

УДК 621.311.24

АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Е.В. Соломин, П.А. Юнусов

В этой статье рассмотрена структура ветровых турбин и проанализированы различные компоненты ветровых турбин, неисправности, которые могут произойти. Приведены данные о результатах различных исследований неисправностей ветровых турбин. Основное внимание уделяется анализу состояний неисправностей в электрических системах ветровых электрических станций как для мелкомасштабных наземных, так и для крупномасштабных морских систем.

Ключевые слова: ветрогенератор, время простоя, неисправности.

Постоянно возрастающий уровень загрязнения воздуха и ограничение источников ископаемого топлива привело к внедрению возобновляемых источников энергии. Ветроэлектростанции широко используются в качестве средства производства электроэнергии в интеллектуальных сетях как системы генерации (DG) [1]. Несомненно, энергия ветра стала основой энергетических систем в ряде стран и считается надежным и финансово разумным источником электроэнергии. Вклад энергии ветра в производство электроэнергии достиг значительной доли даже на мировом уровне. Среди многих государств, которые вкладывают огромные средства в производство ветровой электроэнергии, 10 ведущих стран: Китай, США, Германия, Испания, Индия, Соединенное Королевство, Италия, Франция, Канада и Португалия.

Установленная мощность ветровых электростанций в России в 2015 г. составляло 1320 МВт, и к 2020 г. планируется увеличить данную мощность до 4750 МВт [2].

Энергия ветра быстро растет во всем мире как средство борьбы с мировой нехваткой энергии и связанными с ней экологическими проблемами. Амбициозные планы в отношении использования возобновляемых источников энергии в европейских странах требуют надежной, но в то же время экономической системы для производства, сбора и передачи электроэнергии из возобновляемых ресурсов. В многолюдной Европе коллективные оффшорные крупномасштабные ветряные электростанции эффективны и имеют потенциал для достижения этой устойчивой цели. Это означает, что требуется еще более надежная система сбора и передачи. Однако эта относительно новая область добычи ветряной энергии на шельфе не имеет систематического анализа переходных процессов и опыта экс-

плутации для дальнейшего развития. В то же время требуются соответствующие схемы защиты от сбоев.

В этой статье основное внимание уделяется анализу состояний неисправностей в электрических системах ветровых электрических станций как для мелкомасштабных наземных, так и для крупномасштабных морских систем.

Как и во всех инженерных системах, конструкция ветропарка, включая выбор компонентов и топологий, предполагает компромисс между техническими характеристиками и экономическими издержками. Операционная цель, которая требует только «энергии ветра», а не «надежной», а огромная стоимость оффшорных ветровых электростанций делает экономический фактор доминирующим. Именно поэтому в конструкции ветряных электростанций существует «доступность», а не «надежность» традиционной подстанции и инфраструктуры. Для коммунальных сетей важно обеспечить электроэнергию непрерывно и безопасно для потребителей с надежностью, в то время как система генерации ветряных электростанций является лишь источником энергии. Если этап развития ветроэнергетики таков, что он имеет ограниченное проникновение, основное внимание уделяется эффективности доставки. Это означает, что наличие «доступной» мощности ветра может быть достаточным.

Однако это не относится к крупномасштабным оффшорным ветровым электростанциям. Проведенное в Швеции исследование ветровой электростанции [3] показало, что 23 % отказов в период с 2000 по 2004 год происходили в электрической системе ветроэлектростанции (включая генераторы), занимая первое место среди компонентов ветряных электростанций (по сравнению с двигателем, редукторами, контролем системы, структура, датчики и т. д.). Это также составляет 23,2 % от общего времени простоя и занимает первое место, опередив сбой в передаче и системы управления. Исследование также включало статистические данные из Германии и Франции с аналогичными результатами. Из статистических данных видно, что временная стабильность и анализ надежности электрической системы срочно требуются на этапах планирования и проектирования ветряных электростанций. Фактически неисправности коробки передач и системы управления частично связаны с отказами электрических систем, которые могут вызывать колебания электрического крутящего момента, а также механические повреждения в коробке передач и системе подшипников. Это делает анализ электрических систем еще более критичным.

Тем не менее электрическая система в условиях жесткой морской среды может существенно влиять на производство и производительность электроэнергии. Отсутствие статистики сбоев для крупномасштабных оффшорных ветровых электростанций обусловлено эксплуатационной неопытностью в этой относительно новой отрасли.

Однако при увеличении мощности морских ветропарков при планировании и строительстве и требованиях к пропускной способности отказов в сетчатых кодах многих стран необходимо повысить понимание надежности и устойчивости оффшорных ветровых электростанций, для которых обслуживание и ремонт дороги и их сложно запланировать.

Международная Электротехническая комиссия (МЭК) определила отказ как прекращение способности изделия выполнять требуемую функцию [3]. Отказы могут быть классифицированы в соответствии с режимами и причинами отказа, которые должны быть поняты до анализа отказа.

Режим отказа идентифицируется с помощью симптома, с помощью которого может наблюдаться сбой. Причина отказа является основной причиной, которая может привести к возникновению неисправности, и определена как обстоятельства при проектировании, изготовлении или использовании, что привело к сбою.

Согласно IEC 60050 Международный Электротехнический словарь (МЭС), компонент является составной частью устройства, которая не может быть физически разделена на более мелкие части без потери своей конкретной функции [3]. Статистически компоненты не ремонтпригодны, имеют конечный срок службы и обычно имеют режим единичного отказа. Эксплуатационные характеристики для совокупности идентичных компонентов могут быть достаточно хорошо представлены одним из стандартных статистических распределений.

Часть оборудования – это совокупность компонентов, которые выполняют определенную функцию. Отказ любого компонента может привести к сбою оборудования, поэтому оборудование может иметь несколько режимов отказа. Оборудование может быть восстановлено к работе путем замены неисправных компонентов [3].

В данной статье системы, наиболее сложные из трех терминов, как правило, состоят из комбинации оборудования и компонентов. В течение срока службы системы компоненты могут быть заменены, а оборудование отремонтировано на месте или заменено [7]. Следует отметить, что термин «система» следует квалифицировать в тех случаях, когда из контекста не ясно, к чему он относится, например, к системе управления. Далее подсистемы определяются так же, как и системы, за исключением того, что уровень подсистем ниже уровня систем, т.е. система может быть разделена на подсистемы, которые также могут быть разделены на несколько устройств.

В данной статье объектом исследования являются ветровые турбины с регулируемой скоростью и генераторами двойного питания. На рис. 1а показана схема генератора ветровой турбины, которая содержит генератор двойного питания, коробку передач и преобразователь с частичным номинальным значением. Во время работы основной вал передает механическую мощность от ротора к коробке передач, которая управляет вращени-

ем ротора генератора. Статор-генератор через трансформатор напрямую подключен к электрической сети. Ротор генератора подключается к трансформатору через преобразователь с частичным номинальным коэффициентом, который позволяет изменять скорость ротора генератора на 30 % выше и ниже синхронной скорости [5].

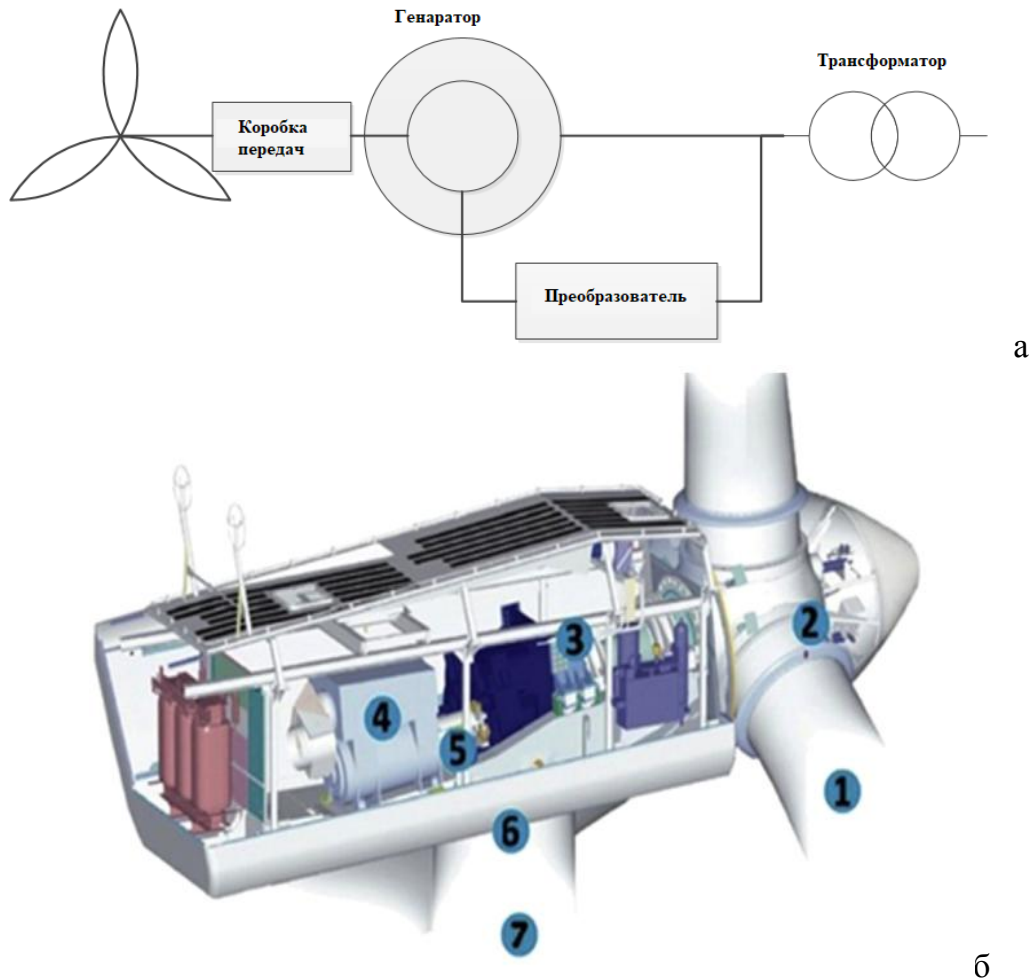


Рис. 1. Схема системы генератора ветровой турбины (а) и основная структура ветряной турбины: (1) лопасти, (2) ротор, (3) коробка передач, (4) генератор, (5) подшипники, (6) система рыскания и (7) башня

Неисправности в ветровых турбинах

Неисправности лопастей. По некоторым причинам ветряные турбины работают непосредственно на ветру, в дождь, снег и в других суровых условиях. Диаметр лопастей ветряных турбин становится все больше и больше, чтобы поглощать больше энергии ветра. Это позволяет легко привести к некоторым неисправностям непосредственно на лопастях, таким как дисбаланс ротора, лопасти и коррозия ступицы, трещины и серьезные аэроупругие отклонения в больших ветровых турбинах.

Неисправности коробки передач. Основная функция коробки передач – передача энергии ветра в генератор для достижения соответствующей скорости ввода. В настоящее время большая часть коммерчески доступных ветровых турбин эксплуатируется с фиксированным передаточным отношением между ротором турбины и электрическим генератором. Коробка с переменным отношением (VRG) позволяет ветротурбине с генератором постоянной скорости дискретно изменять скорость вращения ротора и достигать большей аэродинамической эффективности [7]. Чтобы получить более высокую скорость ввода и передаточное отношение, редуктор обычно спроектирован как солнцезащитный и планетарный редуктор с параллельной зубчатой структурой. Из-за продолжительной эксплуатации в плохих условиях работы, таких как тяжелая нагрузка, порыв ветра или пыль, неисправности редуктора ветровой турбины различны, например, дисбаланс вала, несоосность вала, повреждение вала, повреждение подшипника, повреждение зубчатой передачи, поврежденный вал, утечка масла, высокая температура масла и слабая смазка и т. д.

Неисправности генератора. Генератор может напрямую преобразовывать механическую энергию в электрическую. В ветровых турбинах обычно большинством производителей используются генераторы с асинхронным питанием, с двойным питанием. Долгосрочная работа генератора в электромагнитной среде может привести к некоторым общим отказам [6]: чрезмерная вибрация генератора, перегрев генератора, перегрев подшипника, аномальные шумы и повреждение изоляции и т.д.

Неисправности подшипника. Подшипники являются важными компонентами ветротурбин, как и в других вращающихся машинах, особенно в генераторах и коробках передач. Динамическое и непредсказуемое напряжение может привести к преждевременному износу подшипника, что приведет к увеличению стоимости технического обслуживания и даже к внезапным дорогостоящим разрушениям турбины. Перегрев – это еще одна типичная неисправность подшипников ветровых турбин, которая может повлиять на работу подшипников турбины.

Неисправности механической тормозной системы. Механический тормоз обычно применяется после закручивания лопастей, а электромагнитное торможение (если установлено) уменьшает скорость вращения вала. В противном случае, если отсутствует механический тормоз, компонент быстро будет изношен, если он будет использоваться непосредственно для торможения турбины с полной скоростью. В большинстве стран ветряные турбины требуются по закону для получения двух независимых отказоустойчивых тормозных механизмов, чтобы немедленно остановить турбину, когда это необходимо. С другой стороны, сбои в процессе торможения, например, когда скорость превышает предел, могут нанести серьезный ущерб основной структуре, особенно механическим узлам и лопастям. Не-

исправности в гидравлическом блоке также приведут к тому, что тормоза останутся включенными и увеличат время простоя.

В данной статье проведено сравнение результатов в различных исследованиях. Имеющиеся статистические данные из ветропарка в Индии [3], в Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm [7], в Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein по [5], шведского источника [6] (а), финского источника [6] (б) и немецких источников [6] (в) были использованы, чтобы найти репрезентативные значения за время простоя в размере сбоев для каждой подсистемы, оборудования и комплектующих. Компиляция наиболее интересных значений представлена в табл.

Таблица

Сравнение количественных результатов, представленных в литературе

Источник данных	Лит [6] (а)	Лит [6] (б)	Лит [6] (в)
Среднее количество отказов на каждую турбину в месяц	0,0335	0,115	0,198
Среднее время простоя в месяц	4,33	19,75	12,42
Среднее время простоя при сбое	170	172	62,6

На рис. 2 показано процентное соотношение отказов, произошедших с 2000 по июнь 2004 года на шведских ветровых электростанциях.

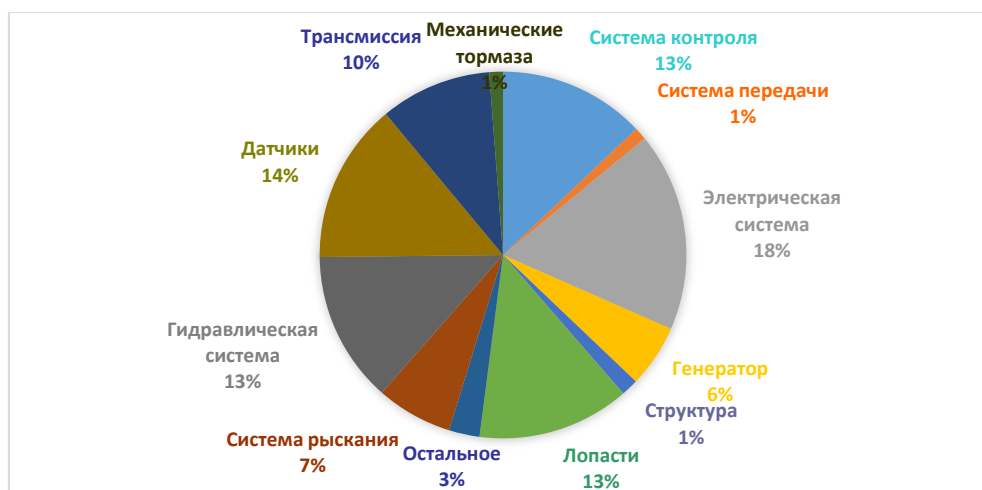


Рис. 2. Процентное соотношение отказов, произошедших на шведских ветровых электростанциях

Большинство отказов, которые относятся к электрическим и электронным компонентам, в основном происходят в мегаваттных ветровых турбинах. Можно сделать вывод, что наиболее частые отказы происходят в электрических компонентах в результате [5], [6] и [7]. Статистика показывает, что 80 % всех сбоев – в электрических и электронных компонентах. Край-

не важно улучшить эксплуатацию и техническое обслуживание, чтобы избежать электрических и электронных сбоев. Качество электронных компонентов должно быть учтено для уменьшения числа электронных отказов.

На рис. 3 показано процентное соотношение отказов, произошедших с января по июнь 2011 года (Китай) [3]. Большинство отказов (32,25 %) были связаны с системой регулирования лопастей, за которой следовали система управления (15,64 %) и датчики (12,7 %).

На рис. 3 показано распределение времени простоя на части ветропарка в течение шести месяцев. Результаты показывают, что отказ кабеля вызывает наибольшее количество простоя (2033 часа или 29,29 %), за которым следует система регулирования лопастей (14,74 %) и система управления (14,02 %).

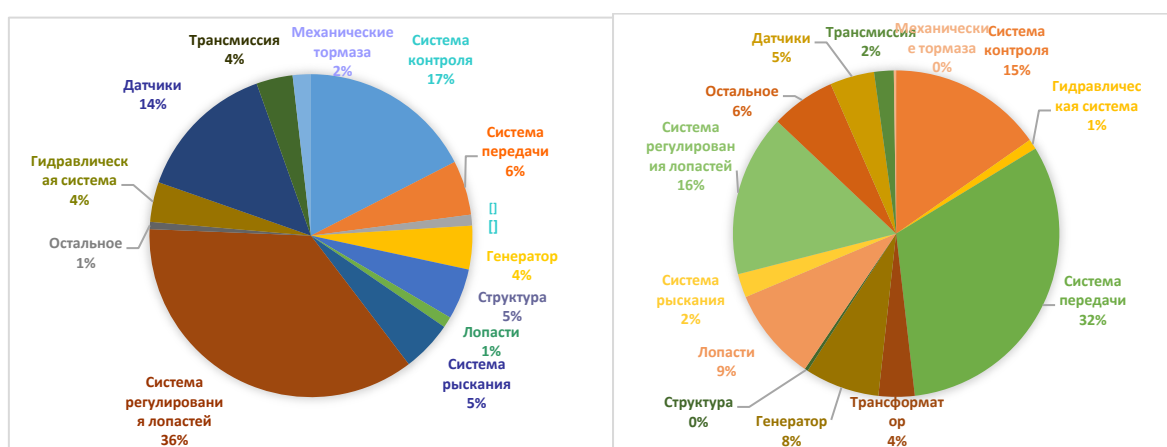


Рис. 3. Количество и время простоя отказов для каждой подсистемы, оборудования и компонента

Отмечается, что время простоя не учитывает «время на ремонт» и другие факторы, влияющие на время простоя.

Большинство отказов кабелей происходит на силовом кабеле между трансформатором и преобразователем. По оценкам, 87% отказов кабелей были вызваны похищением нейтральных проводников или повреждением третьей стороной. Если для предотвращения кражи кабеля будут приняты действия, время простоя из-за «отказа кабеля» значительно сократится. Остальные кабельные сбои вызваны коротким замыканием. Рассчитано, что среднее время простоя на отказ кабеля составляет 135,57 часа, что занимает второе место среди других типов сбоев после сбоев лопастей.

Различные исследования были сосредоточены на различных ветрогенераторах, которые имеют разные возможности, поэтому их результаты трудно сравнить.

Заключение. В этой статье было рассмотрено количество отказов и простоев для каждого компонента, оборудования и подсистемы ветровых турбин. В настоящей работе предпринимаются усилия, чтобы доказать, что

существует разница между статистическими результатами конкретных ветровых турбин и общими типами ветровых турбин. Важные выводы из настоящего анализа заключаются в следующем. Генератор может выйти из строя меньше других компонентов, но каждый из них приводит к большому простоя при сбое. Сбои кабелей вызвали наибольшие простои, более 2000 часов, по сравнению с другими отказами. По данным исследования [10], 87 % отказов кабелей вызваны повреждением третьей стороной. По сравнению с отказами небольших ветровых турбин отказы мегаваттных ветровых турбин в основном связаны с электрическими и электронными компонентами. Отказы коробки передач и системы управления частично связаны с отказами электрических систем, которые могут вызывать колебания электрического крутящего момента, а также механические повреждения в коробке передач и системе подшипников.

Библиографический список

1. Сироткин, Е.А. Состояние малой ветроэнергетики в мире / Е.А. Сироткин, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 5 (145). – С. 26–31.
2. Соломин, Е.В. Результаты испытаний и эксплуатации вертикально-осевых ветроэнергетических установок / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Е.Е. Соломин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 3 (15). – С. 70–83.
3. Ran Bi., A survey of failures in wind turbine generator systems with focus on a wind farm in China // Ran Bia and oth. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014.
4. Solomin, Evgeny Iterative Approach in Design and Development of Vertical Axis Wind Turbines / Evgeny Solomin, Irina Kirpichnikova, Andrey Martyanov // Applied Mechanics and Materials. – Volume 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering (09/2015; 792:582–589). International Conference for Young Scientists “ELECTRICAL ENGINEERING. ELECTROTECHNOLOGY. ENERGY”, June 9–12, 2015, Novosibirsk, Russia. – 2015. – Pp. 582–589.
5. Spinato, F. Reliability of wind turbine subassemblies // Spinato F., Tavner P.J., Bussel G.J.W., Koutoulakos E. // Journal of IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 1–15.
6. Ribrant J, Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997– 2005 // Ribrant J, Bertling L.M. // IEEE Trans. Energy Conversion, 2007, 22(1): 167–173.
7. Faulstich S. Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment / Faulstich S., Hahn B., Tavner P.J. // Journal of Wind Energy, 2011, 14(3): 327–337.

[К содержанию](#)