

А.В. МАХИЯНОВ, ассистент кафедры ЭЭП (УГНТУ)  
Научный руководитель Р.Р. САТТАРОВ, проф., д.т.н., доцент (УГНТУ)  
г. Уфа

**АЭРОСТАТНО-ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ:  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА**

**Аннотация.** Современная ветроэнергетика характеризуется постоянным поиском инновационных технических решений, направленных на повышение эффективности преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию. Аэростатно-ветроэнергетические установки представляют собой перспективное направление развития возобновляемой энергетики, объединяющее преимущества традиционных ветроустановок с возможностями высотного размещения генерирующих модулей. Данная статья рассматривает технические аспекты создания и функционирования аэростатно-ветроэнергетических систем, обеспечивающих стабильную выработку электроэнергии в расширенном диапазоне ветровых скоростей. Особое внимание уделяется анализу конструктивных особенностей установок, включающих многофазные генераторы и интеллектуальные системы управления, позволяющие адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям и обеспечивать максимальную энергетическую отдачу при различных режимах эксплуатации.

**Ключевые слова:** аэростатно-ветроэнергетические установки, высотная ветроэнергетика, многофазные генераторы, системы управления, возобновляемые источники энергии.

Развитие современных технологий в области возобновляемой энергетики неразрывно связано с созданием инновационных технических решений, способных обеспечить эффективное преобразование природных энергетических ресурсов в электрическую энергию. Ветроэнергетика, являясь одной из наиболее динамично развивающихся отраслей альтернативной энергетики, постоянно сталкивается с вызовами, связанными с непостоянством ветровых условий, ограничениями по высоте размещения турбин и необходимостью обеспечения стабильного энергоснабжения потребителей [1].

Аэростатно-ветроэнергетические установки представляют собой революционное направление в области ветроэнергетики, которое позволяет преодолеть основные ограничения традиционных наземных ветроустановок пу-

тем размещения генерирующих модулей на значительных высотах с использованием воздухоплавательных технологий. Этот подход открывает новые возможности для использования высотных ветровых потоков, характеризующихся большей стабильностью и интенсивностью по сравнению с приземными воздушными массами.

Принципиальная конструкция аэростатно-ветроэнергетической установки включает воздухоплавательный модуль, выполняющий функцию несущей платформы для размещения ветросиловых блоков, которые содержат ветроколеса, планетарные мультипликаторы, синхронные генераторы с постоянными магнитами и выпрямители (рисунок 1) [2]. Воздухоплавательный модуль обеспечивает подъем всей системы на заданную высоту и поддержание ее стабильного положения в воздушном пространстве благодаря системе тросов и наземного причально-поворотного узла. Такая конфигурация позволяет эффективно использовать энергию ветровых потоков на высотах от нескольких сотен до тысячи метров, где скорость ветра может превышать приземные показатели в несколько раз.

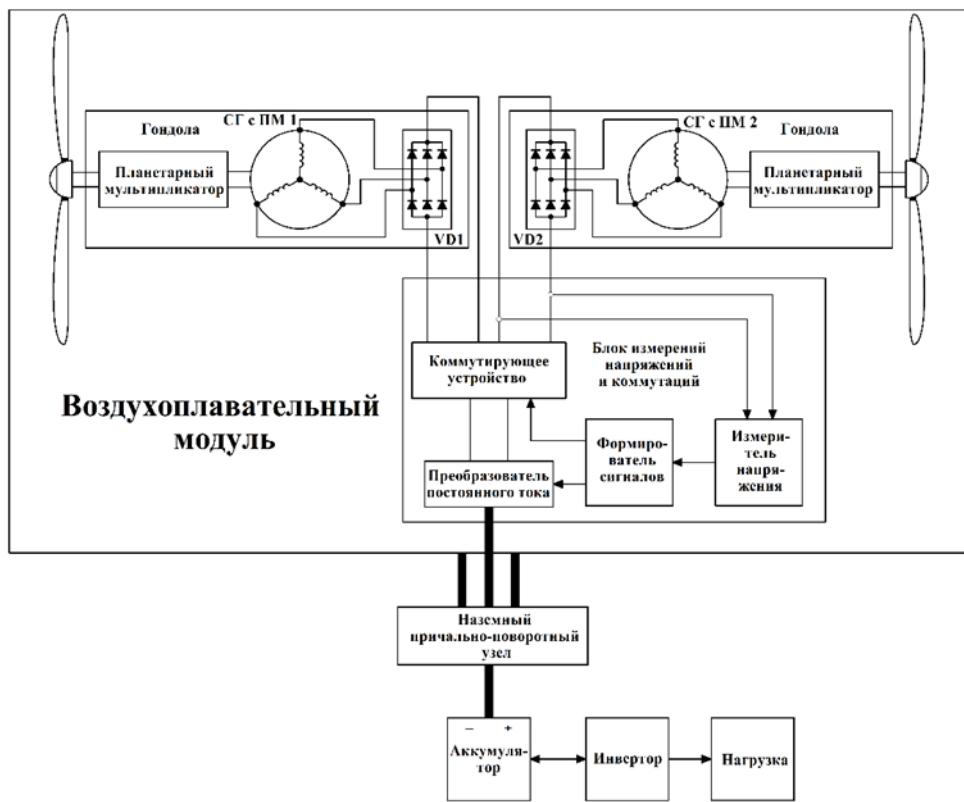


Рис. 1. Структурная схема аэростатно-ветроэнергетического устройства [2]

Одной из ключевых особенностей аэростатно-ветроэнергетических установок является их способность обеспечивать стабильную выработку

электроэнергии в расширенном диапазоне ветровых скоростей. Это достигается благодаря использованию интеллектуальных систем управления, включающих коммутирующие устройства, преобразователи постоянного тока, измерители напряжения и формирователи сигналов. При нормальных ветровых условиях система автоматически подключает генераторы в последовательном режиме, обеспечивая удвоенное напряжение при сохранении нормального тока. При увеличении скорости ветра выше расчетных значений происходит автоматическое переключение на параллельное соединение генераторов, что позволяет поддерживать нормальное напряжение при увеличенном токе и мощности.

Технические преимущества двухгенераторных систем становятся особенно очевидными при анализе их работы в различных ветровых условиях. В условиях низких скоростей ветра последовательное соединение генераторов позволяет достичь требуемого уровня напряжения для эффективной зарядки аккумуляторных батарей и питания нагрузки. При высоких скоростях ветра параллельное соединение обеспечивает безопасную работу системы, предотвращая перенапряжения и максимизируя выработку электроэнергии [3].

Дальнейшее развитие аэростатно-ветроэнергетических технологий связано с внедрением многофазных генераторов, обеспечивающих еще большую стабильность выходных параметров и снижение пульсаций напряжения. Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором представляет собой следующий этап эволюции данной технологии, позволяя добиться практически синусоидальной формы выходного напряжения и минимизировать влияние высших гармоник на работу потребителей.

Системы управления современных аэростатно-ветроэнергетических установок характеризуются высоким уровнем автоматизации и интеллектуальности. Блок измерений напряжений и коммутаций постоянно мониторит параметры работы генераторов и в режиме реального времени принимает решения о необходимости переключения между различными режимами работы [4]. Формирователь сигналов анализирует данные от измерителей напряжения и формирует управляющие воздействия для коммутирующих устройств, обеспечивая плавное и безаварийное переключение между режимами работы.

Процесс функционирования аэростатно-ветроэнергетической установки характеризуется высокой степенью адаптивности к изменяющимся внешним условиям. Воздухоплавательный модуль автоматически ориентируется по направлению преобладающего ветра, обеспечивая оптимальное позиционирование ветроколес для максимального улавливания энергии воздушного потока. Планетарные мультипликаторы обеспечивают необходимое увеличение частоты вращения для эффективной работы синхронных генераторов с посто-

янными магнитами, которые преобразуют механическую энергию в электрическую.

Эффективность компьютерного моделирования ветроустановок на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований [5, 6]. Современные программные комплексы позволяют оптимизировать конструктивные параметры установок, прогнозировать их поведение в различных эксплуатационных условиях и разрабатывать эффективные алгоритмы управления. Моделирование электромагнитных процессов в многофазных генераторах позволяет минимизировать потери энергии и максимизировать коэффициент полезного действия всей системы.

Экологические преимущества аэростатно-ветроэнергетических установок проявляются не только в отсутствии выбросов загрязняющих веществ в процессе эксплуатации, но и в минимальном воздействии на окружающую среду. Высотное размещение генерирующих модулей исключает шумовое воздействие на жилые районы, а отсутствие массивных наземных конструкций минимизирует нарушение естественных ландшафтов.

Экономическая эффективность аэростатно-ветроэнергетических установок определяется несколькими факторами, включая снижение капитальных затрат на строительство массивных опорных конструкций, возможность размещения в районах с оптимальными ветровыми условиями независимо от рельефа местности, а также повышенную выработку электроэнергии благодаря использованию более интенсивных высотных ветровых потоков. Мобильность таких установок позволяет оперативно перемещать их в зоны с наиболее благоприятными погодными условиями или использовать для аварийного энергоснабжения в чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, аэростатно-ветроэнергетические установки представляют собой перспективное направление развития возобновляемой энергетики, объединяющее преимущества традиционных ветроэнергетических технологий с инновационными решениями в области воздухоплавания и систем управления. Их внедрение способствует повышению эффективности использования ветровых ресурсов, расширению географии применения ветроэнергетических технологий и созданию более устойчивых и экологически чистых энергетических систем. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию высокоэффективных энергетических комплексов нового поколения, способных обеспечить надежное и экономически выгодное энергоснабжение в различных климатических и географических условиях.

---

**Список литературы:**

1. Патент № 2639419 С1 Российская Федерация, МПК F03D 5/00, F03D 7/00, F03D 9/30. Аэростатно-привязная ветротурбина : № 2017100161 : заявл. 10.01.2017 : опубл. 21.12.2017 / А. В. Губанов.

2. Патент на полезную модель № 227868 У1 Российская Федерация, МПК H02P 9/10, F03D 9/30. Аэростатно-ветроэнергетическое устройство : № 2024104806 : заявл. 26.02.2024 : опубл. 07.08.2024 / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов, И. И. Балгазин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

3. Патент на полезную модель № 230315 У1 Российская Федерация, МПК F03D 9/30, F03D 3/00, F03D 7/06. Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором : № 2024109988 : заявл. 11.04.2024 : опубл. 26.11.2024 / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

4. Патент на полезную модель № 219734 У1 Российская Федерация, МПК H02P 9/00. Ветроэнергетическое двухгенераторное устройство для выработки электроэнергии в расширенном диапазоне ветровых скоростей : № 2023105593 : заявл. 09.03.2023 : опубл. 02.08.2023 / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов, А. А. Евдокимов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

5. Саттаров, Р. Р. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов, С. О. Миниахметова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 28-37. – DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37.

6. Sattarov, R. Twin-Generator Reconfigurable Set for Wind Power Plant / R. Sattarov, A. Makhiyanov // Proceedings 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, 29 сентября – 01 2023 года. – Magnitogorsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. – Р. 145-149.

**Информация об авторах:**

Махиянов Артур Валерьевич, ассистент кафедры ЭЭП, УГНТУ, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, artur.makhiyanov.sems510@mail.ru