

УДК 620.91+621.311.24

Б. И. Мокин, д. т. н., проф.; М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; А. Б. Мокин, к. т. н.**ВОЗДУШНАЯ АККУМУЛИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ДВУМЯ ВОЗДУХОХРАНИЛИЩАМИ РАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Предложена структура воздушной аккумулирующей электростанции с двумя воздухохранилищами разного давления, соединенными между собой компрессорно-детандерным агрегатом. Определены основные характеристики этого класса электростанций и методика их расчета.

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

1. Постановка задачи

Чем дальше в историю уходит дата трагедии на Чернобыльской АЭС и чем точнее становятся прогнозы относительно ограниченности объемов природного газа в земных недрах, тем с большей интенсивностью во многих странах строятся новые атомные электростанции, характерной особенностью которых является необходимость функционирования круглосуточно в базисном режиме.

В программу энергообеспечения Украины до 2020 года также заложено строительство нескольких новых АЭС. Поэтому для Украины, как и для всех других стран, которые планируют наращивать генерацию электрической энергии на АЭС, возникает проблема – куда девать выработанную электроэнергию в часы ночных провалов нагрузки?

Одним из хорошо отработанных как в теоретическом, так и в практическом планах методов использования избыточной в данный момент электроэнергии является аккумуляция ее на гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС) путем закачивания воды из нижнего водохранилища в верхнее [1]. Но этот подход не имеет никаких перспектив быть использованным на больших по площади равнинных территориях. Поэтому в Украине, например, кроме небольшой действующей Киевской ГАЭС, Ташлыкской ГАЭС, на которой пока введен в эксплуатацию только первый агрегат, и Днестровской ГАЭС, перспективы завершения строительства которой никому не известны, строительство новых ГАЭС никакими планами на будущее не предусматривается.

Но даже тогда, когда все эти три ГАЭС заработают на полную мощность, они смогут в часы провала нагрузки аккумулировать электроэнергию в количестве, не большем половины того, которое вырабатывается сегодня на Запорожской АЭС. А что же делать в эти часы с той электроэнергией, которую выработают все другие, в том числе построенные в будущем, АЭС?

Мы предлагаем аккумулировать эту избыточную электроэнергию в виде сжатого воздуха, закачанного в воздухохранилища, в качестве которых можно использовать как отработанные газовые скважины, железорудные или угольные шахты, так и карстовые пещеры или отработанные карьеры [2, 3].

Как показано в наших работах [2, 3], при использовании воздушных аккумулирующих электростанций (ВАЭС) экология окружающей среды не только не ухудшается, как это имеет место при использовании ГАЭС, а наоборот, улучшается.

Основным недостатком ВАЭС, расчет характеристик экспериментального образца которой осуществлен в работе [4], а технико-экономический анализ – в работе [2], является низкий коэффициент полезного действия, обусловленный тем, что лишь незначительная часть электроэнергии, которая была использована для сжатия воздуха компрессорами в воздухохранилище, возвращается назад в электроэнергию в процессе выпуска этого сжатого воздуха через газовую турбину (детандер) в окружающую среду.

Но оказалось, что коэффициент полезного действия ВАЭС можно существенно увеличить, если отработанный воздух выпускать из воздухохранилища высокого давления через газовую турбину не в окружающую среду, а выпускать его через детандер в другое, также изолированное, воздухохранилище, но с меньшим давлением, из которого потом во время провала нагрузки на АЭС перекачивать компрессорами воздух, используя избыток электроэнергии в электрической сети, обратно в воздухохранилище высокого давления.

Разработке структуры такой ВАЭС с двумя воздухохранилищами и расчету ее характеристик и посвящена данная работа.

2. Структура ВАЭС с двумя воздухохранилищами

Как уже нами отмечено выше, по аналогии с ГАЭС предлагаем и ВАЭС выполнять с двумя резервуарами, которыми являются воздухохранилище высокого (ПС1) и низкого (ПС2) давления. Структура такой ВАЭС показана на рисунке 1, где также обозначены параметры воздуха (давление P , температура t , объем V) в характерных элементах схемы.

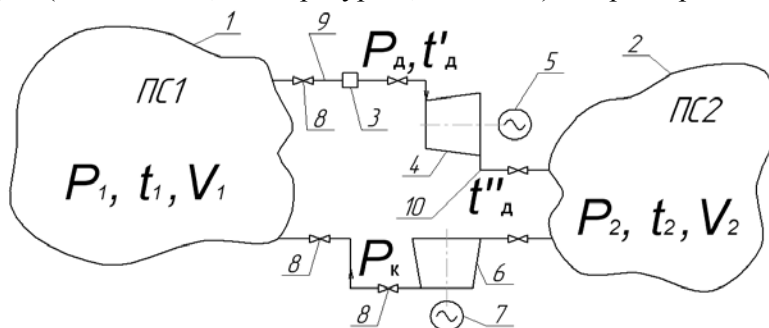


Рис. 1. Структурная схема ВАЭС с двумя воздухохранилищами:

1 – воздухохранилище высокого давления ПС1; 2 – воздухохранилище низкого давления ПС2; 3 – регулятор давления; 4 – детандер; 5 – электрогенератор; 6 – осевой компрессор; 7 – электродвигатель; 8 – запорная арматура.

Между воздухохранилищами высокого давления ПС1 и низкого давления ПС2 расположена компрессорно-детандерная станция, в состав которой входят компрессоры 6 с электроприводами 7, регулятор давления 3, детандеры (газовые турбины) 4 с электрогенераторами 5, запорная арматура 8 на линиях высокого 9 и низкого 10 давления, соответственно.

Во время работы ВАЭС в режиме генерации электроэнергии воздух из воздухохранилища ПС1 через регулятор давления 3 под давлением P_d подается на детандеры. В детандерах вследствие расширения и выполнения механической работы вращения вала параметры воздуха уменьшаются до значений P_2 и t''_d . Отработанный в детандерах воздух подается в воздухохранилище ПС2. В часы “провала” нагрузки на электросеть воздух из ПС2 перекачивается в ПС1 компрессорами.

3. Расчет характеристик ВАЭС

В соответствии с данными работы [1] “пиковость” электропотребления наблюдается дважды в сутки в утренние и вечерние часы. Поэтому период между пусками ВАЭС может составлять от 5 до 7 часов. Вполне естественно, что в период между пусками воздух в воздухохранилищах будет охлаждаться. Интенсивность охлаждения зависит от разности температур между воздухом и стенками воздухохранилища. Будем исходить из того, что снижение температуры воздуха в ПС1 составляет $50-60^\circ\text{C}$, а в ПС2 – $10-20^\circ\text{C}$.

Рассмотрим особенности работы ВАЭС. Эффективность работы ВАЭС будем оценивать при помощи коэффициента использования энергии η_e , который представляет собой

отношение энергии, отпущенной в электросеть детандерно-генераторными агрегатами (ДГА), к энергии, потребленной приводами компрессоров в процессе заполнения воздухом ПС1, т.е.

$$\eta_e = E_{\partial} / E_{\kappa} = N_{\partial} \cdot \tau_{\partial} / (N_{\kappa} \cdot \tau_{\kappa}), \quad (1)$$

где E_{∂} и E_{κ} – отпущенная и потребленная электроэнергия, соответственно; N_{∂} и N_{κ} – мощность ДГА и компрессоров; τ_{∂} и τ_{κ} – время работы детандеров и компрессоров.

В формуле (1) значения мощностей N_{∂} и N_{κ} равны:

$$N_{\partial} = G_{\partial} \cdot C_p (t'_{\partial} - t''_{\partial}) \eta_{ем}, \quad N_{\kappa} = G_{\kappa} \cdot C_p (t_{\kappa} - t_2) / \eta_{ем}, \quad (2)$$

где G_{∂} и G_{κ} – массовый расход воздуха в детандерах и компрессорах, соответственно; C_p – массовая изобарная теплоемкость воздуха; t'_{∂} и t''_{∂} – температура воздуха на входе в детандер и на выходе из него; t_2 и t_{κ} – температура воздуха перед компрессором и на выходе из него; $\eta_{ем}$ – электромеханический КПД.

Абсолютные температуры воздуха за компрессором и детандером определяются по известным формулам [5]:

$$t_{\kappa} = t_2 [1 + (\lambda^m - 1) / \eta_{\kappa}], \quad (3)$$

$$t''_{\partial} = t'_{\partial} [1 - (1 - \beta^{-m}) / \eta_{\partial}]. \quad (4)$$

В этих формулах обозначено: $\lambda = P_{\kappa} / P_2$; $\beta = P_{\partial} / P_2$; η_{κ} и η_{∂} – коэффициент полезного действия (КПД) компрессора и детандера, соответственно; P_2 и P_{κ} – давление воздуха до и после компрессора; $m = (k - 1) / k$; $k = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха; P_{∂} – давление воздуха перед детандером.

Масса воздуха в ПС1 после его заполнения и частичного использования [5]:

$$M_1 = P_1 \cdot V_1 / (R \cdot T_1); \quad M_2 = P_{\partial} \cdot V_1 / (R \cdot T'_{\partial}), \quad (5)$$

где P_1 и V_1 – давление воздуха в ПС1 и объем ПС1, соответственно; R – газовая постоянная воздуха.

Массовый расход воздуха в компрессорах и детандерах, кг/с :

$$G_{\kappa} = (M_1 - M_2) / (3600 \cdot \tau_{\kappa}) = \Delta M / (3600 \cdot \tau_{\kappa}); \quad (6)$$

$$G_{\partial} = (M_1 - M_2) / (3600 \cdot \tau_{\partial}) = \Delta M / (3600 \cdot \tau_{\partial}).$$

Работоспособность ВАЭС можно оценивать при помощи коэффициента, который характеризует производство энергии в ДГА каждой тонной использованного воздуха, $\text{кВт} \cdot \text{ч/т}$, то есть

$$e = E_{\partial} / (\Delta M \cdot 10^{-3}). \quad (7)$$

Нами исследовалась работа ВАЭС для режимов, в которых давление воздуха в ПС1 не превышает 5 МПа . Для сжатия и перекачивания воздуха из ПС2 в ПС1 был выбран компрессор для газотурбинной установки ГТ-750-6 с мерой повышения давления $\lambda = 4,6$ и массовым расходом $G_{\kappa} = 52,7 \text{ кг/с}$ [6]. При этом было принято, что в период между пусками

уменьшение температуры воздуха в ПС1 составляло 60°C , а в ПС2 – 20°C . Потери давления в воздухопроводах оценивались в $0,1 \text{ МПа}$, а снижение температуры в них – в 10°C . При этом КПД механизмов составляли: компрессора – 0,84; детандеров – 0,8; электромеханический – 0,96. Длительность работы компрессора – 5 часов, а длительность работы детандеров – 2 часа. Расчеты осуществлялись при условии, что объем ПС1 составлял 10^5 м^3 . В расчетах варьировалась величина давления P_2 в ПС2, от которой зависит как значение давления в ПС1, так и массовый расход воздуха из ПС1.

Для фиксированной меры повышения давления в компрессоре λ температура воздуха за компрессором и удельная работа компрессора остаются постоянными. С увеличением меры снижения давления в детандере β удельная работа детандера несколько возрастает. Но вместе с тем, возрастает и необходимое давление перед детандером ($P_d = P_2 \cdot \beta$), а также масса оставшегося воздуха M_2 в ПС1. Последнее обуславливает уменьшение расхода воздуха из ПС1, что, в свою очередь, уменьшает производство электроэнергии в ДГА. Поэтому, прежде всего, необходимо определить влияние β на основные показатели работы ВАЭС. В табл. 1 приведены результаты расчетов показателей работы ВАЭС для $\lambda = 4,6$; $P_2 = 1 \text{ МПа}$; $t_2 = 278 \text{ К}$.

Таблица 1

Влияние меры снижения давления в детандерах на показатели работы ВАЭС

Показатели	Значение β				
	2,6	2,8	3	3,2	3,4
Температура воздуха, K :					
- за компрессором;	459	459	459	459	459
- перед детандером;	379	371	379	379	379
- за детандером.	306	301	297	293	289,5
Массовый расход воздуха, $кг/с$:					
- в компрессоре;	61,2	51	40,77	30,5	20,34
- в детандере.	153	127,46	101,94	76,24	50,87
Мощность, $МВт$:					
- компрессора;	11,6	9,66	7,73	5,76	3,85
- детандера.	10,72	9,34	8,025	6,31	4,36
Потребленная электроэнергия, $МВт \cdot ч$	58	48,33	38,65	28,8	19,29
Выработанная электроэнергия, $МВт \cdot ч$	21,44	19,08	16,05	12,62	8,72
Коэффициент использования энергии	0,37	0,395	0,415	0,438	0,452

Из табл. 1 видно, что с уменьшением β увеличивается расход воздуха в компрессорах и детандерах, что приводит к увеличению их мощности и выработки электроэнергии, но и, одновременно, – к уменьшению коэффициента использования энергии на ВАЭС. Это наглядно видно из рис. 2, где показано изменение величин η_e и N_d .

Полученные результаты позволяют выбирать оптимальное значение β для конкретной ВАЭС. Во время этого выбора необходимо учитывать количество установленных ДГА. Очевидно, что меньшее их количество обуславливает уменьшение капиталовложений в тепломеханическое оборудование ВАЭС. Типоразмерный ряд ДГА, которые выпускаются энергомашиностроительными предприятиями, по мощности имеет вид: 1,5; 2,5; 4; 6 и 12 $МВт$ [7]. С учетом этого, наиболее целесообразным значением меры снижения давления в детандере для заданного объема V_1 можно принимать $\beta = 3,2$, для которого $N_d = 6,31$,

$$\eta_e = 0,438.$$

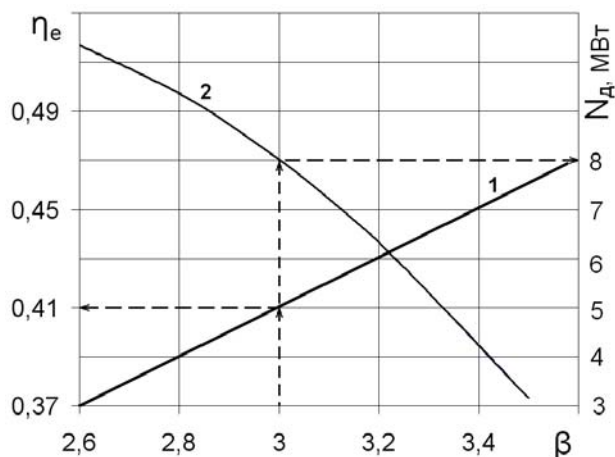


Рис. 2. Геометрическая интерпретация характера изменения коэффициента использования энергии на ВАЭС и мощности ДГА: 1 – $\eta_e = f(\beta)$; 2 – $N_d = f_1(\beta)$.

Оценим теперь влияние давления P_2 в ПС2 на показатели работы ВАЭС для заданных и рассчитанных значений параметров: $\lambda = 4,6$; $\beta = 3,2$; $t_k = 459\text{ K}$; $t'_d = 379\text{ K}$; $t''_d = 293\text{ K}$; $t_2 = 278\text{ K}$. Результаты вариантных расчетов по изложенной выше методике сведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние давления воздуха в ПС2 на показатели работы ВАЭС

Показатели	Значение давления P_2 , МПа				
	0,6	0,7	0,8	1	1,1
Давление воздуха за компрессором, МПа	2,76	3,22	3,68	4,6	5,06
Давление воздуха перед детандером, МПа	1,92	2,24	2,56	3,2	3,52
Расход массы воздуха ($M_2 \cdot 10^{-5}$ кг)	3,745	4,38	5,02	5,5	6,13
Мощность компрессора, МВт	3,92	4,58	5,25	5,75	6,42
Мощность детандера, МВт	4,29	5,02	5,75	6,31	7,028
Потребленная электроэнергия, МВт·ч	19,6	22,93	26,28	28,8	32,09
Выработанная электроэнергия, МВт·ч	8,58	10,04	11,51	12,62	14,05
Коэффициент использования энергии	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438
Удельная выработка энергии тонной воздуха, кВт·год/тону	22,9	22,9	22,9	22,9	22,9
Отношение объема ПС2 к объему ПС1	0,527	0,527	0,527	0,462	0,468

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что для фиксированных значений λ и β температуры воздуха за компрессором, до и после детандера остаются постоянными, вследствие чего величина удельной работы в этих агрегатах также остается неизменной. Изменение мощностей компрессора и детандера обусловлено только изменением массового расхода воздуха в период работы ВАЭС. При условии работы ВАЭС с выбранным значением меры уменьшения давления в детандере ($\beta = 3,2$) ее эффективность и работоспособность практически не зависят от давления воздуха в ПС2. Следует отметить, что работа ВАЭС с $\beta = 3,2$ характеризуется достаточной выработкой электроэнергии с минимумом ДГА, а

также меньшим значением необходимого объема воздухохранилища низкого давления.

В наших расчетах коэффициент полезного действия компрессора η_k достаточно приближен к реальному значению. Однако КПД детандера может в ту или иную сторону несколько отличаться от выбранного. В связи с этим на рис. 3 приведены значения поправочного коэффициента K_δ , на который нужно умножить величины N_δ , E_δ и η_e в случае, когда η_δ не равно 0,8.

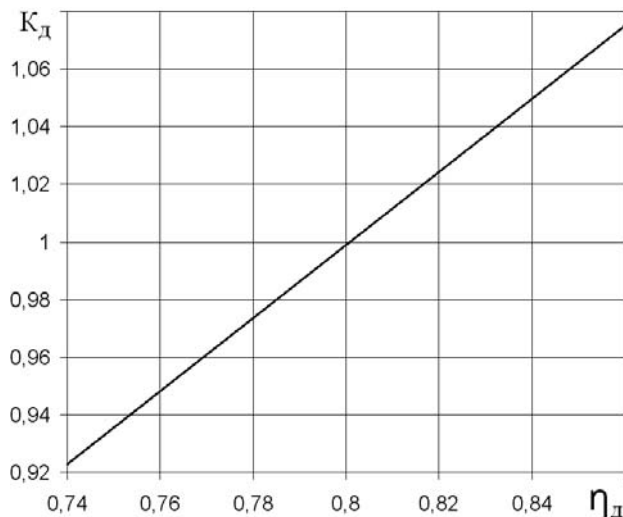


Рис. 3. График зависимости значения поправочного коэффициента K_δ от η_δ

Следует отметить также, что для создания ВАЭС можно использовать многоступенчатые осевые компрессоры газотурбинных установок других типов, в которых мера повышения давления на каждой ступени λ_1 составляет, как правило, 1,245-1,25. Так, например, использование семиступенчатого компрессора с $\lambda_1 = 1,245$ дает общую меру повышения давления $\lambda = 4,63$. Следует отметить, что для увеличения сравнительно небольшой выработки электроэнергии на ВАЭС, необходимо увеличивать объемы воздухохранилищ ПС1 и ПС2.

Несмотря на то, что расчеты осуществлялись исходя из эксплуатации реально существующего тепломеханического оборудования, полученные результаты нельзя считать окончательными, поскольку температуры воздуха в воздухохранилищах могут в реальных условиях несколько отличаться от выбранных. Но эти результаты являются обуславливающими для прогнозирования показателей работы ВАЭС различной мощности при разных параметрах воздуха в схеме.

4. Выводы

1. Предложена новая структура ВАЭС с двумя воздухохранилищами разного давления ПС1 и ПС2, соединенными между собой компрессорно-детандерным агрегатом.

2. Получены основные характеристики работы ВАЭС с двумя воздухохранилищами разного давления.

3. При условии, что давление в воздухохранилище высокого давления ПС1 не превосходит 5 МПа, установлена наиболее целесообразная мера снижения давления в детандере, которая составляет 3,2 и обеспечивает работу ВАЭС с одинаковой эффективностью для всех значений давлений воздуха в воздухохранилище ПС2 низкого давления.

4. Показано, что для увеличения выработки электроэнергии на ВАЭС необходимо или увеличивать объемы воздухохранилищ, или увеличивать давление в воздухохранилище

высокого давления.

5. Получены предпосылки для осуществления технико-экономических расчетов при проектировании ВАЭС предложенного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

11. Ковецкий В. М., Ковецкая М. М. Альтернатива гидроаккумулирующим пиковым электростанциям в Украине // Проблемы загальної енергетики. – 2001. – № 5. – С. 16 – 19.
2. Мокін Б. І. Екологічні та економічні аспекти створення повітряних акумулюючих електростанцій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 95 – 103.
3. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Особливості побудови та функціонування повітряних акумулюючих електростанцій на Криворіжжі // Вісник Криворізького технічного університету. – 2007. – № 18. – С. 116 – 119.
4. Дослідницькі варіанти побудови повітряної акумулюючої електростанції та їх обґрунтування [Електронний ресурс] / Мокін Б. І., Чепурний М. М., Мокін О. Б. // Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» англ., рос. та укр. мовами. – 2007. – Вип. 1. – Розділ: Енергетика та електротехніка. – С. 1 – 5. – Адреса: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1ru.html>
5. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Основи технічної термодинаміки. – Вінниця: Поділля-2000. – 2004. – 353 с.
6. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева. – М.: Энергия. – 1985. – Т.1. – 743 с.
7. Газораспределительные детандер-генераторные агрегаты мощностью 1500-12000 кВт производства ОАО «ТКЗ» для энергосберегающих технологий. – Режим доступа: <http://www.inno.ru/project/15533/>

Мокин Борис Иванович – профессор кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, ректор;

Чепурный Марк Николаевич – доцент кафедры теплоэнергетики;

Мокин Александр Борисович – доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте.

Винницкий национальный технический университет