

Результатами исследований автономного источника питания ЗБС стало:

1. Выбор конструктивного решения (числа полюсов) магнитоэлектрического генератора, с учетом требуемых значений индукции в магнитопроводе и технологических факторов.
2. Выявлена необходимость проведения комплексных расчетов, объединяющих в себе исследования магнитного поля и работы цепи преобразования и управления.
3. Проведен обзор программных продуктов и выбрано программное обеспечение, позволяющие провести комплексное исследование

Дальнейшие исследования по данной тематике будут заключаться в проведение комплексного имитационного моделирования с помощью указанного программного обеспечения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Качин О.С., Киселев А.В. Исследование режимов работы системы синхронный генератор – схема питания – нагрузка с применением современных пакетов Maxwell и Simplorer [Электронный ресурс] // Научное издание. – 2012 – №. 4 – С. 1–8.
2. Грачев Ю.В., Варламов В.П. Автоматический контроль в скважинах при бурении и эксплуатации. М., Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 2009
3. Генераторы питания скважинной аппаратуры научно-производственного предприятия «Самарские горизонты» [Электронный ресурс]. –Режим доступа : <http://www.sagor.ru/equipment/geo/generators.htm>, свободный.

Научный руководитель: А.В. Киселев, к.т.н., ассистент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ.

### **РЕКУПЕРАЦИОННО-ТЕПЛОВАЯ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ**

С.М. Минько

Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПП, группа 5АМ6К

Рекуперационно-тепловая воздушно-аккумулятивная электростанция (ВАЭС) [Рис. 1], размещенная внутри теплоизолирующей трубы объединяет в своей конструкции 3 накопителя энергии (воздушно-аккумулятивный накопитель баллонного типа, маховиковый накопитель, тепловой накопитель) и рекуперационно-тепловую электростанцию полной мощностью 7500 КВА (6 МВт при  $\cos \varphi = 0,8$ ) и с базовым КПД турбины в 90% [1].

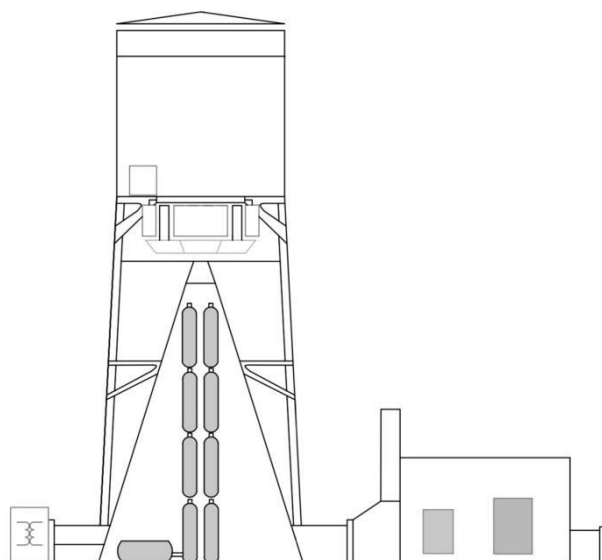


Рис. 1. Схема рекуперационно-тепловой воздушно аккумулирующей электростанции

Принцип работы ВАЭС: за счёт внешней электроэнергии (в т.ч. от передвижных ГТУ или ДЭС) 2 компрессора закачивают воздух в систему ресиверов ВАЭС. Общая ёмкость системы ресиверов ВАЭС составляет  $1120 \text{ м}^3$  под давлением 14 бар. Воздух из двух верхних ресиверов через клапаны давления стравливается в центральную трубу и подаётся в сопло напорной камеры. Под действием пускового давления воздуха (14 бар) алюминиевая турбина ВАЭС, не имеющая вала и механических подшипников, свободнолежащая на опоре сопла напорной камеры, поднимается на нормативную высоту 5 см и раскручивается в режиме ускорения до нормативной скорости в 125 об/мин (частота 50 Гц при 24 парах полюсов). Строго вертикальный подъём и не замыкание ротора на статоры (в генераторе ВАЭС предполагается использование 2 статоров [2]) обеспечивают два боковых магнитных подшипника. Не допускает подъёма турбины выше нормативного уровня верхний магнитный ограничитель. Выход на нормативный режим работы осуществляется за 6-10 секунд. После выхода турбины и ротора ВАЭС на нормативный режим работы уровень давления воздуха снижается до уровня поддерживающего давления (расчётный показатель 8,4 бар).

Во время пуска энергоустановки ВАЭС вся вырабатываемая статорами генератора электроэнергия направляется на электрический нагреватель ВАЭС. После выхода турбины и ротора ВАЭС на нормативный режим работы электроэнергия отправляется на трансформаторную подстанцию и далее по следующим направлениям:

- 1/6 мощности (1 МВт) – на компрессор ВАЭС с целью восстановления истраченного на запуск ВАЭС запаса сжатого воздуха;
- 5/6 мощности (5 МВт) – внешним потребителям.

Компрессор Centac C1000 [3] ВАЭС мощностью 1 МВт, работая в нормативном режиме (производительность  $200 \text{ м}^3/\text{мин}$ , давление 10,3 бар) примерно за 5-6 минут полностью восстановит весь истраченный при пуске установки ВАЭС запас сжатого воздуха и, при этом, обеспечит поддержание нормативного уровня рабочего давления в сопле ВАЭС.

Тепло, выделившееся в процессе работы компрессора, ресиверов, электронагревателя, трансформаторов ВАЭС нагреет окружающий воздух. Под действием силы тяги в трубе этот тёплый воздух поднимется вверх к соплу напорной камеры. За счёт притока этого тёплого воздуха по закону состояния идеального газа в сопле повысится уровень давления воздуха. Автоматика ВАЭС, пропорционально повышению давления воздуха от притока дополнительного теплого воздуха, будет сокращать подачу в сопло напорной камеры сжатого воздуха из ресивера. Таким образом, в сопле напорной камеры будет поддерживаться постоянный нормативный уровень давления воздуха, что обеспечит постоянную скорость вращения турбины и ротора ВАЭС и постоянную выработку полной электрической мощности генератора ВАЭС (7500 КВА).

При сокращении потребности в электроэнергии ВАЭС со стороны потребителей, «лишняя» электроэнергия направляется на графитовый электронагреватель, покрытый базальтом и оксидом магния в нагревательной камере ВАЭС, что пропорционально увеличивает температуру и давление воздуха в нагревательной камере (электронагреватель становится тепловым накопителем энергии). Это позволяет сократить потребление сжатого воздуха из ресиверов ВАЭС, сократить время работы компрессора ВАЭС, и расходы электроэнергии на его работу. В случае обратного увеличения потребности в электроэнергии ВАЭС со стороны потребителей, распределительное устройство мгновенно перераспределит электроэнергию с электронагревателя внешнему потребителю. Такой режим работы турбины и генератора ВАЭС, при котором уровень давления воздуха, подаваемого на турбину, скорость вращения турбины, и выдаваемая электрическая мощность генератора являются константами, на меняющимися во времени в течение многих лет, позволяет использовать силу инерции вращения турбины и ротора в качестве дополнительного источника энергии (принцип действия маховикового накопителя энергии).

Режим работы ВАЭС позволяет её использовать в качестве автономного источника электроснабжения удаленных населенных пунктов, не подключенных к общественной электросети. При этом электроэнергия, производимая ВАЭС, будет качественной (частота 50 Гц +/- 0,1%), недорогой (себестоимость производства 0,4 руб за 1 кВт·ч) и экологически чистой.

Конструкция ВАЭС позволяет использовать для выработки электроэнергии и ветровую и солнечную энергию. В комплексе с рекуперационно-тепловой ВАЭС технологию производства ветровой и солнечной электроэнергии можно предельно упростить. Если электроэнергию с генератора ветряка без преобразования направить на ТЭН в нагревательной камере ВАЭС, то мы, за счёт этой энергии, с высоким КПД получим электроэнергию с частотой 50 Гц на генераторе ВАЭС. В этом случае на ВЭС становятся излишними все преобразующие электроприборы (выпрямитель, аккумулятор, инвертор и трансформатор). Точно также, если постоянный ток с солнечных панелей направить на ТЭН в нагревательной камере ВАЭС, то мы преобразуем эту энергию в электроэнергию ВАЭС с высоким КПД. И тогда излишними становятся инвертор и трансформатор в СЭС. ТЭН одинаково преобразует в тепловую энергию электрическую энергию любого качества (переменный ток неопределённой частоты, постоян-

ный ток, ток частотой 50 Гц) – важно только не смешивать эти токи в одном проводнике.

В данной комплексной ветро-солнечной ВАЭС ветряки и солнечные панели выступают просто дополнительным оборудованием к ВАЭС и обслуживаются персоналом ВАЭС. Учитывая, что ВАЭС работает в автоматическом режиме, то для её обеспечения её работы нужен только один человек. Так как один человек не может работать непрерывно 24 часа в сутки, то можно оценить количество необходимого персонала для работы ветро-солнечной ВАЭС мощностью 6 МВт в 4 человека. Таким образом, производительность труда на такой комплексной ветро-солнечной ВАЭС будет сопоставима с производительностью труда на средней ТЭС, и будет существенно выше производительности труда на ВЭС и СЭС.

Технологическая связка с ВАЭС позволяет и принципиально иначе - существенно эффективнее организовать процесс преобразования солнечной и ветровой энергии в электрическую. Электрический КПД кремниевых солнечных панелей составляет 10-15%. 85-90% энергии солнца на солнечных панелях превращается в тепловую энергию и теряется посредством излучения в атмосферу. Но есть известный способ улавливания, концентрации и направления в нужное место световой энергии с помощью стеклянных линз и оптического кабеля. То есть, солнечную энергию в ВАЭС можно улавливать панелями, оснащенными не кремниевыми фотоэлементами, а стеклянными линзами, которые концентрируют солнечную энергию и по стеклянному оптическому кабелю могут её направить непосредственно в нагревательную камеру ВАЭС. Световая энергия, направленная с оптического кабеля на нагреватель чёрного цвета, расположенный внутри нагревательной камеры ВАЭС, с КПД близким к 100% превратится в тепловую энергию нагревателя. Нагреватель, принимающий концентрированную солнечную энергию, целесообразно изготовить из дешевого черного камня обсидиан с температурой плавления 1300-1500°С. Нагреватель нагреет воздух, этот тёплый воздух через сопло напорной камеры попадёт на турбину ВАЭС, что обеспечит выработку электроэнергии ВАЭС с КПД, близким к 90%. Таким образом, КПД преобразования энергии солнца, улавливаемого стеклянными панелями, и направляемыми в ВАЭС можно оценить в 75-80%, что в 8 раз выше сегодняшнего уровня. При этом стеклянные линзы намного дешевле кремниевых фотоэлементов.

Сегодня электроснабжение населенных пунктов, не подключенных к общественной электросети, осуществляют, как правило, дизельные электростанции (ДЭС). После пуска ветро-солнечной ВАЭС работу старых неэкономичных ДЭС можно прекратить, но их нельзя демонтировать – целесообразнее их сохранить в качестве резервной электростанции. Дело в том, что в случае остановки работы ВАЭС (хотя вероятность этого события очень незначительна) - запустить её в работу обратно без внешней электроэнергии, на уровне 1-2 МВт мощности, невозможно. Именно для этого случая в изолированных населенных пунктах будет целесообразно держать в резерве ДЭС с запасом топлива на 1-2 суток работы.

Мощность типовой ВАЭС на уровне 7500 КВА (6 МВт при  $\cos \varphi = 0,8$ ), как правило, превышает текущую потребность изолированного населённого пункта в электроэнергии. Но предлагается строить ВАЭС именно этой мощности, так как ВАЭС меньшей мощности экономически неэффективна, а при снижении стоимости электроэнергии происходит рост её потребления.

Стоимость строительства комплексной ветро-солнечной ВАЭС полной мощностью в 7500 КВА в удаленной местности составит около 280-300 миллионов рублей в ценах 2017 года. Таким образом удельные капитальные затраты на 1 кВт мощности составят около 900 \$, что выше уровня современных ТЭС, но ниже уровня удельных капитальных затрат в АЭС, ГЭС, СЭС и ВЭС. Срок окупаемости строительства ветро-солнечной ВАЭС зависит от уровня цен на электроэнергию и размера бюджетных дотаций, которые сегодня применяются в отношении действующей дизельной электростанции изолированного населенного пункта. Средний уровень себестоимости электроэнергии, производимой сегодняшними ДЭС, составляет от 10 до 20 рублей за 1 кВт·ч. Себестоимость электроэнергии ветро-солнечной ВАЭС, работающей с отпускной мощностью в 5 МВт составит 0,4-0,6 руб за кВт·ч, с отпускной мощностью 1 МВт (коэффициент использования установленной мощности в 20%) – 2-3 руб за кВт·ч. Соответственно экономия в год при отпускной мощности в 5 МВт составит 83,2 млн. руб, а при отпускной мощности в 1 МВт – 61,3 млн. руб. Срок окупаемости при 5 МВт и 1 МВт 3,6 года и 4,9 лет соответственно.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Интех ГмбХ. Турбодетандеры. Режим доступа: [http://www.intech-gmbh.ru/turbine\\_expanders.php](http://www.intech-gmbh.ru/turbine_expanders.php)
2. R. Suhairi, R.N. Firdaus. Performance Characteristics of Non - Arc Double Stator Permanent Magnet Generator | Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 53, 201 – 214, 2017
3. Ingersoll Rand/Centac C1000 Centrifugal Air Compressor. Режим доступа: <https://www.ingersollrandproducts.com/en-eu/air-compressor/products/centrifugal-compressors/c1000-centrifugal-air-compressor-23581.html#tab-2-45b0281d-a015-4b34-9cc6-b3ce51016171>

Научный руководитель: И.А. Рахматуллин, к.т.н., доцент каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.