

группы. Это означает, что, несмотря на неполное окисление бурого угля, в качестве примесей при создании черного водорода могут выходить оксиды азота и серы, а также аммиак и сероводород, которые без улавливания способны нанести значительный вред окружающей среде и, в первую очередь, атмосферному воздуху.

Решение проблемы: согласно теории, при производстве бирюзового водорода при высокой температуре в ходе пиролиза образуется чистый углерод, который способен использоваться в дальнейшем в металлургии или иных сферах промышленности. В то же время его использование при создании черного водорода позволит избежать возникновения примесей с содержанием азота и серы, которые в рамках атмосферного воздуха являются куда более вредными, чем монооксид углерода, диоксид углерода и водяной пар, входящие в состав образующегося синтез-газа и наносящие куда меньший урон окружающей среде, поскольку в рамках реакции будет выступать уже не бурый уголь, а чистый углерод, без примесей. С точки зрения же соотношения по количеству необходимого углерода при производстве черного водорода и углерода, образующегося при создании бирюзового водорода, можно утверждать, что это также не противоречит экономической части. Так, при образовании 2 молей водорода бирюзового образуется 1 моль углерода из 1 моля метана. Для образования же 2 молей водорода при использовании 2 молей воды необходим 1 моль углерода. Это является приемлемым для экономической сферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савитенко М.А., Рыбаков Б.А. Применение водорода в энергетике: вопросы экологии // Турбины и дизели: аналитика. – 2021. – № 1. – С. 10–16.
2. Теплотворность различных видов топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// sovetingenera.com/otoplenie/o-drugoe/teplotvornost-razlichnyh-vidov-topliva.html](https://sovetingenera.com/otoplenie/o-drugoe/teplotvornost-razlichnyh-vidov-topliva.html) (Дата обращения 18.02.2024).
3. Попадько Н.В., Панков С.В., Попадько А.М. Водородная энергетика: этапы развития, проблемы и перспективы // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 1. – С. 293–296.
4. Арютонов С.В. Проблемы и вызовы водородной энергетики // Горение и плазмохимия. – 2021. – № 1. – С. 245–255.
5. Классификация водорода по цвету [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/?ysclid=lsrkmb60887143506](https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/?ysclid=lsrkmb60887143506) (Дата обращения 18.02.2024).

АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ПОДКЛЮЧАЕМЫХ К ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ж.В. Ефременко

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Ограниченные ресурсы углеводородов и экологические проблемы от их использования выступают двигателем развития возобновляемой энергетики. Особое внимание государства, инвесторов и научных работников уделяется стремительно развивающейся ветроэнергетике. Однако наряду с этим существуют трудности, преодоление которых является актуальной задачей.

1. Топологии ВЭУ

В докладе рассматривается классификация горизонтально-осевых ВЭУ по типу применяемых в них генераторов. Разбиение генераторов на типы осуществлено по критерию управления скоростью. Сделан акцент на способ соединения ветроколеса и генератора (редукторное или прямое), вид регулирования скорости вращения ветроколеса (с регулируемой или фиксированной скоростью) и на величину этой скорости (тихоходные или быстроходные ВЭУ).

1.1. Редукторные ВЭУ

ВЭУ подразделяются по способу соединения ротора электрогенератора и ветроколеса на ВЭУ с прямым приводом (безредукторные) и редукторные ВЭУ.

1.1.1. ВЭУ 1-го типа – ВЭУ с постоянной скоростью вращения вала ротора

В ВЭУ 1-го типа используется асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором. Частота вращения его ротора неизменна при работе ВЭУ в рабочем диапазоне скоростей ветра (на практике частота вращения варьируется в небольшом диапазоне), она зависит от количества пар полюсов генератора, величины скольжения, передаточного числа редуктора (выбирается с целью обеспечения выдачи электроэнергии с частотой, равной частоте сети) [1].

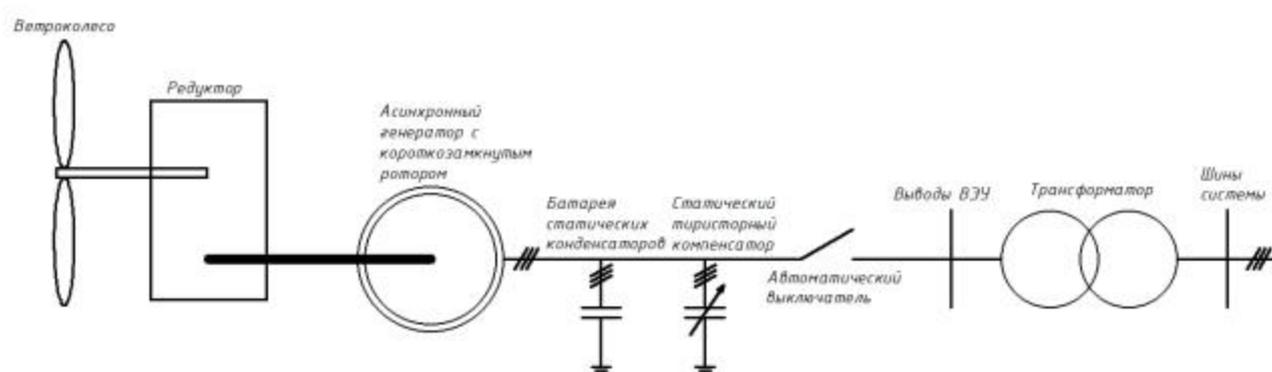


Рис. 1. Основные компоненты ВЭУ 1-го типа [2]

Подключение статорной обмотки электрогенератора к электросети 50 Гц выполняется напрямую через повышающий трансформатор. Для уменьшения реактивной мощности, потребляемой роторной обмоткой асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, параллельно ему подключается батарея конденсаторов.

Такой тип ВЭУ отличается высокой надежностью из-за отсутствия силового преобразователя и щеточного узла на роторе в сравнении с ВЭУ других типов, а также простотой и низкой стоимостью. Однако имеется ряд недостатков, основными из которых являются: невыработка электроэнергии в промежутки времени между троганием ветроколеса и набором номинальной частоты вращения (в переходных режимах), низкое качество выдаваемой электроэнергии. Данные недостатки послужили толчком к появлению иных типов ВЭУ.

1.1.2. ВЭУ с частично регулируемой скоростью вращения вала ротора

1.1.2.1. ВЭУ 2-го типа – асинхронный генератор с фазным ротором

Данный тип ВЭУ представляет собой редукторную установку, состоящую из ветроколеса и асинхронного генератора с фазным ротором, в роторную обмотку которого включаются резисторы. Регулирование скорости вращения ротора осуществляется путем изменения сопротивления обмотки ротора, поэтому данный тип ВЭУ имеет следующие интерпретации названия: ВЭУ с переменной скоростью вращения, ВЭУ с частично-регулируемой скоростью вращения, ВЭУ с динамическим сопротивлением ротора [3].

Такая топология ВЭУ позволяет увеличить выработку электроэнергии по сравнению с ВЭУ 1 типа, однако имеет ряд недостатков. Изменение скольжения (и, соответственно, скорости вращения) возможно осуществлять в достаточно малых пределах – от 2 до 5 % [4], электрические потери на нагрев в обмотке ротора достигают высоких значений, потребляется большое количество реактивной мощности из сети, сохраняется проблема низкого качества выдаваемой в сеть электрической энергии.

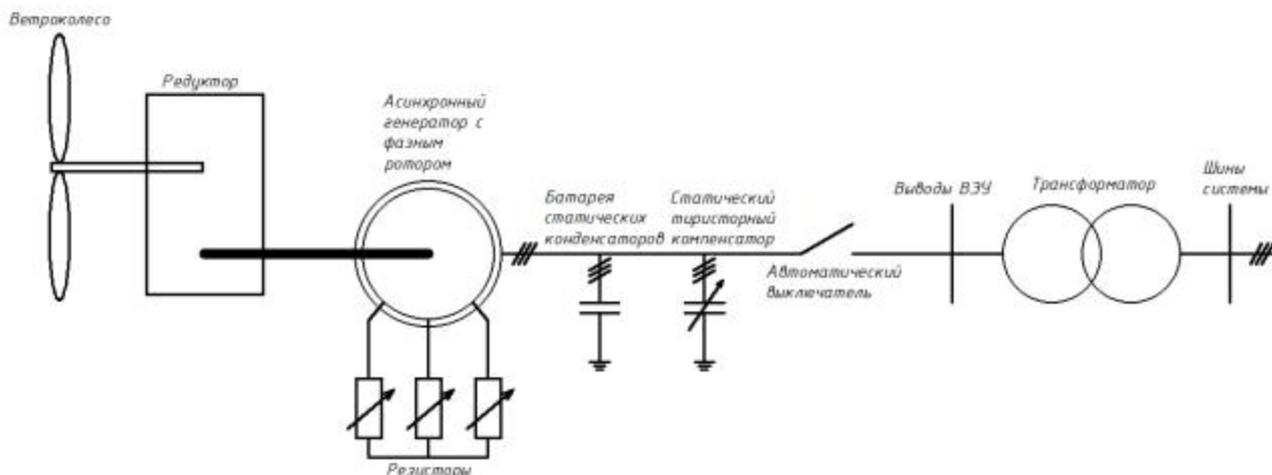


Рис. 2. Основные компоненты ВЭУ 2-го типа [2]

1.1.2.2. ВЭУ 3-го типа – асинхронный генератор с двойным питанием

Топология ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания представляет собой ветроколесо, связанное с асинхронным генератором с фазным ротором через редуктор. Подключение генератора к электросети осуществляется через трехобмоточный трансформатор, обмотки которого подключены следующим образом: первая – к выводам статора генератора, вторая – к щеткам, обеспечивающим контакт с контактными кольцами ротора, третья – к основной сети переменного тока. Между выводами ротора и обмоткой трансформатора устанавливается преобразователь AC/DC/AC для регулирования частоты и амплитуды напряжения в роторной обмотке. Через преобразователь проходит до 30 % установленной мощности генератора, остальные 2/3 мощности выдаются через статорную обмотку. Регулирование скорости вращения ротора генератора может осуществляться в пределах $\pm 30\%$ от синхронной частоты [5]. К достоинствам данного типа относят плавный пуск и компенсацию реактивной мощности, низкие потери в статоре, недорогой преобразователь, рассчитанный на треть мощности генератора. Однако имеются и недостатки: регулярное техническое обслуживание, ограниченное изменение частоты вращения, более высокие затраты на техническое обслуживание из-за наличия контактных колец и щёток (средний срок службы щёток составляет 6–12 месяцев), высокая общая стоимость ветрогенератора из-за использования редуктора (включая затраты на производство и регулярное техническое обслуживание).

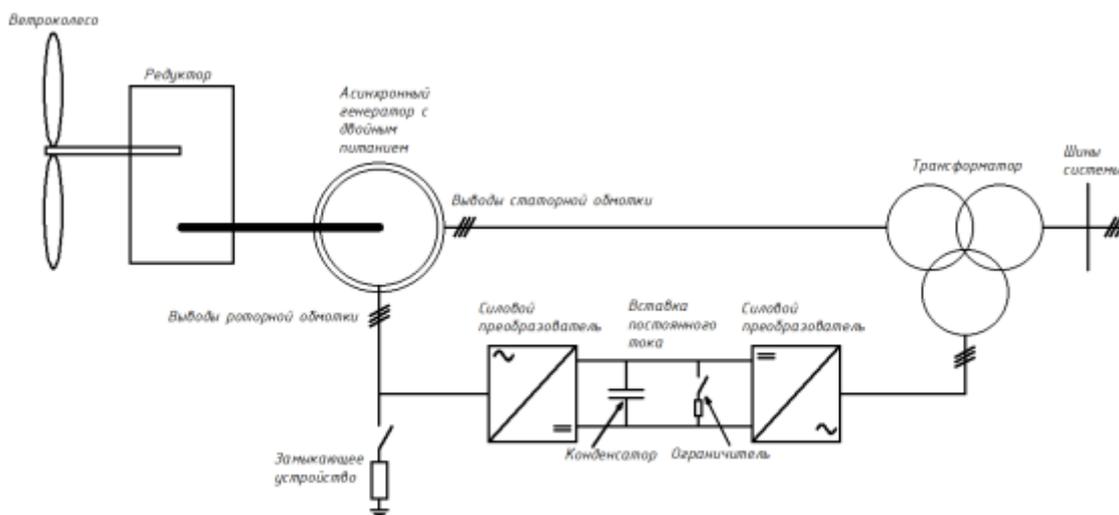


Рис. 3. Основные компоненты ВЭУ 3-го типа [2]

1.2. Безредукторные ВЭУ

Так как редуктор является самым слабым местом ВЭУ и зачастую выходит из строя раньше нормативного срока службы, то оправдано исключение данного узла из установки. Безредукторная ВЭУ 4-го типа состоит из синхронного генератора с электромагнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов.

Высокую надежность обеспечивает применение синхронного генератора с магнитным возбуждением. Ротор такого генератора представляет собой бочку, на внутренней части которой закреплены постоянные магниты, статор находится внутри ротора. Данная конструкция позволяет размещать большее число полюсов на роторе, а также не допускать вылета постоянных магнитов из пазов в роторе вследствие работы центробежной силы при вращении.

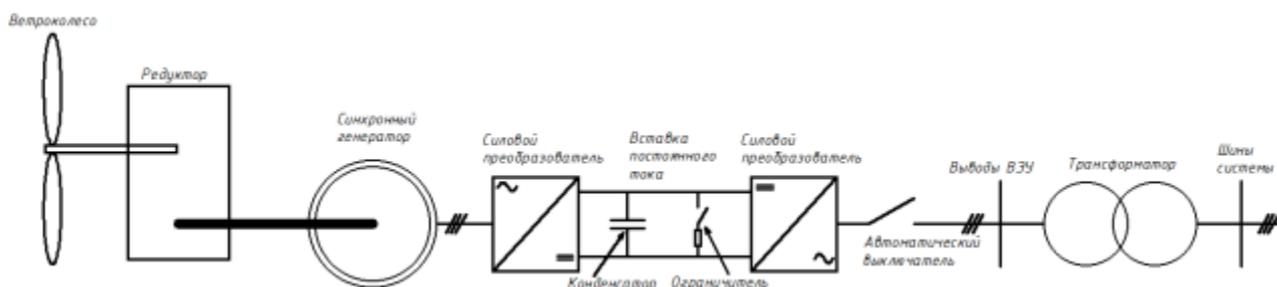


Рис. 4. Основные компоненты ВЭУ 4-го типа [2]

Преимуществами ВЭУ 4-го типа по сравнению с ВЭУ других типов являются:

- снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт из-за отсутствия редуктора;
- отсутствие коллектора, щеток и системы возбуждения (в случае магнитного возбуждения), что повышает надежность;
- уменьшение времени ремонтного простоя установки и низкий уровень шума за счет отсутствия редуктора;
- наиболее высокий КПД.

К недостаткам стоит отнести более высокую массу из-за габаритного генератора и высокий размер капитальных вложений в строительство из-за силового преобразователя, рассчитанного на полную мощность ВЭУ [1].

2. Актуальность применения ветроэнергетических установок в ЕЭС России

Ветроэнергетический потенциал Российской Федерации оценивается в значение 16500 ТВт·ч/год [6].

По состоянию на 1 января 2024 года введены в эксплуатацию и начали поставку мощности по договорам о предоставлении мощности 78 объектов (2420,04 МВт) ветрогенерации. Крупнейшей ВЭС на оптовом рынке электроэнергии и мощности является Кочубеевская ВЭС мощностью 210 МВт в Ставропольском крае. В 2023 г. 17 заявок по ветроэлектростанциям (ВЭС) на 738,5 МВт прошли конкурентный отбор мощности (плановая дата начала поставки мощности с 2025 по 2029 год) [7].

Наиболее подходящими регионами для развития ветрогенерации являются северные и юго-западные районы России вследствие высокой среднегодовой ветровой активности. Особый интерес представляют изолированные энергосистемы Дальнего Востока и Крайнего Севера, где эффективно строительство ветроэлектростанций для их совместной работы с малыми ГЭС, дизельными, биоэнергетическими или геотермальными установками [8].

Для работы на электроэнергетическую систему рекомендуется применять мощные ВЭУ 4-го типа, подключенные через вставку постоянного тока и трансформатор присоединения к узлу сети [9]. Это позволяет решить основную проблему ветроэнергетики – проблему обес-

печения требуемого качества электрической энергии, а также повысить надежность работы установки при выборе безредукторных ВЭУ.

Заключение

В докладе рассмотрены топологии ВЭУ, отражены преимущества и недостатки каждого типа. Рассмотрена актуальность применения ВЭУ в России, отмечен оптимальный вариант топологии ВЭУ для работы в составе энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bensalah A., Barakat G., Amara Y. Electrical generators for large wind turbine: Trends and challenges // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – № 18. – С. 6700.
2. ГОСТ Р. 54418.27. 1-2019 (МЭК 61400-27-1: 2015) Возобновляемая энергетика // *Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть*. – С. 27–31.
3. Santoso M.S.S., Singh M. Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants // NREL national laboratory of the US Department of Energy. – 2011. – С. 15–17.
4. Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Teodorescu, R.; Iov, F. Power Electronics in Wind Turbine Systems // In *Proceedings of the 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China, 14–16 August 2006*. – Vol. 1. – P. 1–11.
5. Hansen, A.D. *Generators and Power Electronics for Wind Turbines*. – John Wiley & Sons, Ltd.: West Sussex, UK, 2012.
6. Елистратов В.В. *Возобновляемая энергетика*. – 3-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 424 с.
7. Годовой отчет за 2023 г. Некоммерческого партнерства «Совет Рынка» [Электронный ресурс] // Ассоциация «НП Совет Рынка» [Официальный сайт]. – URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/1_godovoy_otchet_za_2023_god.pdf (дата обращения: 10.11.2024).
8. Гзенгер Ш., Денисов Р. Перспективы ветроэнергетического рынка в России // Интернет-ресурс. Режим доступа: <https://www.wwindea.org/wp-content/uploads/2017/06/170612-FES-Windenergie-rus-print.pdf> (дата обращения: 10.11.2024). – 2017.
9. Разживин И.А. *Всерезимное моделирование ветроэнергетической установки в электроэнергетической системе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.14.02 : дис.* – 2019.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЗА СЧЕТ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЧАСТИ ЕЕ МОЩНОСТИ

Е.А. Бернякович

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41

Научный руководитель: Н.Ю. Рубан, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

