

Энергетические системы и комплексы

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МОРСКИХ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

- **Сироткин Е.А.**, канд. техн. наук, ООО «Инсмартавтоматика», г. Челябинск, Россия

REVIEW OF METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF OFFSHORE WIND TURBINES

- **Sirotkin E. A**, Ph.D., Insmartavtomatika LLC, Chelyabinsk, Russia

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности эксплуатации ветроэнергетических установок, особенно в условиях морских и прибрежных зон, где оборудование подвергается воздействию сложных климатических и эксплуатационных факторов.

В работе рассматриваются вопросы оценки надежности основных элементов ветроустановок с учетом особенностей их конструктивного исполнения и условий эксплуатации.

Проведен анализ различных вариантов компоновки и сборки ветроэнергетической установки, предназначенной для размещения в морских прибрежных районах, включая оценку влияния конструктивных решений на показатели надежности и долговечности оборудования.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования стандартных методик оценки надежности, применяющихся в нашей стране, но с использованием мирового опыта эксплуатации. Сделаны выводы о целесообразности реинжиниринга основных элементов ветроустановок в России.

Ключевые слова: ветроустановка, морские установки, надежность, методология, мониторинг надежности.

The relevance of this research is determined by the need to improve the reliability and operational efficiency of wind power installations, particularly in offshore and coastal zones where equipment is exposed to complex climatic and operational conditions. The study addresses the assessment of the reliability of the main components of wind turbines, taking into account the specifics of their structural design and operating conditions.

An analysis of different configuration and assembly options for a wind power installation intended for deployment in marine coastal areas is carried out, including an evaluation of how design solutions influence reliability indicators and the durability of the equipment.

The results obtained confirm the feasibility of applying standard reliability assessment methodologies used in our country, while incorporating international operational experience. Based on the conducted research, conclusions are drawn regarding the expediency of reengineering the key components of wind power installations in Russia in order to improve their reliability, performance, and adaptability to modern operating conditions.

Key words: wind turbine, offshore installations, reliability, methodology, reliability monitoring.

Введение

Рассмотрим надежность и эффективность работы отдельных элементов ветроустановок, устанавливаемых в прибрежных зонах морей и океанов.

Данные энергетические комплексы широко применяются за границей. Для внедрения подобных на территории нашей страны необходимо провести анализ наиболее уязвимых деталей и систем [1-3].

Основные элементы морской ветряной турбины и их влияние на работоспособность системы в целом

Система рыскания отвечает за ориентирование гондолы по ветру в процессе эксплуатации. Она включает около 10 электродвигателей с редукторами, закрепленных на опорной плите гондолы. Каждый электродвигатель приводится в действие через шестерню, которая взаимодействует с внутренним зубчатым кольцом подшипника рыскания. Масса каждого привода достигает 1 тонны, а передаточное число примерно равно 300:1. Для снижения постоянной нагрузки на приводы применяется набор из примерно 10 суппортов.

Гидравлические тормоза фиксируют положение опоры рыскания, за исключением моментов, когда необходимо ее поворачивать. Во время работы, несмотря на незначительные повороты гондолы на несколько градусов с интервалом в несколько минут для выравнивания по ветру, тормоза гасят лишние движения. Положение гондолы контролируется датчиками, а концевые выключатели препятствуют чрезмерному проворачиванию тросов вниз по башне.

Опора системы рыскания представляет собой соединительный элемент между гондолой и башней, позволяющий поворачивать гондолу в любом направлении относительно ветра во время эксплуатации. Стоимость подшипников рыскания значительно колеблется в зависимости от конструкции гондолы. Обычно это однорядные шарикоподшипники с четырехточечным контактом, выполненные из кованных колец из стали марки 42CrMo4 с последующей закалкой. Шарики изготавливаются из материала 100Cr6. Масса подшипника может достигать 15 тонн. Дорожки качения проходят этапы точной обработки,

включая шлифовку после индукционной закалки. Подшипники испытывают сложные нагрузки и часто работают в условиях либо длительного простоя, либо совершения небольших оборотов. Для обеспечения долговечности очень важна точность плоскостей монтажа — именно поэтому фланец опоры дополнительно подвергается механической обработке после сварки. Внутри подшипника располагаются зубчатые шестерни, работающие в паре с приводами рыскания. Основными элементами являются: кованные и механически обработанные кольца, закаленные и отшлифованные поверхности, шарики, сепараторы (прокладки) и уплотнения.

Также необходимо обратить внимание на вспомогательные системы гондолы при оценке надежности. Различные дополнительные системы обеспечивают бесперебойную автоматическую работу ветровой турбины большую часть времени и способствуют проведению регламентного технического обслуживания, обычно осуществляемого один раз в год. Стоимость вспомогательных систем гондолы существенно зависит от ее конфигурации. К таким системам относятся, например, системы охлаждения и кондиционирования воздуха, анемометрия, противопожарную защиту, источники бесперебойного питания.

Нельзя обойти вниманием и саму гондолу — центральный узел ветряной турбины, который собирается производителем из множества компонентов, зачастую поставляемых различными внешними компаниями. Габариты гондолы для турбины мощностью 15 МВт весьма значительны: ее длина составляет 21-25 метров, ширина — 9-12 метров, а высота для транспортировки — 10-12 метров. Общая масса, включая ступицу, может достигать 600-800 тонн. Основные конструктивные элементы гондолы включают главный подшипник, коробку передач (если она предусмотрена), генератор, поворотный подшипник и систему управления ориентацией.

Функция главного подшипника заключается в поддержке ротора и передаче его нагрузок на конструкцию гондолы. Для морских ветряных турбин разработаны различные схемы компоновки гондол, включая варианты с одним подшипником, который одновременно поддерживает генератор и ротор, а также системы, где главный вал опирается на подшипники с обеих сторон. В случае применения редуктора он выполняет

функцию преобразования низких оборотов ротора (4-8 об/мин) в более высокие (до 600 об/мин) для среднескоростной коробки передач. Надежность редуктора, являющегося критически важным элементом трансмиссии, является залогом длительной и бесперебойной работы ветряной турбины.

Рассмотрим теперь генератор. В контексте морских турбин наблюдается переход от использования редукторов с традиционными высокоскоростными генераторами к системам с низко- и среднескоростными генераторами. Альтернативным решением является применение турбин с прямым приводом, где редуктор отсутствует, но при этом используется более массивный и сложный низкооборотный генератор.

Генератор преобразует механическую энергию в электрическую. В большинстве случаев используются постоянные магниты, которые не нуждаются в подаче энергии для возбуждения. Это способствует высокой эффективности, снижению массы и размеров оборудования, а также уменьшению расходов на транспортировку и установку, несмотря на применение редкоземельных сплавов.

Поворотный подшипник соединяет гондолу с башней, позволяя системе поворота вращать гондолу в любом направлении во время работы. Такая система ориентирует как несущий винт, так и гондолу в сторону ветра во время эксплуатации.

К другим элементам гондолы относятся: опорная плита, которая поддерживает приводную передачу и остальные компоненты гондолы, а также передает нагрузку от несущего винта к башне; главный вал (при наличии), который передает крутящий момент от ротора к коробке передач или, в случае прямого привода, непосредственно к генератору; система управления, обеспечивающая диспетчерское управление (включая контроль работоспособности), регулировку мощности и нагрузки для продления срока службы ветряной турбины и максимизации прибыли при соблюдении нормативных требований; система мониторинга состояния, предназначенная для дополнительной диагностики работы и прогнозирования возможных неисправностей; система отбора электроэнергии и другие вспомогательные системы, поддерживающие отопление, охлаждение, безопасность и другие эксплуатационные или обслуживающие функции.

Методы оценки надежности ветряных турбин

Для определения текущего состояния ветряных турбин используются данные SCADA, которые анализируются с помощью разнообразных методик, включая нечеткий вывод, теорию доказательств, теорию материальных элементов и теорию облаков.

Эти подходы позволяют получить как приблизительные, так и более точные оценки. В последние годы были предложены новые решения: разработан метод мониторинга производительности, опирающийся на высокочастотные данные SCADA. Известны еще два метода: один для оценки снижения производительности на основе имеющихся данных, а другой – для оценки производительности непосредственно по данным SCADA.

Ранее для диагностики аномальных режимов работы турбин использовались различные подходы. Например, применяли принцип максимального членства, анализируя корреляцию выходной мощности. Для борьбы с неопределенностью информации при оценке состояния предложено использовать анализ парных наборов и теорию доказательств.

Результаты оценки методов

Известен метод оценки состояния ветряных турбин с учетом информационной неопределенности, используя технологию потоковой обработки Spark.

Хотя эти работы демонстрируют эффективность в работе с неопределенной информацией, а принцип максимального соответствия и критерий надежности часто применяются для принятия решений о состоянии турбины, они имеют существенные недостатки.

Принцип максимального соответствия не позволяет выявить переходные состояния, поскольку игнорирует второе по величине соответствие, которое может быть критически важным, особенно когда первые два соответствия близки. Кроме того, точность оценки по критерию надежности напрямую зависит от выбора порогового значения надежности, и его некорректный выбор может привести к противоречивым выводам о состоянии турбины.

Заключение

Рассмотрены методы оценки надежности и эффективности работы отдельных элементов ветроустановок, устанавливаемых в прибрежных зонах морей и океанов. Данные энергетические комплексы широко применяются за границей. Для внедрения подобных на территории нашей страны необходимо провести анализ наиболее уязвимых деталей и систем. Кроме того, можно сделать вывод о целесообразности реинжиниринга основных элементов ветроустановки в России.

Список литературы

1. Zhang H., Xiu B., Jiang D., Zhuang G., Zhang Y., Li B. An evaluation method of health condition for wind turbine based on asymmetric proximity // *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. Article 1111355. doi: 10.3389/fenrg.2023.1111355
2. Breeze P. *Wind Power Generation*. Academic Press. 2015. 104 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04850-2>

Сведения об авторе

Сироткин Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, технический директор ООО «Инсмартавтоматика», г. Челябинск, Россия, ea.sirotkin@gmail.com

About the author

Sirotkin Evgeniy Anatolyevich – Ph.D., Technical Director of Insmartavtomatika LLC, Chelyabinsk, Russia, ea.sirotkin@gmail.com

Дата поступления рукописи: 03.03.2026

Дата принятия рукописи: 17.03.2026

3. Rodrigues S., Restrepo C., Katsouris G., et al. A Multi-objective optimization framework for offshore wind farm layouts and electric infrastructures // *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 3. P. 216. doi: 10.3390/en9030216.

References

1. Zhang H., Xiu B., Jiang D., Zhuang G., Zhang Y., Li B. An evaluation method of health condition for wind turbine based on asymmetric proximity // *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. Article 1111355. doi: 10.3389/fenrg.2023.1111355
2. Breeze P. *Wind Power Generation*. Academic Press. 2015. 104 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04850-2>
3. Rodrigues S., Restrepo C., Katsouris G., et al. A Multi-objective optimization framework for offshore wind farm layouts and electric infrastructures // *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 3. P. 216. doi: 10.3390/en9030216.