

ВОЗДУХОАККУМУЛИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НЕБОЛЬШОЙ
МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
SMALL CAPACITY AIR STORAGE POWER PLANTS
BASED ON GAS TURBINE UNITS

Качан С. А., к-т. техн. наук, доцент,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Kachan, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Рассмотрены воздухоаккумулирующие электростанции небольшой мощности, созданные на базе газотурбинной установки Mercury мощностью 4,6 МВт с регенерацией тепла и искусственного резервуара-хранилища сжатого воздуха. С учетом безопасности эксплуатации максимально достижимо увеличение мощности газовой турбины за счет ввода сжатого воздуха примерно на 30 % (около 1,46 МВт). Применение воздушной турбины высокого давления позволяет увеличить производство электроэнергии примерно на 0,3 МВт. Эффективность хранения энергии сжатого воздуха достаточно высока и увеличивается за счет сокращения продолжительности периода разгрузки.

Abstract. Small capacity air-storage power plants based on a Mercury 4,6 MW gas turbine with heat recovery and an artificial compressed air storage tank are considered. Taking into account the safety of operation, the maximum increase of the power due to input of compressed air is by approximately 30 % (about 1,46 MW). Using of a high-pressure air turbine may increase the electricity output by approximately 0,3 MW. The efficiency of compressed air storage energy is quite high and increases by reducing the duration of the unloading period.

Ключевые слова: воздухоаккумулирующие электростанции, газотурбинная установка, резервуар-накопитель, повышение мощности.

Key words: air storage power plants, gas turbine units, storage tank, peak power.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ужесточаются требования к маневренности основного оборудования энергосистем. В мировой энергетике это связано с интенсивным внедрением возобновляемых источников энергии, характеризующихся непостоянством и непредсказуемостью генерации; в Беларуси, после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС, – с большой долей базовых энергоисточников.

Небаланс между выработкой и потреблением электроэнергии в настоящее время устраняется за счет развешивания имеющегося в сети

вращающегося резерва и ввода в действие генераторов с быстрым временем запуска.

Значительные преимущества могут быть достигнуты за счет внедрения систем накопления энергии.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Среди доступных в настоящее время решений интересным вариантом является хранение энергии сжатого воздуха в воздухоаккумулирующих электростанциях (ВАЭС). Системы ВАЭС работают по циклу Брайтона, в котором процессы сжатия и расширения не происходят одновременно, как в газотурбинной установке (ГТУ), а разъединены и сдвинуты во времени. В непиковые периоды работы энергосистемы электроэнергия забирается из сети для сжатия воздуха, который затем хранится в резервуаре-накопителе соответствующих размеров. В периоды пиковой нагрузки хранящийся воздух нагревается и расширяется в турбине для производства электроэнергии.

Крупногабаритные ВАЭС (например действующие установки Hunt-dorf, Эльсфлет в Нижней Саксонии, Германия и McIntosh в Алабаме, США мощностью 290 МВт и 110 МВт соответственно) требуют подземных хранилищ сжатого воздуха (в соляных, пористых и скальных кавернах), что ограничивает размещение станций участками с подходящими геологическими характеристиками.

Установки малого и среднего размера могут быть созданы с использованием искусственных надземных резервуаров, объединяя систему сжатия и хранения воздуха с типовой ГТУ.

В [1] рассматриваются малогабаритные ВАЭС на базе ГТУ Mercury компании Solar, США мощностью 4,6 МВт с газовой регенерацией теплоты (табл. 1) [2].

Таблица 1
Технические характеристики ГТУ Mercury (условия ISO*) [2]

№ п/п	Показатель, размерность	Значение
1	Электрическая мощность, МВт	4,6
2	Удельный расход теплоты, кДж/(кВт*ч)	9350
3	КПД, %	38,5
4	Расход воздуха через компрессор, кг/с	17,45
5	Расход выхлопных газов, кг/с	17,7
6	Температура выхлопных газов, °С	365

* температура наружного воздуха +15 °С, атмосферное давление 101,3 кПа, относительная влажность 60 %.

Выбор ГТУ Mercury обусловлен двумя основными причинами:

– высоким КПД для установок такого класса мощности;

– усовершенствованной конструкцией 10-ступенчатого компрессора, которая обеспечивает относительно высокий запас по помпажу в широком рабочем диапазоне.

В [1] рассматриваются два технических решения:

- ВАЭС с вводом сжатого воздуха из резервуара-накопителя (ВАЭС ВВ);
- ВАЭС с вводом сжатого воздуха из резервуара-накопителя и турбинной надстройкой высокого давления (ВАЭС ВВТ).

В ВАЭС ВВ (рис. 1) [1] сжатый воздух (находящийся в резервуаре-накопителе под давлением 40 бар) дросселируется и смешивается с потоком воздуха, выходящим из компрессора ГТУ. Полученный поток предварительно подогревается в регенеративном подогревателе отработавшими газами и подается в камеру сгорания ГТУ.

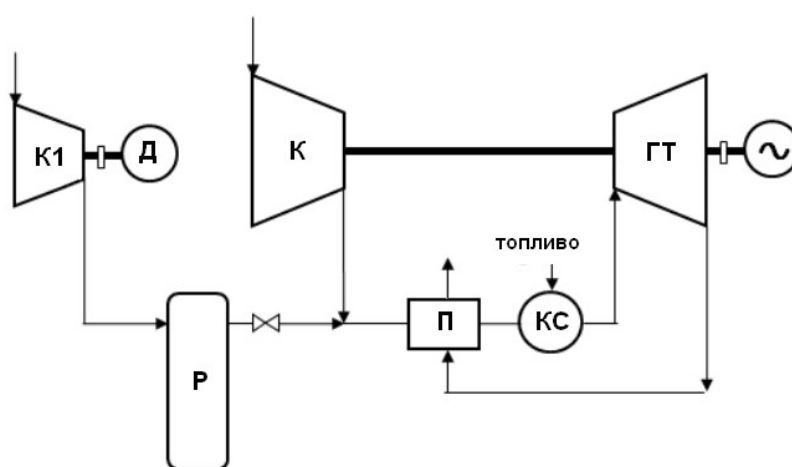


Рис. 1. Схема ВАЭС ВВ:

К1 – компрессор ВАЭС; К – компрессор ГТУ; ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания; П – регенеративный подогреватель; Р – резервуар-накопитель; Д – двигатель

Производительность установки может быть повышена за счет нагрева и расширения хранящегося сжатого воздуха в воздушной турбине высокого давления перед его добавлением в цикл ГТУ.

Так, в ВАЭС ВВТ (рис. 2) [1] сжатый воздух (находящийся в резервуаре-накопителе под давлением 80 бар) предварительно нагревается, расширяется в турбине высокого давления и, наконец, вводится в поток после компрессора ГТУ.

Предполагается, что турбина высокого давления работает при фиксированном давлении на входе, снижая давление потока воздуха, выходящего из резервуара-накопителя, до 50 бар.

По условиям достаточного запаса по помпажу максимальная величина впрыска сжатого воздуха для ГТУ Mercury была оценена на уровне 2,5 кг/с, то есть примерно 15 %, что обеспечивает прирост мощности примерно на 30 % (табл. 2) [1].

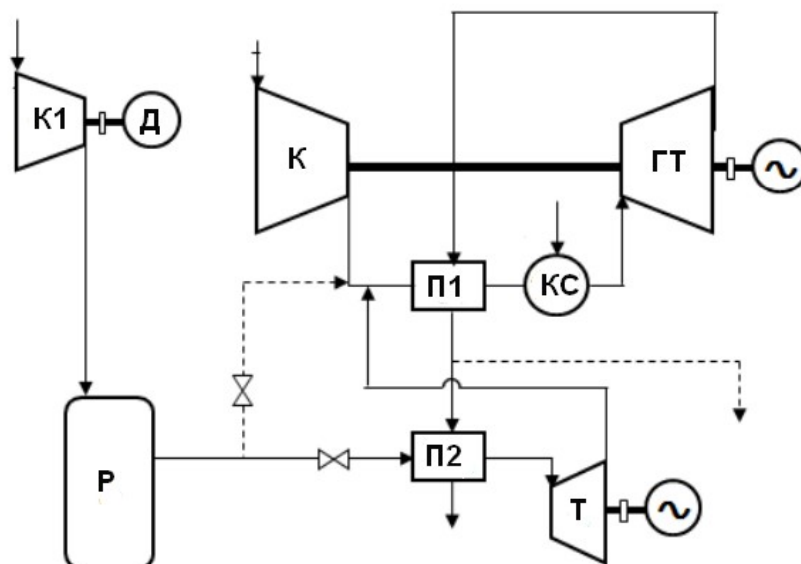


Рис. 2. Схема ВАЭС ВВТ:

К1 – компрессор ВАЭС; К – компрессор ГТУ; ГТ – газовая турбина ГТУ; КС – камера сгорания; Т – турбина высокого давления; П1, П2 – регенеративные подогреватели; Р – резервуар-накопитель; Д – двигатель

Таблица 2

Производительность ГТУ при изменении величины впрыска сжатого воздуха (условия ISO)

№ п/п	Показатель, размерность	Значение		
1	Величина впрыска сжатого воздуха, кг/с	–	2,0	2,5
2	Величина впрыска сжатого воздуха, %	–	10	15
3	Степень повышения давления в компрессоре	9,90	11,15	11,43
4	Мощность на клеммах генератора, МВт	4,60	5,80	6,06
5	Увеличение мощности, %	–	26,1	31,7
6	Массовый расход топлива, кг/с	0,249	0,289	0,299
7	КПД, %	38,5	41,8	42,6
8	Продолжительность периода разряда, мин.	–	83	67

Повышение мощности и КПД ГТУ связано во-первых с увеличением массового расхода газов, поступающих в турбину и, во-вторых, с более высокой удельной работой газов за счет большего перепада давления.

Применение в схеме ВАЭС ВВТ турбины высокого давления позволяет увеличить производство электроэнергии примерно на 300 кВт (на 6,5 %) [1].

Как показано в табл. 2, при повышении пиковой мощности за счет увеличения впрыскиваемого воздуха закономерно сокращается продолжительность разрядного периода.

В технико-экономических расчетах ВАЭС [3] исходили из минимального периода разрядки около одного часа и максимального массового расхода впрыскиваемого воздуха из резервуара-накопителя 2,5 кг/с или около 9000 кг/ч.

Оптимальные давление хранения и объем резервуара-накопителя выбраны на уровне 4000 кПа = 40 бар и 325 м³. Принята система хранения воздуха, состоящая из секций стальных труб большого диаметра (около 760 мм) длиной 12 м, соединенных коллекторами [3].

Система повышения давления воздуха выбрана, исходя из продолжительности периода зарядки 5–6 часов, в составе охлаждаемого поршневого компрессора.

Удельные инвестиционные затраты на систему хранения сжатого воздуха оцениваются примерно в 50 \$/(кВт·ч) запасенной энергии [1].

Во время фазы разрядки ВАЭС может работать очень гибко, регулируя массовый расход хранимого воздуха в соответствии с требуемым графиком производства электроэнергии. При этом сокращение длительности периодов разрядки приводит к более высоким показателям дополнительной выработки электроэнергии и эффективности хранения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные схемы ВАЭС характеризуются относительно низкими инвестиционными затратами, хорошей эффективностью хранения, высоким уровнем готовности и надежности, а также быстрым реагированием на запросы энергосистемы о изменении нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salvini, C. Performance Analysis of Small Size Compressed Air Energy Storage Systems for Power Augmentation: Air Injection and Air Injection / Expander Schemes [Electronic resource] / Heat Transfer Engineering. – Volume 39. – 2018. – Issue 3. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1080/01457632.2017.1295746>. – Date of access: 12.04.2023.
2. Mercury 50 / Solar Turbines [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.solarturbines.com/en_US/products/power-generation-packages/mercury-50.html. – Date of access: 12.04.2023.
3. Salvini, C. Techno-Economic Analysis of Small Size Second Generation CAES System / 70th Conference of the ATI Engineering Association. – December. – 2015. [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/289992049_Techno-Economic_Analysis_of_Small_Size_Second_Generation_CAES_System. – Date of access: 12.04.2023.