки, позволяющей одновременно преобразовывать световую энергию Солнца и кинетическую энергию ветра с синхронизацией этой установки с трехфазной сетью центрального электроснабжения. Определены сопротивления обмоток СДГУ: сопротивление обмотки якоря подвозбудителя ($R_2 = 0,95 \text{ Ом}$), сопротивление основной обмотки возбуждения возбудителя ($R_4 = 210 \text{ Ом}$), сопротивление дополнительной обмотки возбуждения возбудителя ($R_6 = 5 \text{ Ом}$) сопротивление обмотки якоря возбудителя ($R_7 = 0,95 \text{ Ом}$), сопротивление обмотки возбуждения основного генератора ($R_9 = 120 \text{ Ом}$), сопротивление обмотки якоря основного генератора ($R_{10} = 112 \text{ Ом}$).

5. Экспериментально подтверждена работоспособность СДГУ, позволяющей поддерживать параметры выходного напряжения установки (амплитуду и частоту) при изменении входных параметров (скорость ветра изменяется в диапазоне 3 - 9 м/с, интенсивность солнечного излучения – напряжение на зажимах ФЭП изменяется в диапазоне 12-36 В) в заданных пределах (отклонение амплитуды напряжения не более 4,5 %, отклонение частоты напряжения – не более 0,15 Гц).

6. Получены внешние и регулировочные характеристики СДГУ, которые позволяют учитывать влияние параметров СДГУ (активные сопротивления обмоток) и внешних факторов (скорость ветра и интенсивность солнечного излучения) на параметры выходного напряжения установки (амплитуда и частота выходного напряжения) для поддержания этих параметров в заданных пределах. Полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность при этом составляет до 5%.

7. Создание генерирующих мощностей на базе СДГУ позволят уменьшить стоимость инвестиций в создание генерирующих мощностей на базе ВИЭ за счет отказа от силовых преобразователей в системе и получить поступление денежных средств выраженный в чисто дисконтированном доходе 1246 тыс. рублей за 5 лет. Использование СДГУ для устранения дефицита мощностей биофабрики обеспечит снижение технологического ущерба, что приведет к годовому доходу в 3423 тыс. рублей, срок окупаемости 4,16 года.

Рекомендации производству

При изготовлении СДГУ рекомендуется применять высокоэффективный способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин (патент РФ №2475924), при котором согласно технологии полностью отсутствуют отходы электротехнической стали, за исключением неизбежной вырубке паза. При использовании СДГУ необходимо провести предварительные расчеты для оценки дефицита необходимой мощности.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Используя теоретические и экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований, можно разработать математическую модель установок для суммирования двух других разнородных ВИЭ (например, мини ГЭС и ФЭП). Отдельного рассмотрения требуют вопросы разработки структурно-схемных решений управления параметрами СДГУ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях индексируемых в Scopus и Web of Science

1. Khristoforov , M.S. Wind-solar generator. / L.E. Kopelevich, B.K. Gaytov, A.Ya. Kashin et. al./ AER-Advances in Engineering Research // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME) – 2017. – V.133. – pp. 343-349.

2. Khristoforov, M.S. Experimental characterization of synchronized axial two-input generator set / B.K. Gaitov, Ya.M. Kashin, M.S. Khristoforov // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. - 2019. - pp. 8742973.

3. Khristoforov , M.S. Promising converters of wind and solar energy into electric energy for electrotechnical complexes / Y.M . Kashin , A.V. Samorodov , M.S. Khristoforov et. al. // Proceedings of the international conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018).-2018.- V.157. - pp. 255-261.

4. Khristoforov, M.S. The correlation of parameters and characteristics of the axial two-input electric machine-generator / Ya.M. Kashin, A.V. Samorodov, M.S. Khristoforov et. al./ IPDME 2018 - Materials Science and

- в изданиях рекомендованных ВАК:

5. Христофоров, М.С. Характеристики синхронизированной двухвходовой генераторной установки / Я.М. Кашин, А.М. Квон, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, М.С. Христофоров // «Сельский механизатор» . - 2019. - № 8. – С. 34-35.

6. Христофоров, М.С. Ветросолнечная двухвходовая генераторная установка / Я.М. Кашин, А.М. Квон, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, М.С. Христофоров // «Сельский механизатор». - 2019. - № 7. – С. 32-34.

7. Христофоров, М.С. Анализ вопросов электроснабжения предприятий АПК на примере федерального казенного предприятия «Армавирская биофабрика» / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е., Копелевич, А.В. Самородов, М.С. Христофоров // Научный журнал «Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки». - 2019. - Вып. 4 (251). – С. 91-98.

8. Христофоров, М.С. Математическое моделирование электротехнического комплекса, преобразующего энергии ветра и Солнца / Я.М. Кашин, А. С. Князев, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов, М. С. Христофоров // Энергосбережение и водоподготовка. - 2018. - № 6 (116) . - С. 27-32

9. Христофоров, М.С. К вопросу расчета синхронных электрических машин для ветро-солнечных генераторных установок / Б. Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А. С. Князев, А. Я. Кашин, А. В. Самородов, Л. Е. Копелевич, М. С. Христофоров // Научный журнал «Наука Кубани». - 2018. - № 1. – С. 37-43.

10. Христофоров, М.С. Электротехнический комплекс на базе синхронизированной аксиальной двухвходовой генераторной установки – эффективное средство использования возобновляемых источников энергии и повышения надежности электроснабжения объектов / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, М. С. Христофоров // «Электропитание», 2018. № 3. – С. 46-57.

11. Христофоров, М.С. Конструкции перспективных аксиальных генераторов и генераторных установок для систем автономного электроснабжения объектов добычи нефти / Кашин Я.М., Самородов А.В., Шкода В.В., Христофоров М.С., Вострикова М.А. // Вест-

ник Российской академии естественных наук. Т. 5: М.: изд-во Московский филиал ЦПУ «Радуга». 2017. С. 100-105.

12. Христофоров, М.С. Результаты исследования эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с обмоткой возбуждения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, М.С. Христофоров // «Энергосбережение и водоподготовка». - 2017. – № 5 (109) . - С. 47-52.

13. Христофоров, М.С. Экспериментальные исследования двухвходовой генераторной установки / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким, И.А. Горбунов, М.С. Христофоров // Электронный политематический журнал «Научные труды КубГТУ» . - № 1. - С. 143-155.

- в прочих изданиях:

14. Пат. RU №2655379, МПК H02K 19/38, H02K 16/00, H02K 7/18, H02K 21/38, Синхронизированный аксиальный двухвходовой бесконтактный ветро-солнечный генератор. [Текст] / М.С. Христофоров, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов (РФ) – № 2017113228; Заявл. 17.04.2017; Оpubл. 28.05.2018; Бюл. № 16 – 16 с.

15. Пат. RU №2647708, МПК H02K 19/38, H02K 19/34, F03D 9/00, Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка. [Текст] / М.С. Христофоров, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов (РФ) – № 2017113229; Заявл. 17.04.2017; Оpubл. 19.03.2018; Бюл. № 8 – 16 с.

16. Христофоров, М.С. Структура электротехнического комплекса на базе синхронизированной аксиальной двухвходовой генераторной установки / Я.М. Кашин, М. С. Христофоров, А.В. Войнов // Матер. X Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-19» 7-9 февраля. – Краснодар 2019. - С. 25-28.

17. Христофоров, М.С. Анализ конструкций преобразователей световой энергии солнца и кинетической энергии ветра в электроэнергию / Матер. IX Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-17» 22-24 ноября. - Краснодар 2017. - С. 11-17.

18. Христофоров, М.С. Использование двухвходовой генераторной установки для преобразования энергии ветра и Солнца с целью электроснабжения локальных маломощных объектов нефтегазовой отрасли / Я.М. Кашин, В.А. Ким, М.С. Христофоров, А.А. Шаршак // Сб. статей второй межд. науч.-практ. конф. «Булатовские чтения». - Краснодар 2018. - т. 6. - С. 197-201.

19. Христофоров, М.С. Методика исследования температурного поля двухвходовых электрических машин / Б.Х. Гайтов, Т.Б. Гайтова, С.П. Киселев, М.С. Христофоров // Сб. статей материалов I Междунар. научн.-практ. конф. «Булатовские чтения» 31 марта. - Краснодар 2017. - т. 5. - с. 30-37.

20. Христофоров, М.С. Перспективная конструкция бесконтактного ветро-солнечного генератора / М.С. Христофоров, К.С. Христофорова // Сб. статей второй между. науч.-практ. конф. «Булатовские чтения». - Краснодар 2018. - т. 6.- С. 246-247.

21. Христофоров, М.С. Перспективы применения ветро-солнечных установок в Краснодарском крае / Матер. X Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-19» 7-9 февраля. - Краснодар 2019. - С. 28-32.

22. Христофоров, М.С. Перспективы применения ветро-солнечных установок для снижения ущерба от перерывов в электроснабжении на Армавирской биофабрике / Матер. X Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-19» 7-9 февраля. - Краснодар 2019. - С. 71-74.

23. Христофоров, М.С. Расчет синхронного генератора с постоянными магнитами для ветроэнергетической установки / А.В. Самородов, М.С. Христофоров, Д.О. Умрихин, А.А. Шаршак // Матер. IX Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-17» 22-24 ноября. – Краснодар 2017. - С. 72-76.

24. Христофоров, М.С. Регулируемые характеристики ветро-солнечного генератора для электроснабжения объектов нефтегазовой отрасли / Б.Х. Гайтов, К.З. Артеян, М.С. Христофоров, А.А. Шаршак // Сб. статей второй между. науч.-практ. конф. «Булатовские чтения» . - Краснодар 2018. - т. 6. - С. 131-133.

25. Христофоров, М.С. Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка и результаты ее математического моделирования / Б.Х. Гайтов, М. С. Христофоров // Матер. X Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-19» 7-9 февраля. - г. Краснодар 2019. - С. 62-67.

26. Христофоров, М.С. Способы синхронизации ветро-солнечного генератора / А.В. Самородов, Я.М. Кашин, М.С. Христофоров // Матер. IX Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-17» 22-24 ноября. - Краснодар 2017. - С. 63-72.

27. Христофоров, М.С. Способы синхронизации ветро-солнечных генераторов для электроснабжения локальных объектов нефтегазовой отрасли / А.В. Самородов, В.А. Ким, М.С. Христофоров // Сб. статей второй межд. науч.-практ. конф. «Булатовские чтения». - Краснодар 2018. - т. 6. - С. 233-235.

28. Христофоров, М.С. Характеристики электротехнического комплекса на базе ветро-солнечного генератора / Л.Е. Копелевич, М.С. Христофоров, В.А. Ким // Матер. IX Междунар. научн. конф. «Технические и технологические системы ТТС-17» 22-24 ноября. - Краснодар 2017. - С. 35-39.

29. Христофоров, М.С. Обеспечение энергетической безопасности сепараторного цеха биологического производства / В.А. Ким, Я.М. Кашин, М.С. Христофоров // Всероссийская научная конференция Наука, технологии, общество – НТО 2021.- Красноярск 2021.- С. 53-58.

30. Христофоров, М.С. Перспективные резервные источники питания для агропромышленного комплекса на базе возобновляемых источников энергии / Б.Х. Гайтов, Самородов А.В., М.С. Христофоров // Матер. шестой Всеросс. научн. конф. «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки» «ВРНК-20» 19-21.11.2020. - Краснодар. - 2020. - С. 14-16.

31. Христофоров, М.С. Обеспечение энергетической безопасности биологических производств / М.С. Христофоров // В сб. матер. Межд. научн.-практ. конф. «Научные основы производства и обеспечения качества биологических препаратов», посвященной 100-летию Армавирской биофабрики. Армавир, 2021. С. 383-389.

Подписано к печати
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1
Тираж 100 экз.

Формат 60×84 ¹/₁₆
Офсетная печать
Заказ № 16

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350044, Краснодар, пр. Чекистов 20