

**Б. І. Мокін, д. т. н., проф.; М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; О. Б. Мокін, с. н. с.**

## **ДОСЛІДНИЦЬКІ ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ ПОВІТРЯНОЇ АКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ЇХ ОБҐРУНТУВАННЯ**

*Запропоновано варіанти побудови невеликої повітряної акумулюючої електростанції, придатної для дослідження процесів в ній. Наведено методика розрахунку основних параметрів цієї дослідницької станції.*

*Ключові слова:* енергозбереження, вітроенергетика, акумулююча електростанція, повітросховище.

### **1. Вступ**

В роботах [1, 2] показано перспективи спорудження повітряних акумулюючих електростанцій (ПАЕС) і наведено варіанти повітросховищ, схеми комплексного використання та математичні моделі для оцінки їх економічної ефективності, а також сформульовано задачі, які треба розв'язати у цьому напрямку досліджень. Для переведення проблеми в площину конструювання ПАЕС необхідно, перш за все, дослідити процеси, які протікатимуть в окремих елементах цього класу акумуляторів електроенергії, і їх взаємовплив та визначитись з матеріалами, характеристики яких задовольнятимуть умови роботи у взаємодії з цими процесами.

Оскільки світ ще не накопичив досвіду побудови ПАЕС і наукових публікацій на цю тему недостатньо для переведення проблеми в фазу інженерного конструювання, то виникає необхідність у побудові невеликої ПАЕС, на якій можна було б досліджувати усі процеси, що супроводжують повітряну акумуляцію електроенергії, та вплив цих процесів на конструктивні матеріали, з яких виготовлені елементи її конструкції.

Кілька варіантів побудови дослідницької ПАЕС разом з методикою оцінки її параметрів запропоновано у цій статті. Скориставшись одним із них, кожна дослідницька організація, яку цікавлять процеси повітряної акумуляції електроенергії, зможе без суттєвих фінансових витрат збудувати таку ПАЕС на своєму дослідницькому майданчику.

### **2. Варіанти повітросховищ для дослідницької ПАЕС та методика оцінки їх параметрів**

Розглянемо три варіанти повітросховища:

1) Пустотілий металевий куб внутрішнім об'ємом  $V_1 = 1 \text{ м}^3$ , в який нагнітається повітря до отримання тиску  $P_1 = 23,1 \text{ МПа}$ .

2) Пустотілий металевий паралелепіпед внутрішнім об'ємом  $V_2 = 4 \text{ м}^3$ , в який нагнітається повітря до отримання тиску  $P_2 = 4,1 \text{ МПа}$ .

3) Пустотілий залізобетонний паралелепіпед внутрішнім об'ємом  $V_3 = 60 \text{ м}^3$ , в який нагнітається повітря до отримання тиску  $P_3 = 0,2 \text{ МПа}$ .

Для реалізації першого із цих варіантів можна використати ресивер повітряного високовольтного вимикача з підстанції  $750 \text{ кВ}$ , для реалізації другого варіанту можна зварити з листової сталі паралелепіпед довжиною і шириною по  $2 \text{ м}$  та висотою в  $1 \text{ м}$ , армований кутником або швелером, а для реалізації третього варіанту достатньо вирити в землі яму розмірами, наприклад,  $10,5 \text{ м} \times 3,5 \text{ м} \times 2,25 \text{ м}$ , в яку за допомогою опалубки і сталеві арматури вбетонувати залізобетонний жолоб з внутрішніми розмірами  $10 \text{ м} \times 3 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ , який накрити залізобетонними плитами, армованими на стиках металом, привареним до передбачених у відповідних місцях металевих закладних.

Скориставшись відомою залежністю [3] —

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

розрахуємо запаси енергії в кожному із повітросховищ при їх заповненні повітрям із заданим тиском.

Підставляючи в формулу (1) значення атмосферного тиску  $P_{am} = 0,1 \text{ МПа}$  та значення тиску і об'єму для кожного із наведених вище варіантів повітросховищ, отримуємо, що запаси енергії в них становитимуть:

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

Із результатів (2) видно, що, збільшуючи тиск, одну і ту ж кількість енергії можна запасти в повітросховищі менших розмірів. Але слід зазначити, що в залізобетонних повітросховищах тиск не можна збільшувати до значень, більших  $0,2 \text{ МПа}$ , оскільки при більших тисках та циклічних навантаженнях, як відомо, залізобетон швидко руйнується.

Підрахуємо масу повітря в кожному із запропонованих варіантів повітросховища, яка матиме місце при максимальному тиску.

Для цього ми спочатку скористаємось законом Бойля-Маріота [3], який для умови, що повітря в обох станах розглядається при одній і тій же температурі, можна у нашому випадку записати так:

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

де  $V_i^{am}$  – об'єм повітря, який воно займе в атмосфері після випуску з повітросховища.

Підставляючи значення відповідних параметрів із усіх трьох варіантів повітросховища, наведених вище, в формулу (3), отримуємо:

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

Але, якщо врахувати те, що при випуску повітря з повітросховища в атмосферу, з нього виходитиме повітря лише доти, доки тиск буде більшим за атмосферний, реальний «вітер» створюватиметься лише об'ємами повітря  $E_{ip}^{am}$ , які можна знайти із співвідношення:

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

Підставляючи вихідні дані та результати (4) в формулу (5), знайдемо, що

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

Оскільки із курсу фізики нам відомо, що

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

де  $\rho_{am}$  – густина повітря при атмосферному тиску, яка дорівнює  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , а  $M_i$  – маса повітря в  $i$ -тому варіанті повітросховища, яка при його випуску створюватиме «вітер», то, підставляючи результати (6) у співвідношення (7), отримуємо:

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

### 3. Структура дослідницької ПАЕС та методика оцінки її параметрів

Функціональну структуру дослідницької ПАЕС пропонуємо вибрати у варіанті, схематично представленому на рисунку, де цифрами позначені такі її елементи: 1 – повітросховище (акумулятор), 2 – регулятор тиску, 3 – дифузор, 4 – вітровий двигун, 5 – електричний генератор, 6 – запірна арматура, 7 – компресор, 8 – електропривод компресора, 9 – система електропостачання, 10 – споживач електроенергії, 11 – контрольно-вимірювальна та регулююча апаратура.

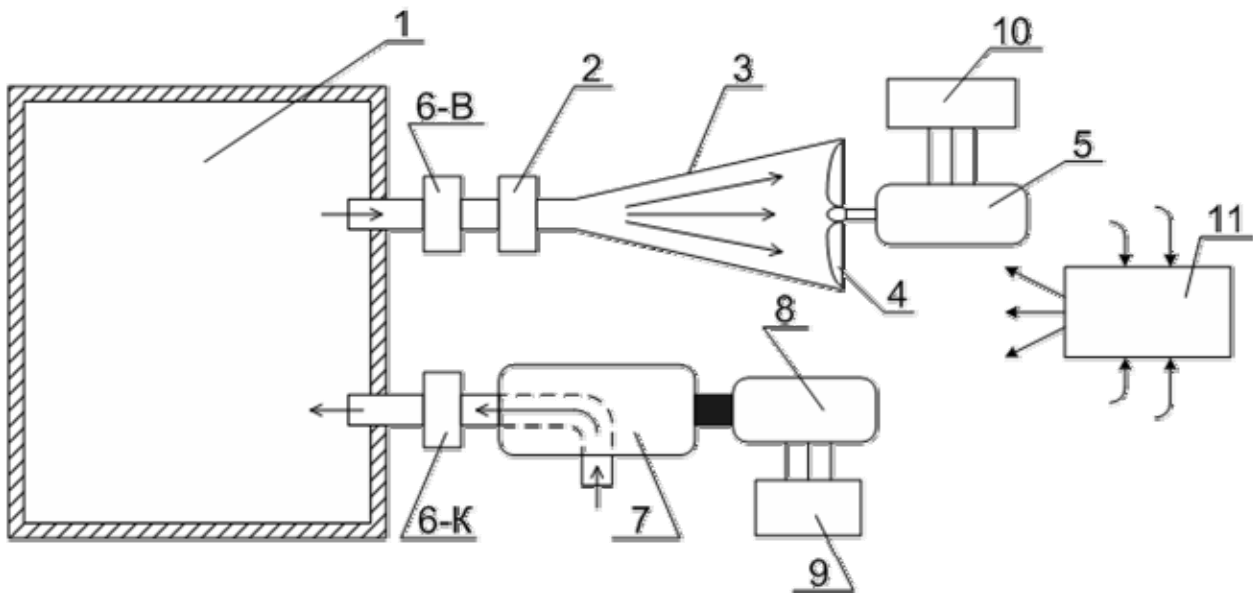


Рис. Варіант функціональної структури дослідницької ПАЕС

Очевидно, що в разі дослідження процесів синхронізації роботи ПАЕС з електроенергетичною системою елементи 9 і 10 суміщатимуться і являтимуть собою одні і ті ж шини підстанції електричної мережі.

Одразу ж відзначимо, що ми акцентуємо увагу саме на функціональній структурі ПАЕС, з якої легко простежуються основні технологічні процеси повітряної акумуляції електроенергії та перетворення енергії стисненого повітря знову в електроенергію. Поза розглядом у цій статті ми залишаємо питання оснащення елементів ПАЕС конкретною контрольно-вимірювальною та регулюючою апаратурою, оскільки, по-перше, це тема окремої статті, а по-друге, її перелік та місце встановлення визначаються тематикою досліджень.

Алгоритм функціонування ПАЕС, структура якої приведена на рис., в разі суміщення елементів 9 та 10 буде таким: при появі в електроенергетичній системі надлишку електроенергії та тиску в повітросховищі 1, меншому заданого, за допомогою регулюючої апаратури 11 та електроприводу 8 включається в роботу компресор 7, який нагнітатиме в повітросховище 1 повітря доти, доки тиск у ньому не стане рівним заданому. При досягненні цієї рівноваги регулююча апаратура 11 подає команду на запірну апаратуру 6-к і на вимикач електроприводу 8 компресора 7 – компресор відключається, канал доступу повітря в повітросховище перекривається. Під час нагнітання повітря в повітросховище 1 та після завершення цього процесу запірні апаратура 6-в тримає свій канал перекритим.

При появі в електроенергетичній системі дефіциту електроенергії за сигналом регулюючої апаратури 11 на запірну 6-в відкривається канал випуску стисненого повітря з повітросховища 1 у дифузор 3. Потік повітря, що формується дифузоровим 2, поступає на вітровий двигун 4, в якому енергія стисненого повітря перетворюється в механічну енергію обертання вала вітрового двигуна. Вітровий двигун 4 передає механічну енергію обертання свого вала ротору електричного генератора 5, в якому механічна енергія перетворюється в електричну, що подається в електроенергетичну систему. Цей процес триває доти, доки тиск в повітросховищі 1 не зрівняється з атмосферним, або в електроенергетичній системі не зникне дефіцит електроенергії. Тиск у дифузорові 3 впродовж усього процесу випуску повітря із повітросховища 1 підтримується сталим за допомогою регулятора тиску 2. Зупинитись цей процес може також за сигналом регулюючої апаратури, яка відпрацьовуватиме задану програму.

Основним режимним параметром ПАЕС є потужність  $N = f(v, D)$  у ватах, яку вона може

розвивати на валу вітрового двигуна з діаметром вітрового колеса  $D$  (у метрах) при тих чи інших швидкостях  $v$  (у метрах за секунду) вітрового потоку, який обертає вітровий двигун.

В роботі [4] показано, що розрахувати максимально можливе значення потужності  $N$  можна за формулою:

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

В таблиці показані дискретні значення залежності потужності вітрового двигуна від семи значень діаметра вітрового колеса та трьох значень швидкості вітрового потоку, які розраховані на основі формули (9).

Таблиця

Множина значень решітчастої функції  $N_{\max} = f(v, D)$  у ватах

$v$ (м/с) \ $D$ (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

Тепер знайдемо зв'язок між об'ємом  $V_{ip}^{am}$  повітря, який вийде з повітросховища в атмосферу через дифузор діаметром  $D$ , швидкістю  $v$ , з якою повітря проходить через цей дифузор, та відрізком часу  $t$ , за який увесь цей об'єм повітря вийде з повітросховища за умови, що регулятор тиску буде протягом усього цього відрізка часу підтримувати в дифузори сталий тиск.

Виходячи з умови нерозривності потоку повітря в дифузори, можна записати, що

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

звідки

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

Для вибраних нами при побудові таблиці семи значень діаметра дифузора  $D$  та трьох значень швидкості  $v$  потоку повітря в дифузори при зустрічі з вітровим колесом діаметром  $D$  для кожного об'єму робочого повітря  $V_{ip}^{am}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , користуючись формулою (11), можна знайти 21 значення відрізка часу  $t$ , протягом якого ПАЕС працюватиме в режимі генерації енергії.

Наприклад, якщо  $V_{1p}^{am} = 230 \text{ м}^3$ ,  $v = 10 \text{ м/с}$ ,  $D = 1 \text{ м}$ , то, підставляючи ці значення параметрів у формулу (11), отримаємо, що  $t = 29 \text{ с}$ . А якщо при тих же об'ємі і швидкості візьмемо  $D = 0,5 \text{ м}$  або  $D = 0,1 \text{ м}$ , то, отримаємо відповідно  $t = 116 \text{ с}$  або  $t = 2929 \text{ с}$ .

Із цих прикладів бачимо, що зменшенням діаметра дифузора і вітрового колеса ми можемо суттєво збільшити час функціонування ПАЕС в режимі генерації. Але не слід забувати, що потужність вітрового двигуна при цьому буде суттєво падати і відповідно складатиме  $279 \text{ Вт}$ , приблизно  $70 \text{ Вт}$  та близько  $3 \text{ Вт}$  (див. табл.).

Звичайно, це теоретичні розрахунки. На практиці параметри дещо відрізнятимуться від розрахункових, але для того ми і пропонуємо будувати дослідницькі ПАЕС, щоб дослідити усі ці розходження і привести отримані математичні моделі до адекватних варіантів.

#### 4. Висновки

1. Обґрунтовано доцільність і перспективність побудови дослідницьких ПАЕС з об'ємами повітросховищ, порівняно невеликими, але придатними для дослідження процесів в них.
2. Запропоновано кілька варіантів реалізації повітросховищ і функціональну структуру ПАЕС.
3. Розроблено методики оцінки основних параметрів ПАЕС і на конкретних прикладах продемонстровано їх застосування.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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.

*Мокін Борис Іванович* — професор кафедри моделювання та моніторингу складних систем;

*Чепурний Марко Миколайович* — доцент кафедри теплоенергетики;

*Мокін Олександр Борисович* — старший науковий співробітник НДЛ АСУЕТ.  
Вінницький національний технічний університет