



РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ВОЗДУХО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Федюхин А.В., Дронов С.А., Семин Д.В., Гусенко А.Г., Панарин В.Э.

Национальный исследовательский университет, «МЭИ», г. Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-1819-0450, Fediukhinav@mpei.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка лабораторного стенда воздухо-аккумулирующей электростанции и расчет ее режимов работы с использованием программных пакетов Aspen HYSYS и ANSYS. *МЕТОДЫ.* Авторами была разработана экспериментальная установка воздушно-аккумулирующей электростанции мощностью 1 кВт. Принцип действия установки заключается в закачивании компрессором сжатого воздуха в ресивер, с последующим выпуском воздуха из ресивера в детандер оригинальной конструкции, который вырабатывает электрическую энергию. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В процессе разработки опытного образца были изготовлены 4 шестерни из различных конструкционных материалов: нержавеющая сталь марки AISI 304, латунь марки ЛС59-1 и полиацеталь марки ПОМ-С. В ходе сборки, притирки и обкатки опытным путем было установлено, что оптимальным решением с точки зрения антифрикционных характеристик, прочности и большего ресурса является применение шестерен из полиацетала. Для моделирования режимов работы лабораторного стенда была составлена модель в программном пакете Aspen HYSYS. Необходимость в динамической модели возникла для моделирования процесса разгрузки ресивера. Представлен график изменения расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения регулирующего клапана. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* К плюсам применения ВАЭС в качестве способа аккумулирования электрической энергии можно отнести высокую маневренность и работу в широких диапазонах температуры и давления, что делает такие электростанции более дешевыми и долговечными. ВАЭС аккумулирует энергию в форме сжатого воздуха, который в дальнейшем идет на выработку электроэнергии во время пиков нагрузки.

Ключевые слова: воздухо-аккумулирующая электростанция; ВАЭС; накопитель энергии; возобновляемая энергетика; воздушная турбина.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700/>.

Для цитирования: Федюхин А.В., Дронов С.А., Семин Д.В., Гусенко А.Г., Панарин В.Э. Разработка лабораторного стенда воздухо-аккумулирующей электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 179-188. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-179-188.

DEVELOPMENT OF LABORATORY UNIT OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

AV. Fedyukhin, SA. Dronov, DV. Semin, AG. Gusenko, VE. Panarin

National Research University, MPEI, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-1819-0450, Fediukhinav@mpei.ru

Abstract: *PURPOSE.* Development of a laboratory unit for a compressed air energy storage and calculation of its operating modes using Aspen HYSYS and ANSYS software packages. *METHODS.* The authors have developed an experimental unit of a compressed air energy storage and calculation with a capacity of 1 kW. The principle of operation of the unit consists in pumping compressed air into the receiver by a compressor, followed by the release of air from the receiver into the expander of the original design, which generates electrical energy. *RESULTS.* During the

development of the prototype, 4 gears were made of various structural materials: AISI 304 stainless steel, LS59-1 brass and POM-S polyacetal. During assembly, lapping and running-in, it was found experimentally that the optimal solution in terms of antifriction characteristics, strength and longer service life is the use of gears made of polyacetal. To simulate the operating modes of the laboratory stand, a model was compiled in the Aspen HYSYS software package. The need for a dynamic model arose to simulate the process of unloading the receiver. A graph of the change in air flow at the inlet to the expander depending on the position of the control valve is presented. **CONCLUSION.** The advantages of using CAES as a method of accumulating electrical energy include high maneuverability and operation in wide ranges of temperature and pressure, which makes such power plants cheaper and more durable. The CAES accumulates energy in the form of compressed air, which then goes to generate electricity during peak loads.

Keywords: compressed air energy storage; CAES; energy storage; renewable energy; air turbine.

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation Grant No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700>

For citation: Fedyukhin AV., Dronov SA., Semin D.V., Gusenko AG., Panarin V.E. Development of laboratory unit of compressed air energy storage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(5):179-188. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-179-188.

Введение

Важной задачей является выравнивание графика суммарной нагрузки потребителей. Для решения этой задачи вводится дифференцированная стоимость электроэнергии в зависимости от времени, в котором происходит пик нагрузок. Таким образом, при потреблении в часы пиковых нагрузок стоимость устанавливается выше. В связи с этим потребители пытаются подстраиваться и снижать потребление электроэнергии в пиковый период. Периодический запуск и остановка ТЭС не позволяют решить проблему регулирования мощности из-за больших временных затрат на данные мероприятия. На включение тепловой станции потребуется не один час. Кроме того, частое включение и выключение блоков крупных ТЭС приводят к увеличенному износу оборудования, увеличению расхода топлива – все это сказывается на надежности станции [1]. Поэтому, в настоящее время использование аккумулирующих станций для покрытия дефицита мощности в пиковые часы является перспективным направлением, так как на их полный запуск требуется несколько минут. Одной из таких электростанций является воздушно аккумулирующая электростанция (ВАЭС), которая располагает запасом сжатого воздуха. Энергия сжатого воздуха затрачивается для приведения в действие турбин, вращающих генераторы, которые будут отдавать свою энергию в сеть во время пиковых нагрузок.

Литературный обзор

Улучшение электрических режимов в энергосистеме возможно в случае реализации программ строительства энергоэффективной пиковой генерации или аккумулирования электрической энергии [2-4]. Отечественный опыт строительства крупных аккумулирующих станций на сегодняшний день ограничен внедрением гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), среди которых стоит выделить Загорскую ГАЭС, Кубанскую ГАЭС [5]. Кубанская ГАЭС представляет собой средненапорную деривационную гидроаккумулирующую электростанцию. Она расположена в п. Водораздельный Карачаево-Черкессии на Большом Ставропольском канале и запущена в эксплуатацию в 1968 – 1969 гг. На станции установлено 6 обратимых радиально - осевых турбин 63НТВ-30 с расходом воды 11,3 м³/с в турбинном режиме и 10,5 м³/сек. насосном режиме. Также на станции имеется 6 генераторов ВГДС 260/64-20 мощностью 2,65 МВт в турбинном режиме и 2,4 МВт в насосном режиме. Работу ГАЭС обеспечивает земляная плотина высотой 12 метров (расчетный напор – 24 метра) и длиной 6800 метров, а также КРУЭ 110 кВ. Загорская ГАЭС – это крупнейшая в России гидроаккумулирующая электростанция, расположенная на реке Кунья в Загорском районе Московской области. Первая очередь ГАЭС (Загорская ГАЭС – 1), мощностью 1200 МВт в турбинном режиме и 1320 МВт в насосном режиме была запущена в эксплуатацию в 1987 – 2000 годах, вторую очередь (Загорская ГАЭС – 2) проектной мощностью 840 МВт в турбинном режиме и 1000 МВт в насосном режиме планируют запустить в 2024 году.

Другие популярные накопители – литий-ионные аккумуляторы неплохо зарекомендовали себя на транспорте и набирают популярность в использовании в качестве накопителей энергии для автономного электроснабжения [6]. Однако в случае холодных температур ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) их эффективность падает, а дополнительные мероприятия по теплоизоляции повышают стоимость $1\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ с $30 - 50$ тысяч рублей в средней полосе России до 100 тысяч в условиях низких температур. Опыта массового внедрения литий-ионных накопителей в условиях севера в России еще нет. В то же время при высоких температурах ($+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше) существует опасность воспламенения литий-ионных батарей поэтому их эксплуатация в жарком климате тоже находится под вопросом.

Перспективными областями хранения энергии также являются проточные окислительно-восстановительные батареи и системы хранения водородной энергии [7]. Проточные батареи в принципе напоминают аккумуляторы, но в отличие от обычных батарей, они отличаются от обычных батарей тем, что электролиты в них находятся не в самом реакторе, а поступают в него из отдельных емкостей вне зоны реакции. Это позволяет легко увеличить емкость аккумулятора. Системы хранения водородной энергии состоят из блока генерации водорода (кроме электролиза воды, такой блок включает в себя обработку воды, электролизные ячейки, очистку водорода и сушку), блока хранения (обычно баллоны или ресиверы с водородом, сжатым до давления $35 - 900$ бар) и электрохимического генератора энергии (в случае из твердополимерных топливных элементов на выходе получается $50 - 55\%$ электроэнергии и до 35% тепла).

Такие технологии как маховики, проточные накопители электроэнергии, лифты твердых грузов существуют в России только в виде лабораторных образцов и их развитие в стране пока что находится под вопросом. Поэтому использование достаточно простых по конструкции и работающих на протяжении нескольких десятилетий воздушно-аккумулирующих электростанций является перспективным решением [8, 9].

Активной разработкой различных тепловых схем ВАЭС занимаются ряд научных коллективов США, Германии, Индии и Китая [10 – 12]. Мировой опыт эксплуатации ВАЭС (преимущественно в Германии и США) вкупе с заметной тенденцией к развитию данной отрасли (проекты ВАЭС *United Technologies*, *Seneca* ВАГТЭ Матагорда, Нортон и пр.) показывает большую заинтересованность в использовании подобных пиковых или околорезервных установок [13, 14]. Среди российских исследователей стоит отметить коллектив в лице Ольховского Г.Г., Казаряна В.А. и Столяревского А.Я., которые в работе [15] представляет всестороннее исследование перспектив применения ВАЭС в России и мире с анализом различных схемных модификаций и разработкой конкретных технических решений в части подбора оборудования для ВАЭС.

Материалы и методы

На кафедре Промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ» была разработана экспериментальная установка воздушно-аккумулирующей электростанции малой мощности 1 кВт . Принципиальная схема установки с расположением КИПа изображена на рисунке 1. Установка состоит из поршневого компрессора со встроенным ресивером марки *Fubag B5200B/200 CT4* объемом 200 л , создающим давление в 10 бар , заявленной производительностью 530 л/мин , потребляемой мощностью 3 кВт .

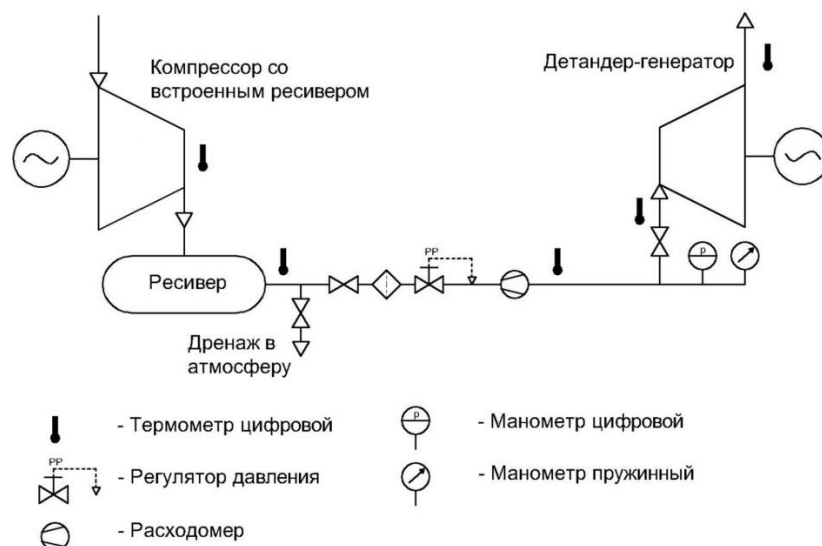


Рис.1. Принципиальная схема ВАЭС мощностью 1 кВт Fig.1. Schematic diagram of a 1 kW CAES

Принцип действия установки заключается в закачивании компрессором сжатого воздуха в ресивер, с последующим выпуском воздуха из ресивера в детандер оригинальной конструкции, который вырабатывает электрическую энергию. На рисунке 2 показан общий вид экспериментальной установки.



Рис.2. Внешний вид ВАЭС мощностью 1 кВт

Fig.2. View of a 1 kW CAES

Прототип воздушного детандера (рис. 3) должен обеспечивает выработку электрической энергии и обладает следующими основными техническими характеристиками:

- Номинальная электрическая мощность - 1 кВт;
- Номинальное напряжение - 28 В (постоянный ток);
- Номинальное давление воздуха на входе в детандер - $0,3 \div 0,6$ МПа;
- Расход воздуха через турбину при номинальной нагрузке – $80 \div 120$ м³/ч;
- Частота вращения роторов турбин при номинальной электрической нагрузке - 5000 об/мин.

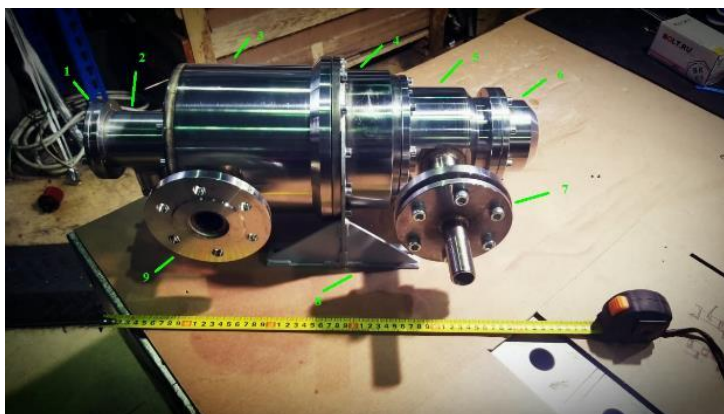


Рис.3. Прототип детандера: 1 - крышка электрической распределительной коробки; 2 - электрическая распределительная коробка; 3 - корпус генератора; 4 - промежуточный корпус (корпус муфты привода); 5 - кожух; 6 - крышка полости шестерен синхронизатора вращения роторов; 7 - входное отверстие труба; 8 - монтажный кронштейн; 9 - выпускная труба.

Fig.3. Expander prototype: 1 - electrical junction box cap; 2 - electrical junction box; 3 - generator casing; 4 - intermediate casing (drive clutch casing); 5 - casing; 6 - cap of the cavity of the gears of the synchronizer of rotation of the rotors; 7 - inlet pipe; 8 - mounting bracket; 9 - outlet pipe.

Для обеспечения синхронности вращения роторов предусмотрены косозубые синхронизирующие шестерни, закрепляемые на хвостовиках валов роторов. Шестерни располагаются в полости синхронизатора, образуемой торцевым фланцем корпуса детандера и объемной крышкой. В процессе разработки опытного образца были изготовлены 4 шестерни из различных конструкционных материалов: нержавеющая сталь

марки AISI 304, латунь марки ЛС59-1 и полиацеталь марки ПОМ-С. В ходе сборки, притирки и обкатки опытным путем было установлено, что оптимальным решением с точки зрения антифрикционных характеристик, прочности и большего ресурса является применение шестерен из полиацетала. Применение биметаллической пары нержавеющая сталь/латунь хотя и обеспечивает нормальное вращение роторов детандера, однако наблюдается механический износ шестерен, и без применения смазочных материалов длительная эксплуатация невозможна. На рисунке 4 показаны синхронизирующие шестерни, изготовленные из различных конструкционных материалов и кулачковые роторы, изготовленные из полиацетали марки ПОМ-С. Кулачок (тело ротора) в поперечном сечении имеет 8-образную форму. Центральное отверстие предназначено для напрессовки кулачка на стальной вал, боковые отверстия сделаны с целью облегчения ротора. Фиксация кулачка на валу ротора обеспечивается посадкой с натягом и нанесением на сопрягаемые поверхности эпоксидного клея-фиксатора типа ВК-9 или аналогичного.

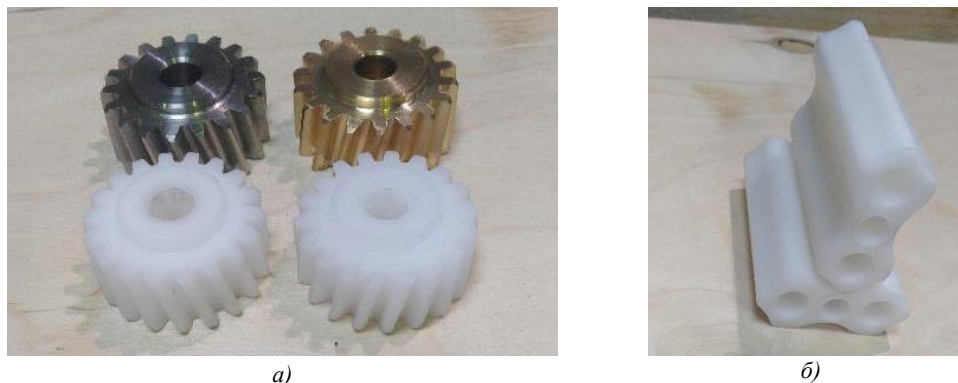


Рис.4. Синхронизирующие шестерни (а) и кулачковые роторы (б). *Fig.4. Synchronizing gears (a) and lobe rotors (b).*

Фиксация лепестка на валу ротора обеспечивается посадкой с натягом и покрытием сопрягаемых поверхностей эпоксидным клеем-фиксатором. Валы изготовлены из прутка из нержавеющей стали AISI 304. Валы установлены в корпусе генератора с помощью двухрядных шарикоподшипников SKF 4200 ATN9. На хвостовиках валов выполнены шпоночные пазы для установки синхронизирующих шестерен, и нарезана резьба для их фиксации гайками. Установка собранных роторов в корпус детандера осуществляется с помощью специального устройства, обеспечивающего их ортогональность относительно друг друга в момент установки. Шестерни расположены в полости синхронизатора, образованной торцевым фланцем корпуса детандера и объемным колпачком.

Результаты

Для моделирования режимов работы лабораторного стенда была составлена модель в программном пакете Aspen HYSYS (рис. 5). Для работы модели в динамическом режиме необходимо, чтобы количество уравнений технологической схемы совпадало с количеством переменных, если это не будет соблюдено, то программа выдаст ошибку и не сможет «запустить» модель. Главным достоинством динамического режима является возможность в реальном времени следить за всеми узлами системы. За это отвечает вкладка *Integrator*, которая позволяет управлять временем – ускорять его, замедлять, перематывать и инструмент *Strip Charts*, который является графическим самописцем. Все это позволяет понять, как работает модель в течение любого промежутка времени.

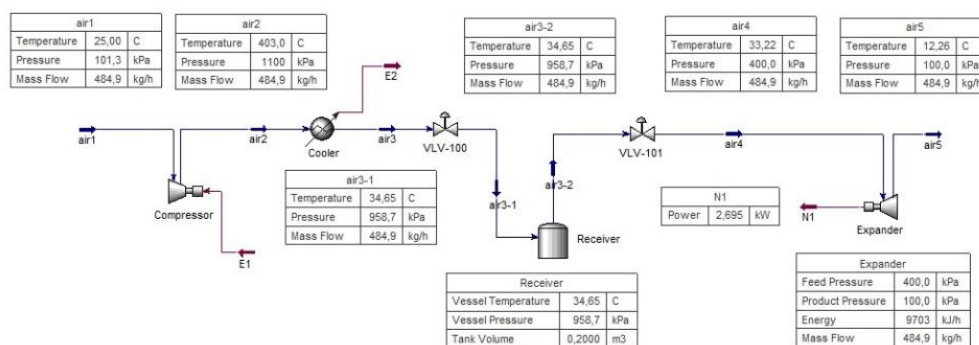


Рис.5. Динамическая модель в Aspen HYSYS

Fig.5. Dynamic model in Aspen HYSYS

В данной работе необходимость в динамической модели возникла для моделирования процесса разгрузки ресивера. Отслеживать все необходимые показатели в процессе симуляции мы будем при помощи инструмента *Strip Charts*, при открытии которого, необходимо задать максимальное количество точек и интервал, с которым они будут выводиться на экран. После чего, необходимо выбрать те показатели, за которыми требуется наблюдать. Сам процесс разгрузки ресивера, моделируется за счет изменения положения регулирующего клапана VLV-100, при постепенном закрытии которого давление и расход в системе будут уменьшаться, что позволит смоделировать разгрузку. Всего в данной работе будет пять положений открытия клапана: 100%, 75%, 50%, 25%, 0%, что позволит нам понять, как изменяются показатели во всем диапазоне работы модели.

На рисунке 6 представлен график изменения расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения регулирующего клапана. По графику видно, что с закрытием клапана происходит падение массового расхода воздуха за счет уменьшения проходного диаметра. Точно такой же процесс будет происходить при работе ресивера с отключенным компрессором. Объем воздуха в ресивере будет постепенно уменьшаться, что приведет к снижению давления и массового расхода. При полностью закрытом клапане имитируется полная разгрузка воздуха в ресивере, поэтому расход падает до нуля.

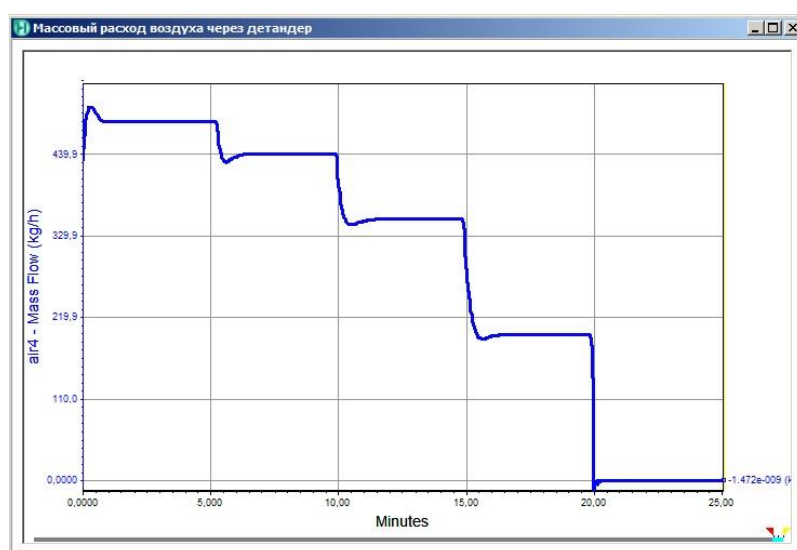


Рис.6. Изменение расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения клапана

Fig.6. Air flow at the inlet to the expander depending on the position of the valve

Дополнительно для моделирования истечения воздуха в проточной части была составлена трехмерная модель детандера в программном пакете ANSYS. Данные по скорости воздуха и профилю давления представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

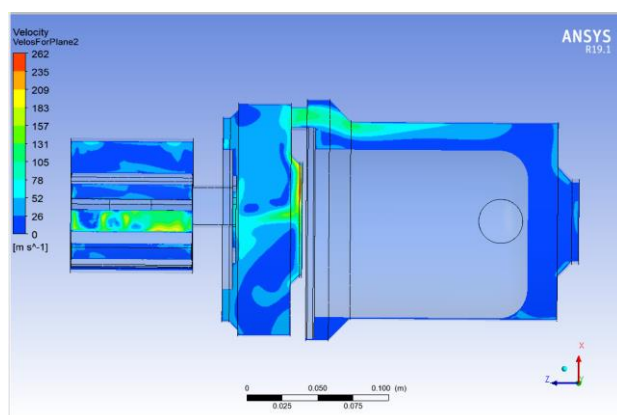


Рис.7. Скорость воздуха в детандере, м/с

Fig.7. Air velocity in expander, m/s

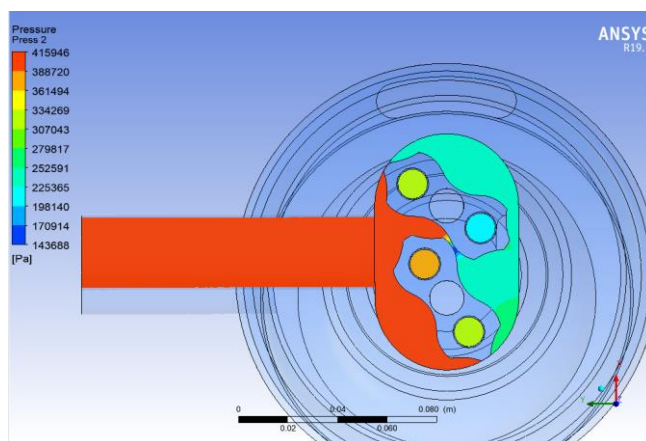


Рис.8. Профиль давления в детандере, Па

Fig.8. Pressure profile in expander, Pa

Обсуждение

В зависимости от режима использования можно выделить 2 комплектации установки – южную, с упором на выработку электроэнергии и холода для систем кондиционирования и северную, с упором только на выработку электроэнергии. В северном исполнении (рисунок 9) возможны три варианта – классический адиабатический (рисунок 9), изотермический и прямоточный. В первом случае тепло нагретого воздуха отбирается каким-либо теплоносителем (это может быть то же масло или гликоль), храниться отдельно от воздуха и используется для подогрева воздуха перед его редуцированием на пункте редуцирования или непосредственно перед турбиной. Во втором случае тепло, которое отводится из нагретого при сжатии воздуха используется для нужд теплоснабжения, а поступающий на турбину воздух подогревается, чтобы избежать выпадения углекислого газа в жидком виде. В третьем случае горячий воздух поступает в теплоизолированную емкость для его хранения, далее из этой емкости он по необходимости поступает на пункт редуцирования (если он предусмотрен) или на воздушную турбину.

Первый вариант выглядит значительно более предпочтительным по сравнению со вторым так как после нагрева воздух значительно увеличивается в объеме и отвод тепла позволяет снизить размеры необходимых для хранения сжатого воздуха емкостей. С целью повышения КПД установки находящийся под остаточным давлением на выходе из турбины воздух может быть направлен на компрессор для повторного сжатия, в этом случае значительно снижаются затраты электроэнергии на сжатие воздуха в компрессоре.

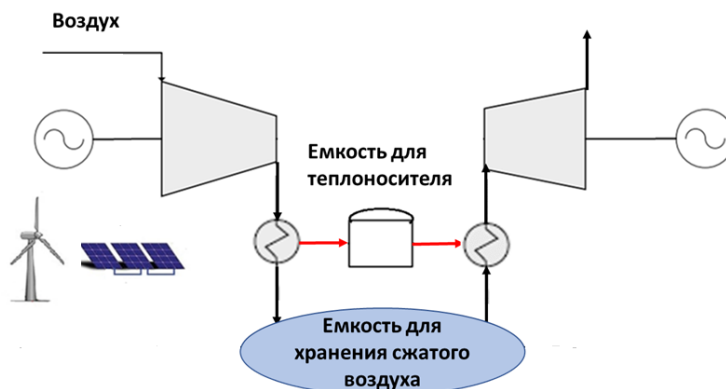


Рис.9. ВАЭС в северном исполнении

Fig.9. CAES in northern modification

В южном исполнении (рисунок 10) тепло выходящего из компрессора нагретого воздуха перед его помещением в емкость для хранения отводится (оно, в частности может быть использовано для нагрева воды для нужд горячего водоснабжения). При этом выходящий из емкости для хранения воздух идет на пункт редуцирования (или напрямую на воздушную турбину) без предварительного подогрева (или с минимальным подогревом чтобы избежать выпадения в турбине конденсата). Полученный на выходе из пункта редуцирования и воздушной турбины холодный воздух может нагреваться атмосферным воздухом. Охлажденный при этом атмосферный воздух используется для целей кондиционирования (возможен вариант его смешивания с неохлажденным атмосферным

воздухом). Как и в случае с северным вариантом для повышения КПД установки есть смысл рассмотреть вариант рекуперации находящегося под остаточным давлением воздуха из установки.

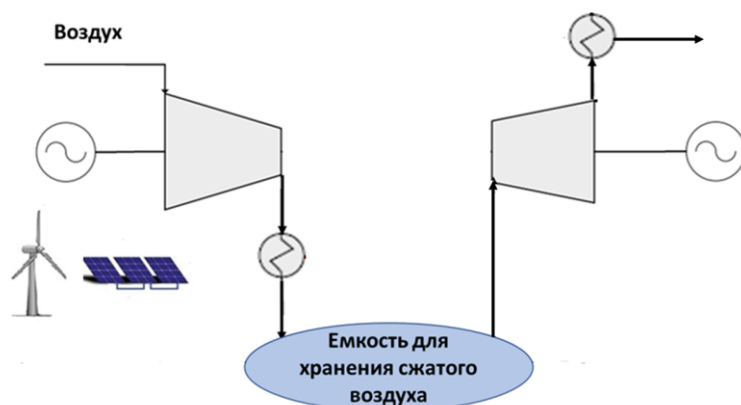


Рис.10. ВАЭС в южном исполнении

Fig.10. CAES in southern modification

При необходимости установка в южном исполнении может также отпускать отводящееся от воздуха после его компримирования тепло для нужд отопления и горячего водоснабжения, также возможна модификация установки с добавлением теплового контура, через который можно обеспечить при необходимости подогреть воздух перед его редуцированием.

Выводы

К плюсам применения ВАЭС в качестве способа аккумулирования электрической энергии можно отнести высокую маневренность и работу в широких диапазонах температуры и давления, что делает такие электростанции более дешевыми и долговечными. ВАЭС аккумулирует энергию в форме сжатого воздуха, который в дальнейшем идет на выработку электроэнергии во время пиков нагрузки. Цикл ВАЭС похож на цикл выработки энергии газотурбинной установки (ГТУ). Однако в цикле ГТУ турбина физически соединена с компрессором, а при использовании ВАЭС цикл сжатия воздуха протекает отдельно от циклов выработки электроэнергии. Не менее актуальным вопросом для Российской Федерации является возможность когенерации на базе ВАЭС, в частности, с выработкой дополнительной энергии на нужды теплофикации или холодоснабжения (в зависимости от особенностей региона и отдельно взятых потребителей).

Современный подход к интегрированию систем аккумулирования энергии на сжатом воздухе можно представить в виде иерархической структуры:

1. Глобальный подход – создание единой системы аккумулирования энергии всей равнинной части Российской Федерации. Географический критерий обусловлен нерациональностью использования для местности, на которой отсутствуют большие перепады высот, гидроаккумулирующих электростанций;

2. Региональный подход – внедрение ВАЭС высокой мощности для аккумулирования энергии крупных источников со слабыми возможностями регулирования отпускаемой в сеть электроэнергии (например, АЭС), замена крупных пиковых энергоустановок, использование комбинированных схем работы воздушных аккумуляторов с действующими крупными ТЭЦ и региональными ГРЭС, а так же совместная работа с установками возобновляемой энергетики (ветроэнергетическими установками и солнечными батареями);

3. Локальный подход – сочетание ВАЭС с иными современными энергоэффективными системами в рамках общей энергосистемы локального потребителя, оперативно реагирующего на изменение тарифов (т.н. «активный пользователь»).

Проработка подобного подхода вкупе с развитием новых схемных решений ВАЭС с учетом российских реалий представляется одним из эффективных этапов по повышению энергетической эффективности и безопасности всей энергосистемы страны в целом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700/>.

Литература

1. Султанов М.М. Разработка методологии и мероприятий по обеспечению надежности оборудования энергетических систем. Известия высших учебных заведений.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(5):46-55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55>.

2. Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненашев А.В. Оценки «углеродоёмкости» и углеродной «нейтральности» экономики ЕС и РФ // Промышленная энергетика – 2021 – №11, стр. 38 – 47.

3. Белобородов С.С., Дудолин А.А. Влияние развития ВИЭ на сбалансированность производства и потребления электроэнергии в ЕЭС России // Новое в российской электроэнергетике – 2020 – №5, стр. 6 – 17.

4. Лукутин Б.В., Каррар Хамид А. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13>

5. Малега А.А., Бородулин А.А., Панов В.Н., Пастухов В.В., Филатова О.В., Подвысоцкий А.А. Комплексная реконструкция и модернизация Кубанской ГАЭС // Гидротехническое строительство – 2020 – №8, стр. 27 – 35.

6. M. De Rosa, O. Afanaseva, A. Fedyukhin, V. Bianco Prospects and characteristics of thermal and electrochemical energy storage systems. Journal of Energy Storage, Volume 44, Part B, 15 December 2021, 103443.

7. Ubertini, S., Facci, A.L., & Andreassi, L. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage // Energies, 2017, 10, 2035.

8. Peng Li, Qingya Hu, Ye Sun, Zhonghe Han Thermodynamic and economic performance analysis of heat and power cogeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage coupled with solar auxiliary heat // Journal of Energy Storage. - 2021. - №42.

9. Shadi Bashiri Mousavi, Mahdieh Adib, M. Soltania, Amir Reza Razmi, Jatin Nathwani Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials // Energy Conversion and Management. - 2021. - №243.

10. Marcus Budt, Daniel Wolf, Roland Span, Jinyue Yan A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments // Applied Energy. - 2016. - №170. - P. 250-268.

11. Qian Zhou, Dongmei Du, Chang Lu, Qing He, Wenyi Liu A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system // Energy. - 2019. - №188.

12. Marcus King, Anjali Jain, Rohit Bhakar, Jyotirmay Mathur, Jihong Wang Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2021. - №139.

13. Peng Li, Qingya Hu, Zhonghe Han, Changxin Wang, Runxia Wang, Xu Han, Yongzhen Wang Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a trigenerative system based on compressed air energy storage under different working media and heating storage media // Energy. - 2022. - №239.

14. NYSEG SENECA // Compressed air energy storage (CAES) demonstration project, Final Phase 1 Technical Report. September 2012. – 66 P.

15. Ольховский Г.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. – 358 с.

Авторы публикации

Федюхин Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Промышленных теплоэнергетических систем, Московский энергетический институт.

Дронов Станислав Анатольевич – аспирант, Московский энергетический институт.

Семин Даниил Владимирович – аспирант, Московский энергетический институт.

Гусенко Алексей Геннадьевич – студент, Московский энергетический институт.

Панарин Владислав Эдуардович – студент, Московский энергетический институт.

References

1. Sultanov MM. Development of methodology and measures to ensure the reliability of energy systems equipment. *News of higher educational institutions. Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):46-55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55>

2. Beloborodov SS, Gasho EG, Nenashev AV. Estimates of the «carbon intensity» and carbon «neutrality» of the EU and Russian economy. *Industrial Energy* – 2021 – No. 11, pp. 38-47.
3. Beloborodov SS, Dudolin AA. The influence of renewable energy development on the balance of electricity production and consumption in the UES of Russia. *New in the Russian electric power industry* – 2020 – No. 5, pp. 6-17.
4. Lukutin BV, Karrar Hamid A. Optimization of energy balances of a photovoltaic plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *News of higher educational institutions. Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13>
5. Malega A.A., Borodulin A.A., Panov V.N., Pastukhov V.V., Filatova O.V., Podvysotsky A.A. Complex reconstruction and modernization of the Kuban PSPP. *Hydrotechnical construction* – 2020 – No.8, pp. 27-35.
6. De Rosa M., Afanaseva O., Fedyukhin A., Bianco V. Prospects and characteristics of thermal and electrochemical energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, Volume 44, Part B, 15 December 2021, 103443.
7. Ubertini S, Facci AL, & Andreassi, L. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage. *Energies*. 2017; 10:2035.
8. Peng Li, Qingya Hu, Ye Sun, Zhonghe Han Thermodynamic and economic performance analysis of heat and power cogeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage coupled with solar auxiliary heat. *Journal of Energy Storage*. - 2021. - №42.
9. Shadi Bashiri Mousavi, Mahdieh Adib, M. Soltania, Amir Reza Razmi, Jatin Nathwani Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials. *Energy Conversion and Management*. - 2021. - №243.
10. Marcus Budt, Daniel Wolf, Roland Span, Jinyue Yan A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*. - 2016. - №170. - P. 250-268.
11. Qian Zhou, Dongmei Du, Chang Lu, Qing He, Wenyi Liu A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system. *Energy*. - 2019. - №188.
12. Marcus King, Anjali Jain, Rohit Bhakar, Jyotirmay Mathur, Jihong Wang Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2021. - №139.
13. Peng Li, Qingya Hu, Zhonghe Han, Changxin Wang, Runxia Wang, Xu Han, Yongzhen Wang Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a trigenerative system based on compressed air energy storage under different working media and heating storage media. *Energy*. 2022. №239.
14. NYSEG SENECA. *Compressed air energy storage (CAES) demonstration project*, Final Phase 1 Technical Report. September 2012. 66 P.
15. Olkhovsky GG, Kazaryan VA, Stolyarevsky A.Ya. *Air-accumulating gas turbine power plants (VAGTE)* – Izhevsk: Institute of Computer Research, 2011. – 358 p.

Authors of the publication

Alexander V. Fedyukhin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Stanislav A. Dronov – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Daniil V. Semin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Alexey G. Gusenko – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Vladislav E. Panarin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Получено

02.10.2022г.

Отредактировано

02.10.2022г.

Принято

14.10.2022г.