

УДК 621.548

АЭРОДИНАМИКА ШУМА ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Арсланова А.Д.¹, студент гр. ИЗ-1-24, II курсНаучный руководитель: Маслов И. Н.², к.т.н., доцент^{1,2}ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»,
г. Казань, Республика Татарстан

Несмотря на лидирующие позиции ветроэнергетики по темпам развития среди возобновляемых источников, ее дальнейшее распространение сдерживается экологическими факторами, среди которых акустическое воздействие является одним из наиболее значимых. Уровень шума ветрогенератора является функцией его номинальной мощности, скорости вращения ротора, диаметра ротора и скорости ветра. Переход к крупным ветрогенераторам с роторами более 150 метров в диаметре привел к увеличению линейной скорости кончиков лопастей, что напрямую связано с ростом аэродинамического шума. Эта проблема становится особенно острой при строительстве ветроэлектростанций (ВЭС) вблизи населенных пунктов и на территориях, где важен высокий уровень экологического комфорта, таких как эко-фермы. В отличие от механического шума, который можно эффективно изолировать, аэродинамический шум от лопастей распространяется на большие расстояния и представляет собой более сложную задачу для подавления.

Целью данной работы является комплексный анализ акустических характеристик современных ветрогенераторов, обзор инженерных решений по снижению шума, оценка экономической целесообразности их внедрения для проектов различного масштаба.

Существуют два основных подхода к снижению шума: пассивные (конструктивные), основанные на изменении концептуального вида и конструктивных особенностей лопастей, башни и роторного устройства, активные (управляемые), использующие специальные системы, изменяющие весь или частично функционал работы ветрогенератора, тип питания, аккумуляирования, режим работы, регулирование мощности. Экономическая выгода от их внедрения зависит от нескольких факторов: размера проекта, стоимости технологии, возможность использования самой технологии и рентабельность КППД для систем. К таким преимуществам относятся: уменьшение санитарно-защитных зон (СЗЗ), упрощение получения разрешительной документации и повышение лояльности местного населения. Серрация – это наиболее распространенный и действенный способ, специальные пластины с полообразным профилем, устанавливаемые на заднюю кромку лопастей, разбивают крупные вихри, возникающие при движении воздуха. Это приводит к снижению шума от срыва на 1-4 Дба. Современные, хорошо спроектированные серрации приводят к минимальной потере аэродинамической эффективности – менее 0.5%. Это может

снизить годовую выработку электроэнергии (АЕР) на 0.2-0.8%. Возможность сокращения СЗЗ позволяет размещать больше ветрогенераторов на той же территории или располагать их ближе к линиям электропередачи. В проектах ВЭС с жесткими акустическими ограничениями, выгода от установки дополнительного оборудования многократно превышает затраты на серрации для всего парка. Техническим эффектом является снижение уровня звуковой мощности на 2-3 Дба эквивалентно уменьшению воспринимающей громкости примерно на 15 - 20%. Это может позволить сократить санитарно-защитной зоны на 15-25%. Экономические модификации закладываются на этапе проектирования лопастей, поэтому их прямая дополнительная стоимость невелика. Однако они требуют значительных инвестиций в научно-исследовательские работы (НИОКР) и использование сложных вычислительных методов (CFD, акустическое моделирование). Экономия достигается за счет снижения эксплуатационных рисков и уменьшения количества жалоб от местного населения, что, в свою очередь, сокращает потенциальные судебные издержки и время простоя оборудования.

Децентрализованное энергоснабжение эко-ферм предъявляет уникальные требования к ветрогенераторам: помимо стандартного показателя удельной выработки энергии, первостепенное значение приобретает минимизация шумового воздействия. Следовательно, процесс выбора подходящей модели ветрогенератора должен быть тщательно продуман. Именно поэтому можно привести сравнительный анализ двух видов ветрогенераторов, таких как ветряная турбина с вертикальной осью вращения (VAWT), которая преобразует энергию ветра в электричество, не требуя ориентации на ветер и ветряная турбина с горизонтальной осью вращения (HAWT).

Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения (HAWT) демонстрируют наивысшую производительность, однако их работа сопровождается значительным уровнем шума, что обуславливает необходимость установки на расстоянии не менее 500-700 метров от жилых секторов. Особое беспокойство могут вызывать дискретные низкочастотные звуковые составляющие. В свою очередь, ветрогенераторы с вертикальной осью вращения (VAWT) обладают несколько меньшим коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ) – на 20-40% ниже, чем у HAWT. К сожалению, у них тоже присутствуют недостатки такие как: отсутствие возможности самостоятельно запускаться при низкой скорости воздушного потока; большая конструкция ветрогенератора нуждается в опорных тросах, которые создают высокую осевую нагрузку на основные подшипники; Однако их преимуществом является значительно более низкая скорость вращения, что приводит к существенному снижению уровня шума. Широкополосный и равномерный спектр шума VAWT воспринимается человеком более благоприятно. Это позволяет размещать их в непосредственной близости от инфраструктуры фермы (100-200 м), что, в свою очередь, минимизирует затраты на прокладку кабелей и снижает потери энергии в сети. Следовательно, для экологических ферм, где низкий уровень шума

является неотъемлемой частью концепции "чистого" производства, ветрогенераторы с вертикальной осью вращения являются акустически и эксплуатационно предпочтительным выбором, несмотря на их несколько меньшую абсолютную энергоэффективность.

Подводя итог, можно сказать, что акустическое излучение ветрогенераторов представляет собой существенный лимитирующий фактор для масштабирования ветроэнергетических проектов, особенно в условиях высокой антропогенной нагрузки и вблизи объектов с повышенной экологической чувствительностью. Современные технологические решения, такие как сerraция кромок лопастей и адаптивное управление режимами работы, демонстрируют эффективность в снижении уровня звукового давления (УЗД) на 2-6 дБА и характеризуются высокой степенью технологической готовности. Экономический анализ подтверждает, что дополнительные капитальные вложения в технологии шумопонижения могут быть нивелированы за счет повышения эффективности использования земельных ресурсов. Для малых проектов, в частности в агропромышленном комплексе (например, эко-фермы), соответствие экологической концепции зачастую является определяющим фактором. В этом контексте, ветрогенераторы с вертикальной осью вращения, несмотря на более низкий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), представляют собой акустически более благоприятное решение, позволяющее интегрировать источники энергии непосредственно вблизи точек потребления без негативного воздействия на экологический комфорт. Перспективным направлением исследований является разработка адаптивных систем, способных в реальном времени динамически оптимизировать баланс между акустической эмиссией и аэродинамической эффективностью.

Список литературы:

1. Васильев, В. В. Применение ветрогенераторов на экологических фермах Центрального Черноземья / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, Н. Н. Папонов // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 25 ноября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 401-407. – EDN FUZINT.
2. Артышко, Ю. Ю. Ветрогенераторы в электроэнергетике / Ю. Ю. Артышко, А. М. Константинов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2025. – Т. 1. – С. 543-548. – EDN PAEKNX.
3. Васильев, В. В. Современные перспективные ветрогенераторы с вертикальной осью вращения для экологических ферм Центрального Черноземья / В. В. Васильев, Н. Н. Папонов, И. И. Аксенов // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практи-

ческой конференции, Воронеж, 25 февраля 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 9-18. – EDN LUYNNP.