

УДК 620.91+621.311.24

Б. И. Мокин, д. т. н., проф.; М. Н. Чепурный, к. т. н., доц.; А. Б. Мокин, с. н. с.
**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ
АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

Предложены варианты построения небольшой воздушной аккумулирующей электростанции, подходящей для исследования процессов в ней. Приведена методика расчета основных параметров этой исследовательской станции.

Ключевые слова: энергосбережение, ветроэнергетика, аккумулирующая электростанция, воздухохранилище.

1. Введение

В работах [1, 2] показаны перспективы сооружения воздушных аккумулирующих электростанций (ВАЭС) и приведены варианты воздухохранилищ, схемы комплексного использования и математические модели для оценки их экономической эффективности, а также сформулированы задачи, которые необходимо решить в этом направлении исследований. Для перевода проблемы в плоскость конструирования ВАЭС необходимо, прежде всего, исследовать процессы, которые будут происходить в отдельных элементах этого класса аккумуляторов электроэнергии, и их взаимовлияние, а также определиться с материалами, характеристики которых смогут удовлетворить условия работы во взаимодействии с этими процессами.

Поскольку в мире еще не накоплен опыт построения ВАЭС и научных публикаций на эту тему недостаточно для перевода проблемы в фазу инженерного конструирования, то возникает необходимость в построении небольшой ВАЭС, на которой можно было бы исследовать все процессы, сопровождающие воздушную аккумуляцию электроэнергии, и влияние этих процессов на конструктивные материалы, из которых изготовлены элементы ее конструкции.

Несколько вариантов построения исследовательской ВАЭС вместе с методикой оценки ее параметров предлагаются в этой статье. Воспользовавшись одним из них, каждая исследовательская организация, которую интересуют процессы воздушной аккумуляции электроэнергии, сможет без существенных финансовых расходов построить такую ВАЭС на своей исследовательской площадке.

2. Варианты воздухохранилищ для исследовательской ВАЭС и методика оценки их параметров

Рассмотрим три варианта воздухохранилища:

1) Полый металлический куб внутренним объемом $V_1 = 1 \text{ м}^3$, в который нагнетается воздух до достижения давления $P_1 = 23,1 \text{ МПа}$.

2) Полый металлический параллелепипед внутренним объемом $V_2 = 4 \text{ м}^3$, в который нагнетается воздух до достижения давления $P_2 = 4,1 \text{ МПа}$.

3) Полый железобетонный параллелепипед внутренним объемом $V_3 = 60 \text{ м}^3$, в который нагнетается воздух до достижения давления $P_3 = 0,2 \text{ МПа}$.

Для реализации первого из этих вариантов можно использовать ресивер воздушного высоковольтного выключателя из подстанции 750 кВ, для реализации второго варианта можно сварить из листовой стали параллелепипед длиной и шириной по 2 м и высотой в 1 м, армированный уголком или швеллером, а для реализации третьего варианта достаточно вырыть в земле яму размером, например, 10,5 м × 3,5 м × 2,25 м, в которую с помощью

опалубки и стальной арматуры вбетонировать железобетонный желоб с внутренними размерами $10 \text{ м} \times 3 \text{ м} \times 2 \text{ м}$, накрыть его железобетонными плитами, армированными на стыках металлом, приваренным к предусмотренным в соответствующих местах металлических закладных.

Воспользовавшись известной зависимостью [3] —

$$E_i = V_i(P_i - P_{am}) = V_i \cdot \Delta P_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

рассчитаем запасы энергии в каждом из воздухоохранилищ при их заполнении воздухом с заданным давлением.

Подставляя в формулу (1) значение атмосферного давления $P_{am} = 0,1 \text{ МПа}$ и значения давления и объема для каждого из приведенных выше вариантов воздухоохранилищ, получим, что запасы энергии в них будут составлять:

$$E_1 = 23 \text{ МДж}, \quad E_2 = 16 \text{ МДж}, \quad E_3 = 6 \text{ МДж}. \quad (2)$$

Из результатов (2) видно, что, увеличивая давление, одно и то же количество энергии можно запасти в воздухоохранилище меньших размеров. Но следует отметить, что в железобетонных воздухоохранилищах давление нельзя увеличивать до значений, больших $0,2 \text{ МПа}$, поскольку при большем давлении и циклических нагрузках, как известно, железобетон быстро разрушается.

Подсчитаем массу воздуха в каждом из предложенных вариантов воздухоохранилища, которая будет иметь место при максимальном давлении.

Для этого мы сначала воспользуемся законом Бойля-Мариота [3], который для условия, что воздух в обоих состояниях рассматривается при одной и той же температуре, можно в нашем случае записать так:

$$P_i \cdot V_i = P_{am} \cdot V_i^{am} = 0,1 \cdot V_i^{am}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где V_i^{am} — объем воздуха, который он займет в атмосфере после выпуска из воздухоохранилища.

Подставляя значение соответствующих параметров из всех трех вариантов воздухоохранилищ, приведенных выше, в формулу (3), получим:

$$V_1^{am} = 231 \text{ м}^3, \quad V_2^{am} = 164 \text{ м}^3, \quad V_3^{am} = 120 \text{ м}^3. \quad (4)$$

Но, если учесть то, что при выпуске воздуха из воздухоохранилища в атмосферу из него будет выходить воздух лишь до тех пор, пока давление будет больше атмосферного, реальный «ветер» будет создаваться лишь объемами воздуха, которые можно определить из соотношения:

$$V_{ip}^{am} = V_i^{am} - V_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Подставляя исходные данные и результаты (4) в формулу (5), определяем, что:

$$V_{1p}^{am} = 230 \text{ м}^3, \quad V_{2p}^{am} = 160 \text{ м}^3, \quad V_{3p}^{am} = 60 \text{ м}^3. \quad (6)$$

Поскольку из курса физики нам известно, что:

$$M_i = \rho_{am} \cdot V_{ip}^{am} = 1,2 \cdot V_{ip}^{am}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где ρ_{am} — плотность воздуха при атмосферном давлении, которая равна $1,2 \text{ кг/м}^3$, а M_i — масса воздуха в i -том варианте воздухоохранилища, которая при его выпуске будет создавать «ветер», то, подставляя результаты (6) в соотношение (7), получим:

$$M_1 = 276 \text{ кг}, \quad M_2 = 192 \text{ кг}, \quad M_3 = 72 \text{ кг}. \quad (8)$$

3. Структура исследовательской ВАЭС и методика оценки ее параметров

Функциональную структуру исследовательской ВАЭС предлагаем выбрать в варианте, схематически представленном на рисунке, где цифрами обозначены такие её элементы: 1 – воздухохранилище (аккумулятор), 2 – регулятор давления, 3 – диффузор, 4 – ветровой двигатель, 5 – электрический генератор, 6 – затворная арматура, 7 – компрессор, 8 – электропривод компрессора, 9 – система электроснабжения, 10 – потребитель электроэнергии, 11 – контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура.

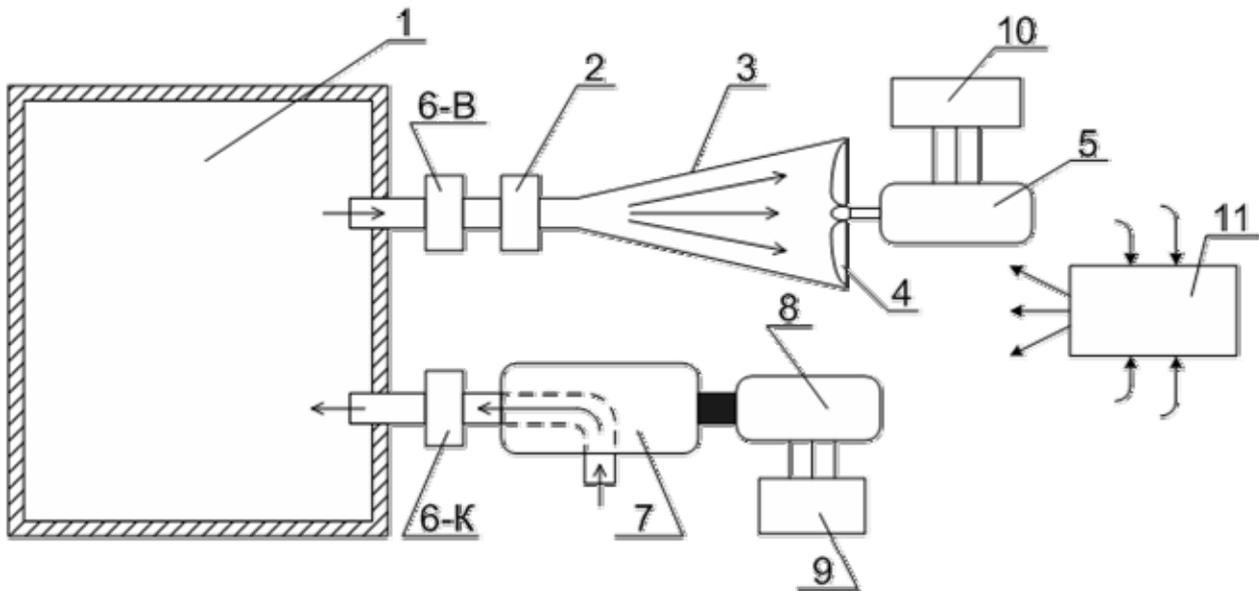


Рис. Вариант функциональной структуры исследовательской ВАЭС

Очевидно, что в случае исследования процессов синхронизации работы ВАЭС с электроэнергетической системой элементы 9 и 10 будут совмещаться и будут представлять собой одни и те же шины подстанции электрической сети.

Сразу же отметим, что мы акцентируем внимание именно на функциональной структуре ВАЭС, из которой легко прослеживаются основные технологические процессы воздушной аккумуляции электроэнергии и превращение энергии сжатого воздуха снова в электроэнергию. Вне рассмотрения в этой статье остается вопрос оснащения элементов ВАЭС конкретной контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой, поскольку, во-первых, это тема отдельной статьи, а во-вторых, ее перечень и место установления определяются тематикой исследований.

Алгоритм функционирования ВАЭС, структура которой приведена на рисунке, в случае совмещения элементов 9 и 10 будет таким: при появлении в электроэнергетической системе избытка электроэнергии и давления в воздухохранилище 1 меньше, чем заданный с помощью регулирующей аппаратуры 11 и электропривода 8 включается в работу компрессор 7, который будет нагнетать в воздухохранилище 1 воздух до тех пор, пока давление в нем не станет равным заданному. При достижении этого равновесия регулирующая аппаратура 11 подает команду на затворную аппаратуру 6-к и на выключатель электропривода 8 компрессора 7 – компрессор отключается, канал доступа воздуха в воздухохранилище перекрывается. Во время нагнетания воздуха в воздухохранилище 1 и после завершения этого процесса затворная аппаратура 6-в держит свой канал перекрытым.

При появлении в электроэнергетической системе дефицита электроэнергии за сигналом регулирующей аппаратуры 11 на затворную 6-в открывается канал выпуска сжатого воздуха из воздухохранилища 1 в диффузор 3. Поток воздуха, формируемого диффузором 2, поступает на ветровой двигатель 4, в котором энергия сжатого воздуха превращается в

механическую энергию вращения вала ветрового двигателя. Ветровой двигатель 4 передает механическую энергию вращения своего вала ротору электрического генератора 5, в котором механическая энергия превращается в электрическую и подается в электроэнергетическую систему. Этот процесс длится до тех пор, пока давление в воздухохранилище 1 не сравнится с атмосферным или в электроэнергетической системе не исчезнет дефицит электроэнергии. Давление в диффузоре 3 на протяжении всего процесса выпуска воздуха из воздухохранилища 1 поддерживается постоянным с помощью регулятора давления 2. Останавливаться этот процесс может также по сигналу регулирующей аппаратуры, которая будет обрабатывать заданную программу.

Основным режимным параметром ВАЭС является мощность $N = f(v, D)$ в ваттах, которую она может развивать на валу ветрового двигателя с диаметром ветрового колеса D (в метрах) при тех или иных скоростях v (в метрах за секунду) ветрового потока, который вращает ветровой двигатель.

В работе [4] демонстрируется, что рассчитать максимально возможное значение мощности N можно по формуле:

$$N_{\max} = \frac{2}{3} v \left[\frac{8}{9} \left(\rho_{\text{ам}} \frac{v^2}{2} \right) \right] \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = 0,279 v^3 D^2 \text{ (Вт)}. \quad (9)$$

В таблице показаны дискретные значения зависимости мощности ветрового двигателя от семи значений диаметра ветрового колеса и трех значений скорости ветрового потока, которые рассчитаны на основе формулы (9).

Таблица

Множество значений решетчатой функции $N_{\max} = f(v, D)$ в ваттах

$v(\text{м/с}) \setminus D(\text{м})$	0,1	0,5	0,75	1	2	5	10
7	0,956	23,92	53,88	95,7	382,8	2392	9570
10	2,79	69,75	157	279	1116	6975	27900
15	9,42	235,4	530,1	941,6	3766	23540	94162

Теперь найдем связь между объемом V_{ip}^{am} воздуха, который выйдет из воздухохранилища в атмосферу через диффузор диаметром D , скоростью v , с которой воздух будет проходить через этот диффузор, и отрезком времени t , за какой весь этот объем воздуха выйдет из воздухохранилища при условии, что регулятор давления будет на протяжении всего этого отрезка времени поддерживать в диффузоре постоянное давление.

Исходя из условия неразрывности потока воздуха в диффузоре, можно записать, что:

$$V_{ip}^{am} = v \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) t, \quad i = 1, 2, 3, \quad (10)$$

откуда

$$t = \frac{4V_{ip}^{am}}{v\pi D^2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Для выбранных нами при построении таблицы семи значений диаметра диффузора D и трех значений скорости потока воздуха в диффузоре при встрече с ветровым колесом диаметром D для каждого объема рабочего воздуха, пользуясь формулой (11), можно определить 21 значение периода времени, на протяжении которого ВАЭС будет работать в режиме генерации энергии.

Например, если $V_{1p}^{am} = 230 \text{ м}^3$, $v = 10 \text{ м/с}$, $D = 1 \text{ м}$, то, подставляя эти значения

параметров в формулу (11), получим, что $t = 29 \text{ с}$. А если при тех же объеме и скорости возьмем $D = 0,5 \text{ м}$ или $D = 0,1 \text{ м}$, то получим соответственно $t = 116 \text{ с}$ или $t = 2929 \text{ с}$.

Эти примеры демонстрируют, что уменьшением диаметра диффузора и ветрового колеса мы можем существенно увеличить время функционирования ВАЭС в режиме генерации. Но не следует забывать, что мощность ветрового двигателя при этом будет существенно снижаться и будет соответственно составлять 279 Вт , приблизительно 70 Вт и около 3 Вт (см. табл.).

Конечно, это теоретические расчеты. На практике параметры будут несколько отличаться от расчетных, но для того мы и предлагаем строить исследовательские ВАЭС, чтобы исследовать все эти расхождения и привести полученные математические модели к адекватным вариантам.

4. Выводы

1. Обоснованы целесообразность и перспективы создания исследовательских ВАЭС с объемами воздухохранилищ, сравнительно небольшими, но пригодными для исследования процессов в них.

2. Предложены несколько вариантов реализации воздухохранилищ и функциональная структура ВАЭС.

3. Разработаны методики оценки основных параметров ВАЭС и на конкретных примерах продемонстрировано их применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мокін Б.І. Екологічні та економічні аспекти створення повітряних акумулюючі електростанцій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №5. – С. 95 – 103.
2. Мокін Б.І. Системи еколого-економічного управління // Зб. матеріалів XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2006». – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця». – 2006. – С. 109 – 113.
3. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. – Вінниця: «Поділля-2000», 2004. – 352 с.
4. Ветроэнергетика / Под ред. Д. Рензо: Пер. с англ. под ред. Шефтера Я.И. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.

Мокин Борис Иванович — профессор кафедры моделирования и мониторинга сложных систем;

Чепурный Марк Николаевич — доцент кафедры теплоэнергетики;

Мокин Александр Борисович — старший научный сотрудник НДІ АСУЕТ.
Вінницький національний технічний університет