

УДК 621.548:621.313.3

С. Д. Уметалиев samat_akilov@mail.ru

КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ВЕТРОТУРБИН

Аннотация. В статье выполнен инженерно-аналитический обзор применяемых и перспективных ветроэнергетических установок. Материал систематизирован по типу оси вращения, аэродинамическому принципу работы ротора, виду электрогенератора, схеме силового преобразования, способу стабилизации частоты и условиям монтажа. Показано, что выбор конструкции ВЭУ должен выполняться не изолированно по диаметру ротора или номинальной мощности, а с учетом ветрового режима площадки, механических потерь, требований к управлению, обслуживанию и электрическому согласованию с нагрузкой. В работе уточнены расчетные зависимости для мощности, быстроходности, частоты вращения, крутящего момента и предварительной геометрии лопасти. Для вертикально-осевых установок отдельно рассмотрена магнитная разгрузка как способ уменьшения осевой нагрузки на опоры, стартового момента и механической составляющей шума.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, ветроколесо, электрогенератор, быстроходность, стабилизация частоты, силовой преобразователь, вертикальная ось, магнитная разгрузка, магнитный подшипник.

Введение

Ветроэнергетическая установка представляет собой не отдельную механическую машину, а совокупность взаимосвязанных узлов. Лопасти преобразуют энергию воздушного потока во вращающий момент, вал и опоры передают нагрузку, генератор вырабатывает электрическую энергию, а преобразовательная и управляющая аппаратура доводит параметры энергии до требований потребителя или сети. Поэтому фактическая эффективность ВЭУ определяется не только размерами ротора, но и согласованностью аэродинамики, электромеханики, силовой электроники и монтажных решений.

На практике на годовую выработку одновременно влияют средняя скорость ветра, высота установки, турбулентность, профиль и число лопастей, тип генератора, алгоритм регулирования, качество балансировки, защита от аварийных режимов и доступность технического обслуживания. Неправильный выбор хотя бы одного из этих элементов может снизить энергетический эффект даже при достаточно благоприятном ветровом потенциале.

По направлению оси вращения ветровые турбины принято делить на горизонтально-осевые и вертикально-осевые. Горизонтальная компоновка доминирует в промышленной энергетике благодаря высокому коэффициенту мощности и хорошей масштабируемости. Вертикальная схема обычно имеет меньший максимальный КПД, но сохраняет интерес для автономного электроснабжения, учебных стендов, малых объектов и площадок с переменным направлением ветра, поскольку воспринимает поток со всех направлений и допускает размещение генератора у основания конструкции.

Целью настоящей статьи является систематизация конструктивных решений, существующих ветротурбин, сопоставление генераторных схем и способов стабилизации частоты, уточнение базовых расчетных зависимостей, а также определение области рационального применения магнитной разгрузки в малых вертикально-осевых ВЭУ.

Критерии анализа и научно-практическая задача обзора

Статья относится к аналитическому инженерному обзору с элементами прикладного расчета. В качестве объектов рассмотрения выбраны горизонтально-осевые и вертикально-осевые ВЭУ, а также наиболее распространенные генераторные схемы: коллекторные машины постоянного тока, асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором, генераторы двойного питания и синхронные генераторы с постоянными магнитами.

Критериями сопоставления приняты: коэффициент использования энергии ветра, пусковой момент, сложность системы управления, стоимость реализации, требования к обслуживанию, устойчивость к переменному ветру и типичная область применения. Такой

подход позволяет рассматривать ветроустановку как единую систему, в которой аэродинамическая схема, электрическая машина и преобразователь должны работать согласованно.

Научно-практический результат обзора состоит в обобщении конструктивных и электротехнических решений по единой системе критериев, выделении связи между типом генератора и способом стабилизации частоты, а также уточнении терминологического различия между полной магнитной левитацией ротора и частичной магнитной разгрузкой осевой опоры.

Историческое развитие электрогенераторов для ВЭУ

Первые ветровые электрические установки чаще всего использовали машины постоянного тока. Они были удобны для зарядки аккумуляторов, питания освещения и связи в удаленных районах. Преимуществом такой схемы являлась простота, однако щеточно-коллекторный узел требовал регулярного обслуживания, а выходное напряжение заметно зависело от скорости вращения и нагрузки.

С развитием сетевой ветроэнергетики основной задачей стало получение переменного тока стандартной частоты. В установках 1970-1980-х годов широко применялись асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором. Они работали почти с постоянной скоростью и подключались к сети через трансформатор. Схема отличалась надежностью и сравнительно низкой стоимостью, но слабо использовала переменный ветер, создавала динамические нагрузки при включении и требовала компенсации реактивной мощности.

Дальнейшее развитие привело к применению асинхронных генераторов двойного питания. Преобразователь в такой системе подключается к роторной цепи и управляет скольжением, что расширяет допустимый диапазон скоростей. В результате увеличивается энергоотдача при изменчивом ветре и появляется возможность регулировать реактивную мощность. Недостатком остаются контактные кольца, усложнение ротора и более высокие требования к защите силовой электроники.

Современный этап связан с синхронными генераторами, в том числе с постоянными магнитами. Их частота ЭДС может изменяться вместе с оборотами ротора, а стандартные параметры сети формируются после выпрямителя, DC-звена и инвертора. Полное AC-DC-AC-преобразование особенно полезно для безредукторных многополюсных машин, офшорных ВЭУ, автономных комплексов и вертикально-осевых турбин с относительно низкой частотой вращения (табл. 1).

Таблица 1 – Эволюция генераторных схем ветроэнергетических установок

Период	Тип генератора	Характерная особенность	Получение или стабилизация частоты
Конец XIX – середина XX вв.	Коллекторная машина постоянного тока	Заряд аккумуляторов, малые мощности, простая схема	Переменная частота не формируется; регулируется DC-напряжение
1970–1980-е гг.	SCIG	Редуктор, почти фиксированная скорость, прямое сетевое подключение	Частоту задает сеть; допустимо небольшое скольжение
1990-е гг.	DFIG	Фазный ротор, частичный преобразователь, расширенный диапазон оборотов	Преобразователь управляет скольжением и реактивной мощностью
2000-е гг. – настоящее время	PMSG или синхронный генератор	Многополюсная машина, возможна безредукторная компоновка	Выпрямитель и инвертор формируют стабильные параметры сети
современные автономные системы	PMSG с накопителем энергии	MPPT, контроллер заряда, аккумулятор, балластная нагрузка	Частота нагрузки создается инвертором от DC-шины

Итогом развития генераторных схем стал переход от жестко заданного механического режима к электронно-управляемой работе. В современных ВЭУ контроллер подбирает нагрузку генератора так, чтобы ротор как можно дольше работал вблизи оптимальной быстроходности и коэффициента мощности.

Классификация ветротурбин и конструктивные типы лопастей

Горизонтально-осевая турбина имеет ротор, ориентируемый вдоль направления ветра. В малых установках для этого используется хвостовое оперение, а в промышленных машинах – электромеханическая система рыскания. Наиболее распространена трехлопастная схема, которая обеспечивает разумный баланс аэродинамической эффективности, плавности вращения, уровня шума, стоимости и усталостной прочности.

Двухлопастные роторы легче и дешевле по материалам, однако сложнее балансируются и сильнее нагружают ступицу и башню при каждом обороте. Многолопастные ветроколеса создают высокий пусковой момент, поэтому применимы для насосов и медленноходных механизмов, но при электрогенерации обычно проигрывают быстроходным роторам по эффективности.

Вертикально-осевые турбины не требуют разворота на ветер. Ротор Савониуса работает в основном за счет силы сопротивления: вогнутая часть лопасти воспринимает поток сильнее, чем выпуклая, и за счет разности сил возникает вращающий момент. Такая конструкция проста и хорошо запускается, но имеет ограниченный коэффициент мощности. Ротор Дарье, Н-ротор и спиральные модификации используют подъемную силу профиля. Они способны работать с большей быстроходностью, однако часто нуждаются в стартовой помощи или гибридном сочетании с элементами сопротивления (рис. 1).

Лопастей различаются по аэродинамическому принципу, материалу, форме, способу крепления и назначению. Для их изготовления применяют алюминиевые профили, стеклопластик, углепластик, древесно-композитные элементы и армированные полимерные оболочки. В крупных ВЭУ особенно важны точность профиля, эрозионная защита передней кромки, молниезащита и контроль расслоения композитов. В малой энергетике на первый план выходят технологичность, ремонтпригодность и доступность материалов (табл. 2).

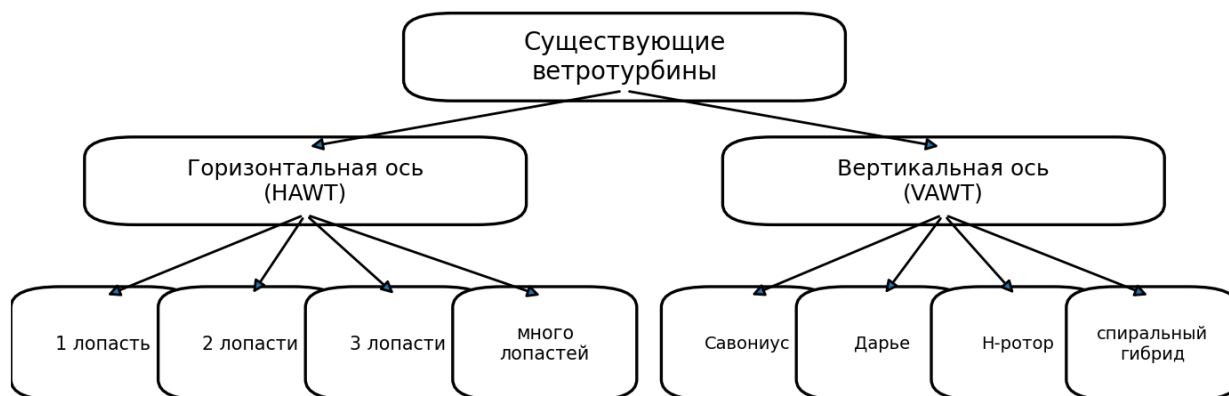


Рисунок 1– Классификация существующих ветротурбин

Таблица 2 – Сравнительная характеристика основных конструкций ВЭУ

Конструкция	Коэффициент мощности	Пусковой момент	Сложность управления	Стоимость	Обслуживание	Рациональная область применения
Горизонтальная 3-лопастная	Высокий	Средний	Высокая при промышленном	Средняя/высокая	Требуется доступ к гондоле	Крупные и сетевые ветропарки

			исполнении			
Горизонтальная многолопастная	Низкий/средний	Высокий	Низкая	Средняя	Относительно простое	Насосы, медленноходные механизмы
Савониус	Низкий	Высокий	Низкая	Низкая	Простое	Малые автономные установки и учебные стенды
Дарье / Н-ротор	Средний	Низкий/средний	Средняя	Средняя	Важна балансировка	Малые и средние ВЭУ при переменном направлении ветра
Гибридная вертикальная	Средний	Средний/высокий	Средняя	Средняя/высокая	Контроль узлов и опор	Площадки со сложной розой ветров, автономные объекты

Расчетные зависимости для мощности, быстроходности и геометрии лопастей

Предварительный расчет начинается с определения площади захвата потока. Для горизонтального ротора радиуса R используется площадь круга, а для вертикальной установки диаметра D и высоты H часто принимается прямоугольная проекция:

$$\begin{aligned} A-H &= \pi R^2; \\ A-V &= D \cdot H. \end{aligned} \quad (1)$$

Мощность ветрового потока пропорциональна плотности воздуха, площади захвата и кубу скорости ветра. Электрическая мощность меньше теоретической из-за аэродинамических, механических и электрических потерь:

$$\begin{aligned} P_{\text{ветр}} &= 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3; \\ P_{\text{эл}} &= 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ – плотность воздуха, V – скорость ветра, C_p – коэффициент использования энергии ветра, η – суммарный КПД механической передачи, генератора и преобразователя. При учебных и предварительных расчетах плотность воздуха обычно принимают $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ для стандартных условий у поверхности земли; при рабочем проектировании ее уточняют по высоте, температуре и давлению.

Быстроходность λ показывает отношение линейной скорости конца лопасти к скорости набегающего потока. Она используется при выборе профиля, частоты вращения и оценке шума:

$$\begin{aligned} \lambda &= \omega R / V; \\ n &= 60 \cdot \lambda \cdot V / (2\pi R); \\ M &= P / \omega. \end{aligned} \quad (3)$$

Для ориентировочной геометрии профильной лопасти (рис. 2) ее делят на участки по радиусу. На каждом участке задаются локальная быстроходность $\lambda-r = \lambda \cdot r/R$, угол потока φ , угол установки β и хорда c :

$$\begin{aligned} \varphi(r) &\approx \arctg [2 / (3\lambda-r)]; \\ \beta(r) &= \varphi(r) - \alpha; \\ c(r) &\approx 8\pi r \sin^2 \varphi / (B \cdot C-1 \cdot \lambda-r). \end{aligned} \quad (4)$$

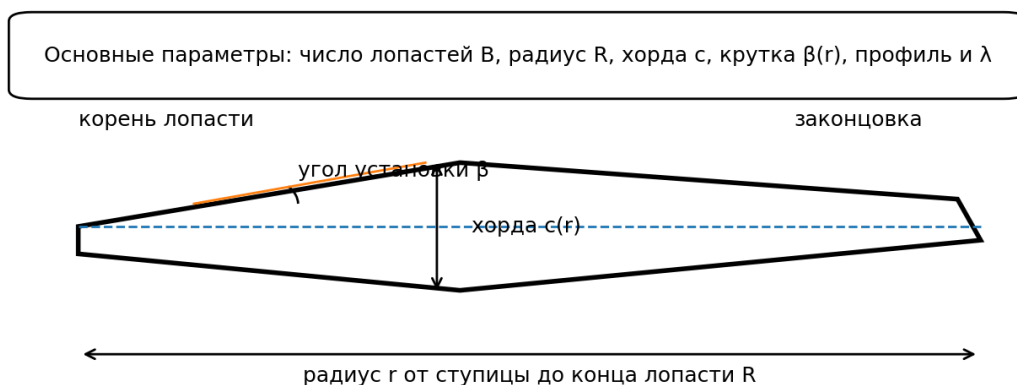


Рисунок 2– Основные геометрические параметры лопасти

В формуле (4) α обозначает расчетный угол атаки профиля, B – число лопастей, C_l – коэффициент подъемной силы выбранного профиля. Эти выражения являются приближенными и применимы только для предварительного выбора размеров (табл. 3). Окончательная конструкция требует проверки прочности, собственных частот, усталостных напряжений, влияния порывов ветра и уточнения аэродинамики в численной модели или на экспериментальном стенде.

Таблица 3 – Расчетный пример для вертикальной ВЭУ при $V = 5$ м/с, $\lambda = 1,8$, $C_p = 0,32$, $\eta = 0,85$, $\rho = 1,225$ кг/м³

D, м	H, м	A, м ²	P эл, Вт	n, об/мин	M, Н·м
1,0	0,75	0,75	15,6	171,9	0,87
1,5	1,12	1,69	35,1	114,6	2,93
2,0	1,50	3,00	62,5	85,9	6,94
2,5	1,88	4,69	97,6	68,8	13,56
3,0	2,25	6,75	140,6	57,3	23,43

Из приведенного примера (см. рис. 3) следует, что увеличение диаметра и высоты вертикального ротора повышает площадь захвата, а влияние скорости ветра еще сильнее из-за кубической зависимости мощности. Поэтому грамотный выбор площадки и высоты установки часто дает больший эффект, чем незначительное улучшение генератора или контроллера.

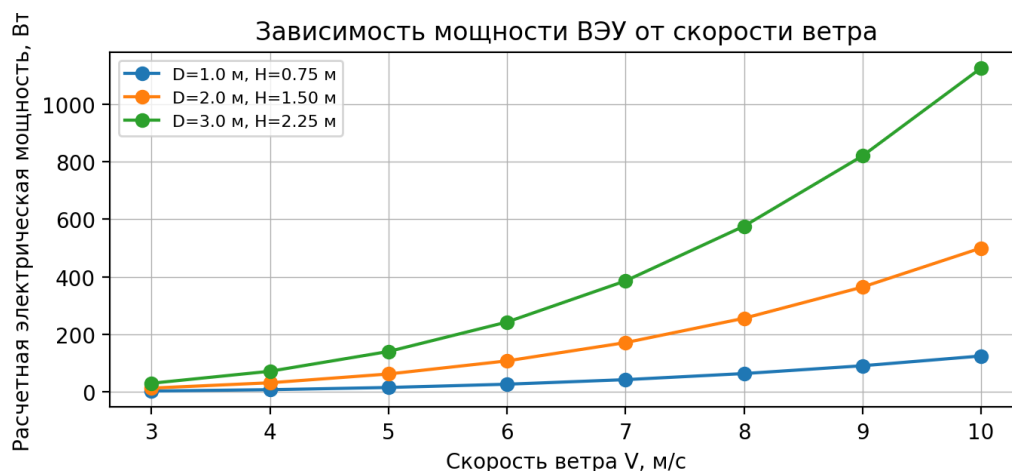


Рисунок 3 – Расчетные кривые мощности для вертикальных ВЭУ при заданных исходных параметрах

Поддержание частоты тока и согласование с нагрузкой

Для синхронного генератора частота индуцируемой ЭДС определяется числом пар полюсов p и частотой вращения n :

$$f = p \cdot n / 60. \quad (5)$$

Если генератор напрямую связан с сетью, обороты должны оставаться около синхронного значения. Однако ветер изменяется постоянно, поэтому жесткое удержание скорости ведет к снижению выработки и росту нагрузок. Современные ВЭУ решают эту задачу на аэродинамическом, электромеханическом и сетевом уровнях.

Аэродинамический уровень ограничивает мощность поворотом лопастей, срывом потока или тормозными элементами. Электромеханический уровень задает момент генератора и допустимые обороты. Сетевой уровень через преобразователь формирует напряжение, частоту, коэффициент мощности и реактивную составляющую. В автономных установках генератор может работать с переменной скоростью, а стандартная частота создается инвертором от DC-шины или аккумуляторной батареи (табл. 4).

Таблица 4 – Связь типа генератора, преобразователя и способа регулирования частоты

Тип генератора	Силовой преобразователь	Способ регулирования частоты	Типовая область применения
SCIG	Минимальный или отсутствует	Частоту задает сеть; скорость почти постоянна	Простые сетевые установки фиксированной скорости
DFIG	Частичный преобразователь в роторной цепи	Управление скольжением и реактивной мощностью	Средние и крупные ВЭУ переменной скорости
PMSG	Полный AC-DC-AC-преобразователь	Инвертор формирует 50 Гц независимо от оборотов	Безредукторные, офшорные и малые ВЭУ
PMSG с АКБ	Выпрямитель, контроллер заряда, инвертор	Частота нагрузки создается от DC-шины	Автономные потребители и гибридные системы
DC-генератор	Регулятор напряжения и инвертор при необходимости	Переменная частота появляется только после инвертирования	Малые мощности, учебные и зарядные устройства

Характер изменения коэффициента мощности в зависимости от быстроходности показан на рисунке 4.

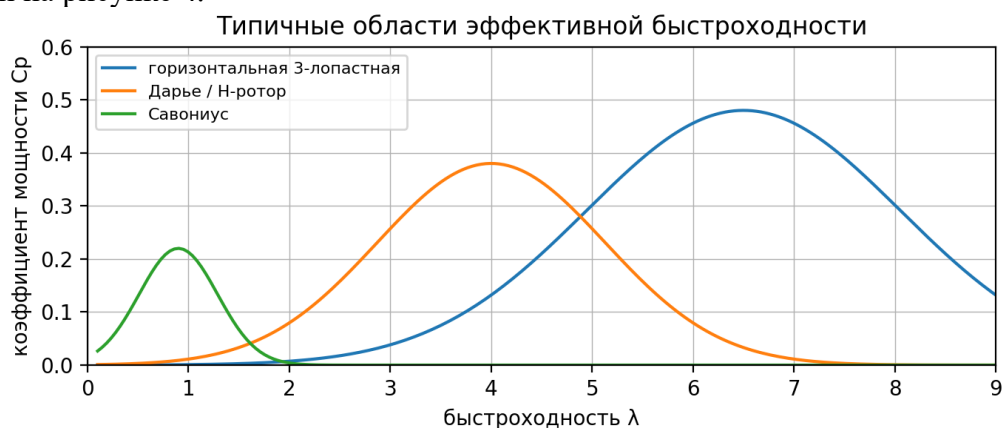


Рисунок 4 – Типичные зависимости C_p от быстроходности

Для вертикально-осевых ВЭУ малой мощности электронная стабилизация обычно рациональнее сложного механического удержания оборотов. При этом контроллер должен иметь тормозной ключ, балластную нагрузку, температурную защиту и алгоритм безопасной остановки, поскольку при отключении нагрузки напряжение холостого хода может быстро возрасти.

Монтаж ВЭУ: основные операции и возможные сложности

Монтаж ветроэнергетического оборудования начинается с обследования площадки. Необходимо оценить среднюю скорость ветра, розу ветров, турбулентность, наличие препятствий, возможность подъезда техники, свойства грунта, расстояние до потребителя, условия обслуживания и требования электробезопасности.

Для промышленной горизонтальной ВЭУ характерны следующие этапы: устройство фундамента, сборка секций башни, подъем гондолы, установка ступицы, навеска лопастей, прокладка кабельных линий, подключение заземления, проверка тормозов, настройка системы рыскания и пробный пуск. На каждом этапе контролируются болтовые соединения, центровка, изоляция, молниезащита и параметры безопасности.

В малых вертикально-осевых установках часть операций проще: ротор может собираться модульно, генератор и контроллер располагаются ниже, а обслуживание часто выполняется без тяжелой подъемной техники. Вместе с тем вертикальная компоновка требует точной соосности верхней и нижней опор, ограничения биения вала, динамической балансировки и проверки резонансных частот мачты. Нарушение центровки увеличивает трение, шум, пусковую скорость и ускоряет износ подшипников.

Магнитная разгрузка в вертикальных ВЭУ

Вертикальная ось удобна для применения магнитной разгрузки, поскольку вес ротора действует вдоль вала и может частично восприниматься магнитной опорой. В простых конструкциях применяются постоянные магниты с осевым отталкиванием, а в более сложных системах – активные магнитные подшипники с датчиками положения и управляемыми электромагнитами (рис. 5).

В данной статье термин «магнитная разгрузка» используется для обозначения частичного уменьшения осевой нагрузки на механические опоры. Термин «магнитная левитация» целесообразно применять только тогда, когда конструкция обеспечивает бесконтактный подвес ротора с устойчивым радиальным и осевым позиционированием. Для малых ВЭУ чаще реализуется именно разгрузка, а не полный отказ от механических опор.

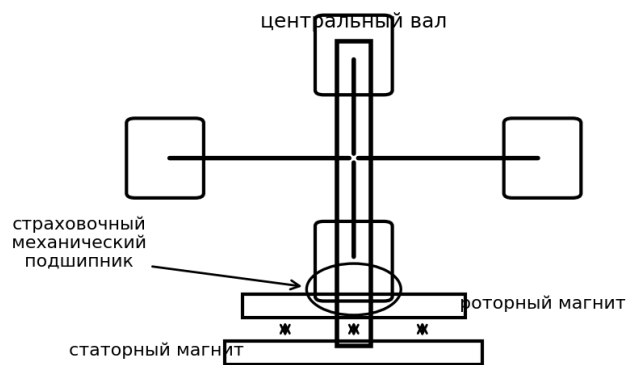
Оценочная магнитная сила и составляющие пускового момента могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} F_m &\approx Bm^2 \cdot S / (2\mu_0); \\ M_{\text{пуск}} &\approx M_{\text{подш}} + M_{\text{упл}} + M_{\text{ген}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь F_m – приближенная магнитная сила, Bm – магнитная индукция в зазоре, S – площадь полюса, μ_0 – магнитная постоянная, $M_{\text{подш}}$ – момент трения подшипников, $M_{\text{упл}}$ – момент от уплотнений и вспомогательных сопротивлений, $M_{\text{ген}}$ – электромагнитный момент генератора при запуске. Формула магнитной силы является оценочной и применима только при допущении равномерного поля в зазоре;

- реальная конструкция требует проверки поля,
- устойчивости и температурного режима.

Снижение контактной нагрузки облегчает запуск при слабом ветре, однако не устраняет аэродинамический шум лопастей. Поэтому уменьшение общей шумности возможно только совместно с правильным профилем, умеренной быстроходностью, точной балансировкой и жесткой рамой.



магнитная сила F_m частично разгружает осевую опору; аварийный подшипник остается как страховочный

Рисунок 5 – Принцип магнитной разгрузки вертикально-осевого ротора

Ограничениями магнитной разгрузки являются стоимость магнитов, необходимость страховочных подшипников, чувствительность к перекосам, нагрев, риск частичной дегмагнитизации, вихревые токи в металлических деталях и сложность устойчивого радиального центрирования. Поэтому для малых вертикальных ВЭУ наиболее рациональна гибридная схема: магнитная система уменьшает осевую нагрузку, а механические или активные радиальные опоры обеспечивают точность положения и аварийную безопасность.

Заключение

1. Современная ВЭУ должна рассматриваться как единая система, где аэродинамика ротора, генератор, силовой преобразователь и система управления взаимно определяют энергетический результат.
2. Горизонтально-осевые трехлопастные турбины рациональны для крупных сетевых установок, поскольку дают высокий коэффициент мощности и хорошо масштабируются, но требуют развитой системы ориентации, управления шагом и обслуживания гондолы.
3. Вертикально-осевые установки имеют меньший предельный КПД, однако сохраняют практическую ценность для автономных объектов, малой энергетики и площадок с переменным направлением ветра благодаря всенаправленному приему потока и возможности размещать генератор у основания.
4. Эволюция генераторов показывает переход от машин постоянного тока и фиксированной скорости к системам переменной скорости с электронным формированием частоты. Наиболее гибкими являются схемы PMSG с полным преобразователем и автономные комплексы с DC-шиной.
5. Магнитная разгрузка вертикального ротора может снизить трение, стартовый момент и механическую составляющую шума, но не заменяет точную центровку, страховочные опоры, расчет устойчивости и проверку тепловых режимов.

Литература

1. Уметалиев С. Д. Ветроэнергетические установки юрточного типа с вертикальной осью вращения // Известия. – 2025.
2. Уметалиев С. Д. Особенности работы ВЭУ // Известия. – 2023.
3. Безруких П. П. Ветроэнергетика: справочно-методическое издание / под общ. ред. П. П. Безруких. – М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2014. – 304 с.
4. Степанов В. С., Старикова Н. В. Ветроэнергетика: учебное пособие. – Иркутск: ИРНИТУ, 2018. – 142 с.
5. Янсон Р. А. Ветроустановки: учебное пособие / Под ред. М. И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 36 с.
6. Каргиев В. М., Мартыросов С. Н., Муругов В. П., Пинов А. Б., Сокольский А. К., Харитонов В. П. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. – М.: Интерсоларцентр, 2001.

7. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки. – М.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948.
8. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 1999.
9. ГОСТ Р 55589-2013. Международный электротехнический словарь. Часть 415. Установки ветроэнергетические. Системы генерирования электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2014.
10. ГОСТ Р 54418.1-2023 (МЭК 61400-1:2019). Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2024.
11. Скороходов В. И., Шкандюк Д. О., Киселев Г. Ю., Жиленко Д. М. Использование магнитных подвесов в ветроэнергетических установках // Молодой ученый. – 2016. – № 28.2 (132.2). – С. 79 – 81.
12. Де Рензо Д. Ветроэнергетика / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
13. Елистратов В. В., Кузнецов М. В., Лыков С. Е. Ветроэнергетические установки. Автономные ветроустановки и комплексы: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 100 с.
14. Марьяндышев П. А., Кангаш А. И., Любов В. К. Ветроэнергетические установки и перспективы их использования в Арктической зоне РФ: учебное пособие. – Архангельск: САФУ, 2018. – 67 с.
15. Шерьязов С. К., Шелубаев М. В. Ветроэлектрические установки в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей: монография. – Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2018. – 184 с.
16. Бабина Л. В. Анализ ветроустановок для электростанций малой мощности // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78(04). – С. 27–36.
17. Жарков В. Я. Малая ветроэнергетика: проблемы и пути решения // Вестник аграрной науки Дона. – 2013. – № 3(23). – С. 45–52.
18. Соломин Е. В. Основы методологии разработки вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 1(93). – С. 18–28.
19. Соломин Е. В. Сравнительные характеристики вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 48–53.
20. Соломин Е. В., Холстед Р. Л. Технические особенности и преимущества ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 36 – 41.
21. Кирпичникова И. М., Мартянов А. С., Соломин Е. В. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 93 – 97.
22. Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. Расширенные варианты использования гидро-ветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы // Проблемы автоматики и управления. – 2021. – № 3 (42). – С. 4–14.
23. Грахов Ю. В., Матвеев О. В., Соломин Е. В. Инженерный метод и математическое моделирование в проектировании ветроэнергетических установок // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2010. – № 9(185). – Вып. 2. – С. 45–52.
24. Котов А. А., Неустроев Н. И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 80–89.
25. Бубенчиков А. А., Артамонова Е. Ю., Дайчман Р. А., Файфер Л. А., Катеров Ф. В., Бубенчикова Т. В. Проблемы применения ветроэнергетических установок в регионах с малой ветровой нагрузкой // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 5-2(36). – С. 39–43.