

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра Відновлюваних джерел енергії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Лібенка Олександра Миколайовича
(ПІБ)

академічної групи 141М-17-3
(шифр)

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
(офіційна назва)

на тему Обґрунтування можливості використання пневматичних систем
(назва за наказом ректора)
акумуляції в автономних системах

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи				
розділів:				
Розділ 1				
Розділ 2				
Розділ 3				
Рецензент				
Нормоконтролер				

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
Відновлюваних джерел енергії
(повна назва)

Шкрабець Ф.П.

(підпис) (прізвище, ініціали)
" ____ " _____ 2018 року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу**

кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Лібенко О.М. академічної групи 141м-17-3
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
(офіційна назва)

на тему Обґрунтування можливості використання пневматичних систем
акумуляування в автономних системах
(назва за наказом ректора)

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 12.11.18 № 1913-л

Розділ	Зміст	Термін виконання

Завдання видано _____
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі **10.10.2018**

Дата подання до екзаменаційної комісії **24.12.18**

Прийнято до виконання _____
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 51 стор., рис. - 15, таблиць - 5, додатків - 1.

Об'єктом дослідження є воднево-повітряні газотурбінні системи акумулювання енергії у електростанціях з ВДЕ.

У вступі розглядаються стан проблеми енергетичного акумулювання у електростанціях з ВДЕ в Україні, сформульовано основні завдання магістерської дисертації.

У першій частині розглянуті системи акумулювання різноманітних видів енергії та їх особливості, що впливають на режими роботи електроенергетичних систем. Розглянуті принципи будови системи акумулювання різноманітних видів сформульована наукова задача роботи.

У другій частині виконано обґрунтування структури газової системи акумулювання енергії. Визначені параметри водневих-повітряних газотурбінних системи акумулювання енергії та виконано розрахунок основних параметрів воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання. З метою оцінки ефективності параметрів воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання проведено аналіз впливу та зроблені висновки щодо застосування таких систем.

В економічному розділі виконано розрахунок капітальних і експлуатаційних витрат, дано техніко-економічне обґрунтування розроблених заходів.

СОНЯЧНІ СТАНЦІЇ, ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА, ПНЕВМОАККУМУЛЮЮЧІ СИСТЕМИ, ГІБРИДНІ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ, ПОВІТРЯНО-АКУМУЛЮЮЧИ ГАЗОТУРБІННІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ВОДНЕВО-ПОВІТРЯНІ ГАЗОТУРБІННІ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ

ABSTRACT

Explanatory note: 51 stor., Fig. - 15, table - 5, data - 1.

Об'ктом doslidzhennya є vodnevo-pov_ tryani gazoturbinni systems akumulyuvannya energii at elektrostantsiyah v VDE.

At the beginning of the meeting there are problems of energetic akumiulyuvannya at electrical power stations from all over Ukraine in Ukraine, the main focus of the magisterial dissertation has been formulated.

In the first part of the system, akumulyuvannya i аН аН аН в еН нИХ та та особ х иИ, you can use the robots of power systems. The principles of budovi system and akumulyuvannya riznomantnykh vidiv are shaped by the scientific task of the robot.

The friend of the part of the Viconno obruntuvannya the structure of the gas system and Akumulyuvannya energii. Vznacheni parametres of water-gas-turbine gas systems of the Akumulyuvannya Energiya and Vikonano rosrahunka of the main parameters of the water-turbulent gas-turbine system of Akumulyuvannya. With the help of the assessment of the parameters of the gas-turbine gas-turbine system of the Akumulyuvannya, an analysis was conducted on the subject of such systems.

In ekonomichnomu rozdili vikonano rosinhok kapitalnikh i i ekspluatatsiynykh vitrat, given tehniko-ekonomične oburuvanuvnya rozroblenikh zodiviv.

SOLAR POWER STATIONS, HYDROGEN POWER ENGINEERING, PNEUMATIC ACCUMULATING SYSTEMS, HYBRID POWER PLANTS, AIR-ACCUMULATING GAS TURBINE POWER STATIONS, HYDROGEN-AIR GAS TURBINE STORAGE SYSTEMS

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Огляд систем акумулювання енергії	9
1.1. Системи акумулювання енергії	9
1.2. Огляд систем акумулювання різноманітних видів енергії	13
2. Обґрунтування структури газової системи акумулювання енергії ...	31
2.1 Вибір способу і засобів акумулювання енергії, що виробляється електростанцією на поновлюваних джерелах енергії.. ..	31
2.2. Параметри водневих-повітряних газотурбінних системи акумулювання енергії.	37
2.3. Розрахунок основних параметрів воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання.	41
2.4. Висновки о параметрах воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання	46
3. Техніко-економічне обґрунтування.	47
3.1 Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень	47
3.2 Розрахунок капітальних витрат.	48
3.3 Розрахунок експлуатаційних витрат.	49
3.4 Визначення та аналіз показників економічної ефективності	52
3.5 Висновки	53
Висновки.	54
Перелік посилань	55
Додаток А	57

Вступ

Широке використання енергокомплексів з рядом ВДЕ для енергозабезпечення децентралізованих споживачів може сформувати новий підхід до розвитку теорії та практики відновлюваної енергетики.

Серед відновлюваних джерел енергії широко поширені вітроенергетичні, малі гідроенергетичні (в т. ч. мікро-, міні- і малі ГЕС) сонячні установки: сонячні колектори, сонячні фотоелектричні перетворювачі, біогазові установки, а в числі нетрадиційних джерел енергії (тепла) - теплові насоси з використанням в випарнику низько потенційного тепла ґрунту, скидних вод очисних споруд, теплових стоків промислових відходів або просто навколишнього повітря до невеликих негативних температур [1].

Всі зазначені джерела енергії можуть використовуватися або в моноенергостанціях, що використовують один вид обладнання (ВЕУ або, наприклад, ФЕП), або в тій чи іншій конфігурації в складі комплексних установок, що складаються, як правило, з дизель-генератора (для гарантованого забезпечення енергією) і варіативного набору декількох поновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в різних поєднаннях.

Так, відомі комплексні вітросонячні, вітродизельні і дизель-вітросонячні установки, що використовують два або три ВДЕ. Таким чином, гіпотетично можливе підвищення резервування енергокомплексів з урахуванням місцевих, регіональних чи територіальних можливостей до відповідних Енергокомплекси на основі ВДЕ.

Впровадження комплексних систем енергопостачання на основі ВДЕ може сприяти прискореному вирішенню завдань по досягненню заданого рівня вироблення енергії на базі відновлюваних джерел певних енергетичною стратегією України [2].

В зв'язку з тим, що від системи акумулювання в значній мірі залежить робота енергосистеми, забезпечення ефективної роботи системи

акумуляції за рахунок узгодження джерела енергії і акумулятора є однією з найважливіших задач при проектуванні автономних енергосистем.

Через велику вартість системи акумуляції (20 – 30% від вартості енергосистеми) визначення оптимальної ємності системи акумуляції, при якій стабільне забезпечення споживачів гарантується із заданою ймовірністю, є також важливою задачею. Таким чином, окреслені задачі є одними з пріоритетних, і роботи в цьому напрямку будуть вагомим внеском в розв'язання проблеми підвищення ефективності автономних енергосистем на основі ВДЕ [3, 4].

При добовій і сезонній нерівномірності вироблення електроенергії значна економія традиційних енергоносіїв може бути досягнута шляхом акумуляції енергії, вироблюваної в періоди її мінімального споживання. Особливо важливо мати системи, що запасують енергію, при експлуатації установок з нерегулярним виробленням протягом доби або триваліших періодів - вітрових, сонячних. Проблема не вирішується із застосуванням електроакумуляторів - вони дуже коштовні, громіздкі і мають малу ємність. Гідроакумуляуючі станції, дозволяють повернути в енергосистему в години пік до 70% енергії, накопиченої в години мінімуму споживання, проте їх будівництво доцільне в місцевостях з гористим рельєфом, де поруч розташовані зручні ділянки для верхнього і нижнього водойм [5].

Пріоритетна мета сучасних досліджень в області комплексних автономних систем на базі відновлюваної енергетики - розробка ефективних рішень енергозбереження на основі отриманого світового і вітчизняного досвіду

Одне з сучасних напрямків, які отримали досить широкий розвиток в Німеччині – конструювання дослідного зразка енергетичної установки одержання стисненого повітря за допомогою вітроенергетичних і (або) фотоелектричних установок і пневматичного перетворення повітряних мас для створення безпаливної системи отримання електрики і тепла.

Актуальність роботи пов'язана з необхідністю кардинального Підвищення автономності, надійності, економічності, екологічної безпеки енергопостачання промислових, технологічних і військових об'єктів і населення в ізольованих населених пунктах Економічне і екологічно чисте енергозабезпечення об'єктів є однією з ключових проблем розвитку України.

Практичний досвід ефективного (надійного і економічного) використання автономних джерел енергопостачання споживачів на базі поєднання ВЕУ, СЕС та систем акумулювання і перетворення енергії на пневматичному принципі в світі в даний час практично відсутня.

На підставі вищевикладеного обґрунтування можливості використання пневматичних систем акумулювання в автономних системах є актуальним напрямком дослідження.

У роботі розглядається можливість впровадження воднево-пневматичної системи акумулювання енергії в системах генерації електричної енергії з відновлювальними джерелами енергії. На підставі запропонованих необхідних параметрів, акумулюючої системи для ВДЕ, розраховується параметри воднево-пневматичної системи акумулювання енергії.

Розділ 1. Системи акумулювання енергії

1.1. Огляд систем акумулювання енергії

Під акумулюванням (накопиченням) енергії розуміється введення будь-якого виду енергії в пристрій, обладнання, установку або споруду – в акумулятор (накопичувач) енергії – для того, щоб цю енергію звідти потім у зручний для споживання час знову в тому ж або в перетвореному вигляді отримати назад.

Для зарядки акумулятора енергією іноді потрібна додаткова енергія, і в процесі зарядки можуть виникати втрати енергії. Після зарядки акумулятор може залишатися в стані готовності (в зарядженому стані), але і в цьому стані частина енергії може втрачатися через довільного розсіювання, витоку, саморозряду або інших подібних явищ. При віддачі енергії з акумулятора також можуть виникати її втрати; крім того, іноді неможливо отримати назад всю акумульовану енергію. Деякі акумуляторні батареї влаштовані так, що в них і повинна залишатися деяка залишкова енергія. Стан акумулятора при споживанні енергії, під час готовності, при віддачі енергії і після віддачі схематично представлено на рис. 1.1.

На рис. 1.1. використані міжнародні стандартні індекси in (лат. Inductio, 'Введення'), ex (лат. Excessus, 'вихід'), d (лат. Dissipatio, 'розсіювання') і res (лат. Residuum, 'Залишок').

Акумулювання енергії зазвичай розуміється як цілеспрямована дія. Однак енергія може акумулюватися (накопичуватися) і незалежно від волі або дій людини – в результаті фізичних процесів, що відбуваються в природі або в штучних пристроях. Як приклад на рис. 1.2. представлені деякі процеси акумулювання енергії в природі. Крім них слід відзначити:

- дуже велику кількість тепла, що міститься в гарячих рідких внутрішніх шарах Землі;
- кінетичну енергію обертання Землі навколо Сонця і навколо своєї осі;
- кінетичну енергію вітру, водних потоків і рухомих предметів;
- хімічну енергію, накопичену в живих істотах.

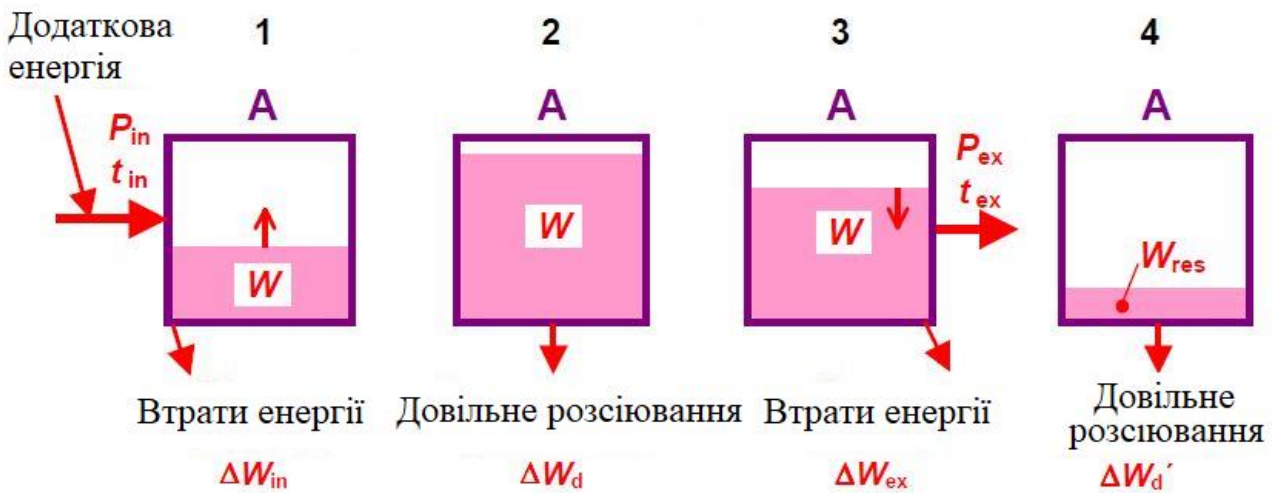


Рис. 1.1. Стан акумулятора енергії (А) (спрощено):

1 прийом енергії, 2 стан готовності, 3 віддача енергії, 4 розряджений стан;
 P_{in} споживана потужність, P_{ex} потужність, що віддається, t_{in} тривалість зарядки,
 t_{ex} тривалість віддачі енергії, W акумуляована енергія, W_{res} залишкова енергія,
 ΔW_{in} втрати при зарядці, ΔW_{ex} втрати при віддачі енергії, ΔW_d втрати енергії
через довільного розсіювання.



Рис. 1.2. Приклади акумуляції енергії в природі

При штучному акумулюванні енергії можуть ставитися такі мети:

- створення запасу енергії (зазвичай у вигляді запасів палива) при переривчастому прибутті енергоносіїв, а також на випадки тимчасового припинення поставок енергії або виникненні кризових ситуацій і т. п.;
- отримання великої короткочасної потужності від джерел живлення обмеженої потужності, наприклад, для живлення ламп-спалахів або установок точкового зварювання (рис. 1.3);
- здійснення енергопостачання, незалежного від зовнішніх джерел енергії, наприклад, в засобах пересування, при використанні переносного і переміщуваного обладнання (рис. 1.4);
- вирівнювання змінного навантаження, наприклад, в поршневих механізмах, при використанні пневматичних інструментів, при надмірній нерівномірності добових графіків навантаження енергосистем (рис. 1.5) і в інших подібних випадках.

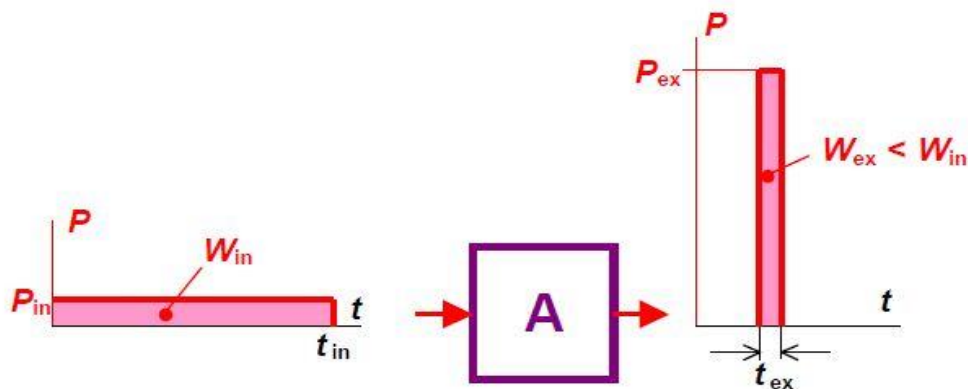


Рис. 1.3. Застосування акумулятора енергії (А) для отримання імпульсу енергії підвищеної потужності

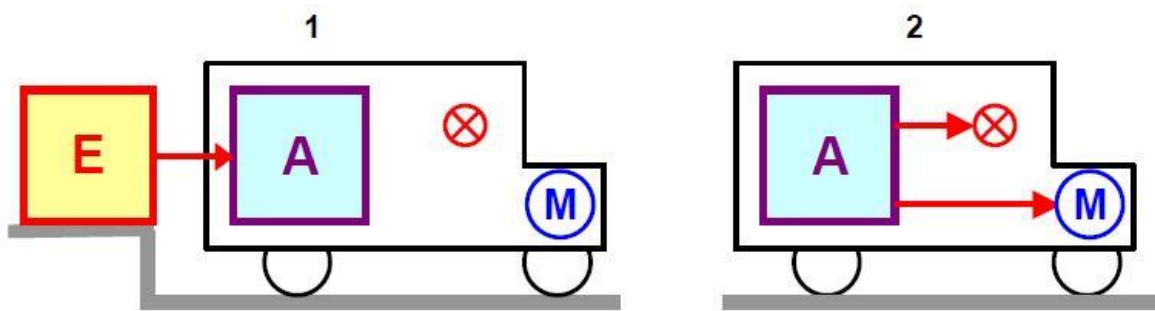


Рис. 1.4. Приклад застосування акумулятора енергії

в передвіжному енергоспоживачеві:

1 зарядка акумулятора від стаціонарного джерела електроенергії (E),

2 використання акумуляованої енергії

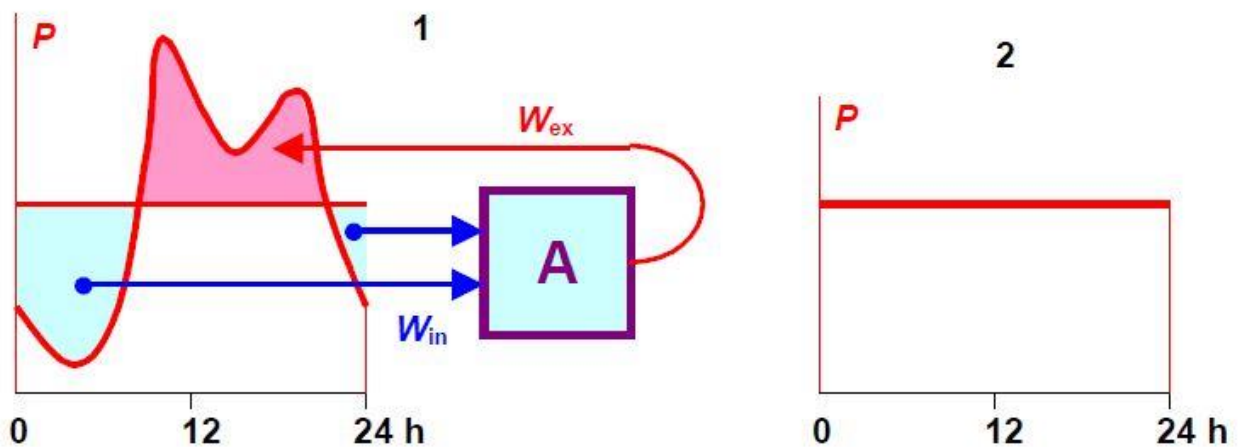


Рис. 1.5. 1 – вирівнювання добового графіка навантаження шляхом акумулявання енергії W_{in} під час нічного мінімуму навантаження і використання акумуляованої енергії W_{ex} для покриття денних піків навантаження; 2 – одержуваний в ідеальному випадку рівномірний графік навантаження

Акумулятори енергії зазвичай характеризуються:

- видом акумуляується енергії (електроенергія, тепло, механічна енергія, хімічна енергія та ін.);
- кількістю енергії, що акумуляується;
- споживаною і віддаваною потужністю;
- тривалістю зарядки і віддачі енергії;

- ккд акумуляції $\eta = W_{ex} / W_{in}$, W_{ex} енергія, що віддається з акумулятора, W_{in} споживана акумулятором енергія;
- питомої акумулюючої здатності на одиницю маси або об'єму;
- абсолютною і питомою вартістю акумулятора;
- питомою вартістю одержуваної з акумулятора енергії.

1.2. Огляд систем акумулювання різноманітних видів енергії

Вельми просто акумулювати потенційну енергію в *вантажних* акумуляторах (рис. 1.6), що використовуються в різних ударних механізмах, заснованих на вільному падінні (наприклад, в копрах), і в вантажних приводах (Наприклад, в маятникових настінних годиннику, порівняно недавно - і в приводах деяких вимикачів високої напруги).

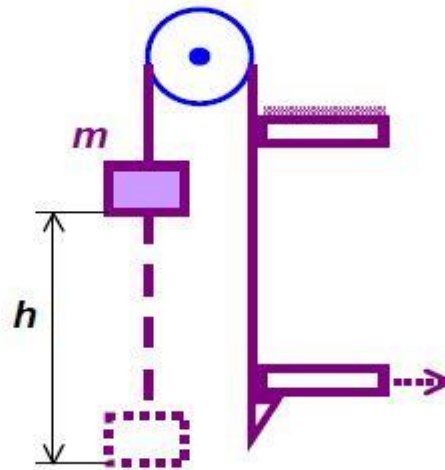


Рис. 1.6. Принцип пристрою вантажного акумулятора.

Енергія, запасені в вантажному акумуляторі, виражається простою формулою:

$$W = m \cdot g \cdot h, \quad (1.1)$$

де W – запасені енергія, Дж; m – маса вантажу, кг; g – прискорення тяжіння м/с^2 (на рівні землі $g = 9,81 \text{ м/с}^2$); h – висота підйому вантажу, м.

У пружині енергія акумулюється при пружної деформації і звільняється при поверненні пружини в первісний стан.

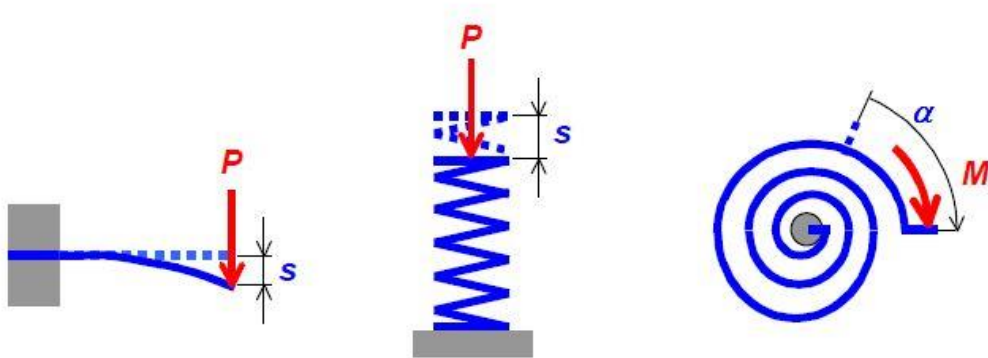


Рис. 1.7. Деякі види пружин.

зліва – пружина згину, в середині – кручена пружина стиснення, праворуч – спіральна пружина. P – діюча сила, M – діючий крутний момент, s – лінійна деформація, α – кутова деформація.

Деформація пружини може виражатися формулою:

$$s=P/c, \quad (1.2)$$

де s – деформація пружини, м; P – діюча сила, Н; c – жорсткість пружини, Н.

Якщо на початку деформування діюча сила дорівнює нулю, то запасена в пружині енергія в кінці деформування дорівнює:

$$W=(P \cdot s)/2=(c \cdot s^2)/2, \quad (1.3)$$

де W – запасена енергія, Дж.

У разі спіральних пружин діючу силу в цих формулах необхідно замінити на діючий обертаючий момент, а лінійну деформацію – на кутову деформацію.

Пружини широко застосовуються в ударних та інших швидкодіючих механізмах (в тому числі в механізмах швидкого відключення електричних апаратів), в амортизаторах ударів і вібрації, в коливальних механізмах і в

пружинних приводах. Завдяки простоті, дешевизні і надійності вони іноді знаходять застосування і в якості приводу малопотужних електрогенераторів (наприклад, в апаратах зв'язку, передбачених для використання в польових умовах).

ККД вантажних і пружинних акумуляторів енергії, в порівнянні з іншими способами акумуляції, досить високий (майже 100%), але їх питома акумулююча здатність відносно мала. Набагато більш ефективно енергія може акумулюватися в маховику (рис. 1.8).

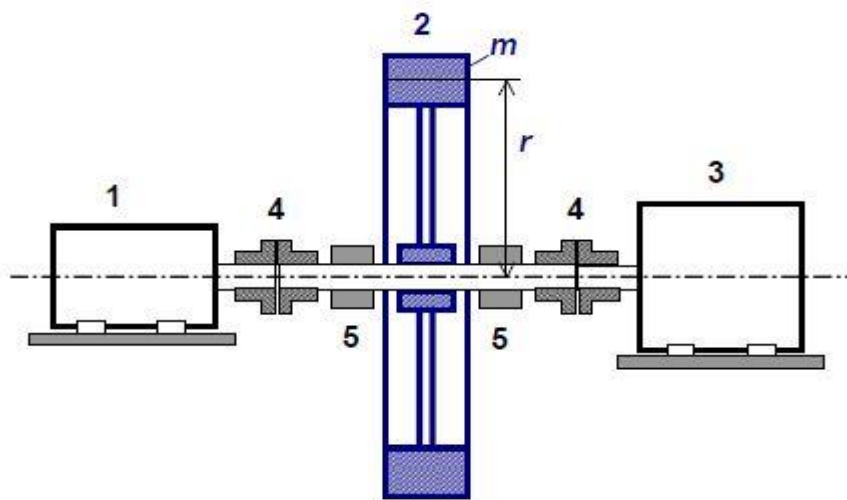


Рис. 1.8. Приклад принципу пристрою маховикового приводу. 1 – приводний двигун, 2 – маховик (в розрізі), 3 – робоча машина (Енергоприймач), 4 – муфти (в розрізі, механізми зчеплення не показані), 5 – підшипники (опорні конструкції не показані). m – маса маховика, кг; r – радіус інерції, м.

Енергія, акумульована (збережена) в обертовому маховику, виражається формулою:

$$W = (J \cdot \omega^2) / 2,$$

де W – акумульована енергія, Дж; J – момент інерції маховика кгм^2 ; ω – кутова швидкість обертання рад/с.

Момент інерції визначається, як відомо, формулою:

$$J=m \cdot r^2,$$

де m – маса маховика, кг; r – радіус інерції, м; приблизно можна вважати, що цей розмір дорівнює середній відстані перетину ободу маховика від осі обертання.

Тому питому акумулюючу здатність маховика можна виражати у вигляді:

$$w=W/m=(r^2 \cdot \omega^2)/2,$$

де w – питома акумулююча здатність Дж/кг.

Ось маховика може бути або горизонтальною (як на рис.1.8), або вертикальною. Так як у даний час частота обертання маховиків може складати (2000, ... 65 000) об/хв або кутова швидкість (200 ... 6800) рад/с, а радіус інерції відповідно не більше 1 м або 0,2 м, то їх питома акумулююча здатність знаходиться у межах від 20 кДж/кг до 930 кДж/кг або від 5 Втгод/кг до 260 Втгод/кг. Якщо врахувати і масу опорних конструкцій, підшипників і оболонки, то ця величина зменшиться приблизно у два рази, але залишається все ж майже на три порядки вище, ніж у вантажних і пружинних акумуляторів. При великих швидкостях (починаючи приблизно з 20 000 об/хв) відцентрові сили настільки зростають, що маховики доводиться виготовляти часто не з спеціальної сталі, а з міцніших матеріалів (наприклад, армованих вуглецевими волокнами). При таких швидкостях, крім того, замість кулькових або роликових підшипників необхідно користуватися електромагнітними. Дуже часто це істотно підвищує вартість махових акумулюючих пристроїв, через що і собівартість акумульованої енергії може досягати від декількох сотень до 25 000 євро за кіловат-годину. Однак завдяки надійній конструкції, великому терміну служби, відносно малим розмірам, високому ККД (від 92% до 95%) і великій акумулюючій здатності (від 1 МДж до 6 ГДж) вони часто знаходять застосування:

➤ для вирівнювання нерівномірності обертаючого моменту приводного двигуна або робочої машини, наприклад, у разі двигунів внутрішнього згорання або поршневих компресорів;

➤ у агрегатах гарантованого безперебійного електроживлення для перекриття короточасних перерв електропостачання у електричних мережах (тривалістю від декількох секунд до декількох хвилин);

➤ для отримання великої короточасної (імпульсної) потужності;

➤ для забезпечення автономної роботи засобів пересування або інших енергоприймачив на певному проміжку часу (до декількох десятків хвилин).

У 1970 у інституті ядерних дослідженні у Гархинге (Garching, Німеччина) була запущена найпотужніша у світі Маховикова установка з вихідною потужністю 100 МВт, що віддається протягом двох хвилин.

Набагато дешевше акумулювати механічну енергію *пневматичним* способом, за допомогою стислого повітря, так як резервуар стислого повітря максимально (Рис. 1.9) простий і не вимагає практично ніякого догляду.

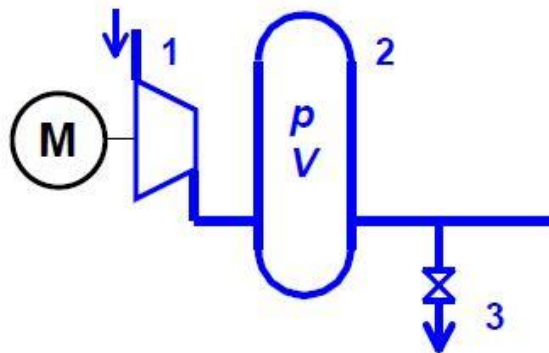


Рис. 1.9. Принцип пристрою пневматичного акумулятора:

1 – компресор, 2 – резервуар стислого повітря, 3 – приєднання до приймачу стислого повітря. p – тиск, V – обсяг бака

Тиск у резервуарі стислого повітря визначається приймачами стислого повітря і складає, наприклад, для живлення пневматичних (0,2 ... 0,5) МПа інструментів, а для приводів вимикачів високої напруги – 2 МПа. Енергія, що звільняється при розширенні стислого повітря, залежить від характеру зміни тиску під час розширення і не може однозначно визначатися обсягом бака V_0 і тиском p . Однак якщо початковий тиск набагато більше кінцевого (наприклад, 2

МПа при кінцевому тиску у 0,1 МПа), то одержувану енергію з деякою погрішністю, але сильно спрощено, можна вважати рівною потенційної енергії, запасеною у баку, і виразити формулою:

$$W=(p \cdot V_0)/2,$$

Враховуючи що:

$$V_0=(p/p_0)V; V=m/\gamma; \gamma=(p/p_0)\gamma_0,$$

де m – маса повітря у баку кг; γ – щільність повітря при тиску p кг/м³; γ_0 – щільність повітря при тиску p_0 (при атмосферному тиску) кг/м³.

Отримуємо:

$$W=(p^2 \cdot V/2 \gamma_0)=(pm/ \gamma_0),$$

Отже, у такому випадку питома акумулююча здатність резервуара стислого повітря дорівнює:

$$w=W/m=p/2 \gamma_0,$$

При тиску 2 МПа і щільності повітря 1 кг/м³ питома акумулююча здатність резервуара стислого повітря становить за цим розрахунком 1 МДж/кг.

Питома акумулююча здатність пневматичного акумулятора у цілому набагато менше, так як маса резервуара у кілька разів більше, ніж маса запасеного у ньому стислого повітря. Дуже приблизно можна вважати, що питома акумулююча здатність пневматичних акумуляторів при тиску (0,2 ... 2) МПа становить (0,01 ... 0,2) МДж/кг або (3 ... 60) Втч/кг. ККД акумулятора складає приблизно 50%, а собівартість акумульованої енергії – приблизно 50 €/кВтч.

Гідроенергія є, по суті, однією з різновидів механічної енергії, але відрізняється від інших різновидів тим, що її можна акумулювати у дуже великих кількостях і використовувати при такій потужності і у таких проміжках часу, які дозволяють істотно вирівнювати змінну навантаження енергосистем і забезпечити більш рівномірний режим роботи теплових (у тому числі атомних) електростанцій.

Для акумулювання і наступного використання гідроенергії споруджуються гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС), принцип пристрою яких представлений на рис. 1.10. До такої станції відносяться два водосховища (верхнє і нижнє), різниця рівнів яких при повністю заповненому верхньому сховищі зазвичай становить від 50 м до 500 м. В машинному залі є оборотні агрегати, які можуть працювати як двигуни-насосів, так і турбінами-генераторів; при високому напорі (приблизно 500 м або більше) використовуються окремі насосні і турбінні агрегати.

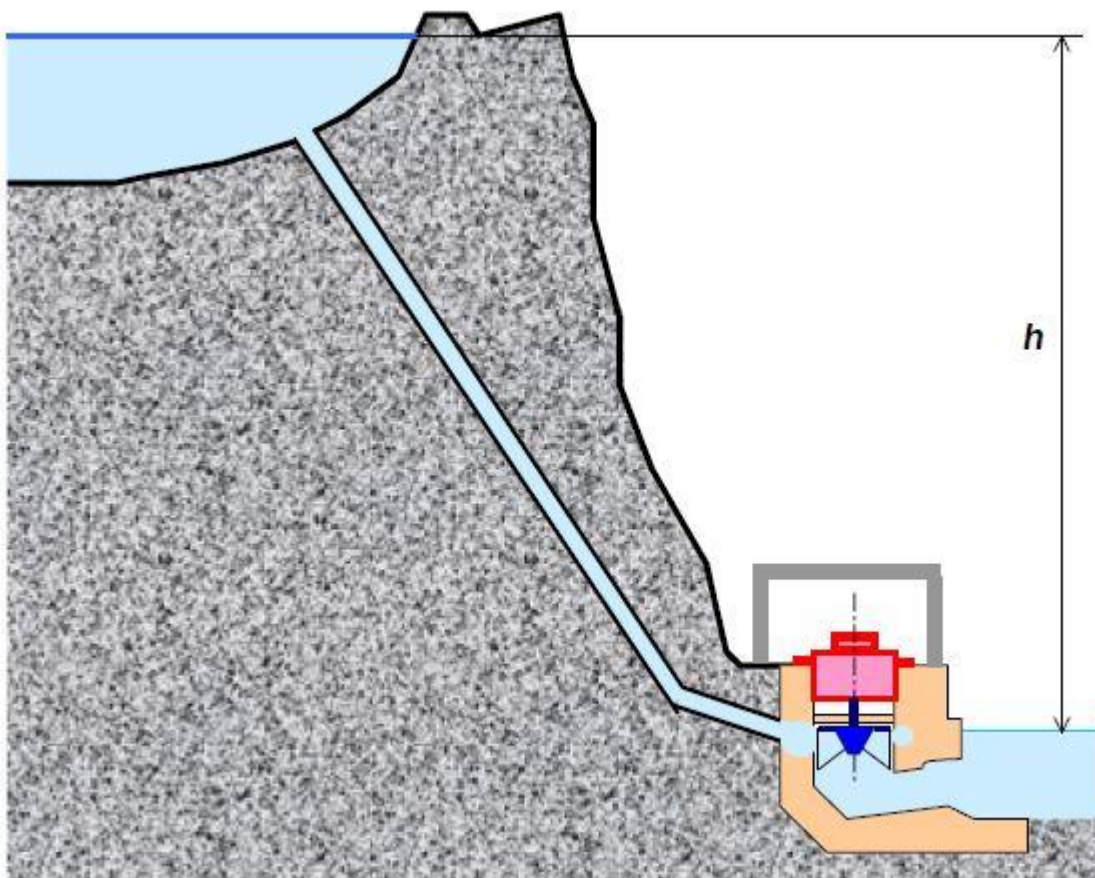


Рис. 1.10. Принцип пристрою гідроакумулюючої електростанції.

Під час, коли навантаження енергосистеми мінімальна (наприклад, вночі) ці агрегати заповнюють водою верхнє водосховище, а у час пікового навантаження системи перетворюють накопичену гідроенергію в електричну. Незважаючи на те, що ККД такого акумулювання дорівнює (70 ... 85)% і що собівартість одержуваної таким способом електроенергії забагато (до декількох разів) вище, ніж на теплових електростанціях, вирівнювання графіка навантаження і можливість зменшення номінальної потужності теплових електростанцій знижують експлуатаційні витрати енергосистем і цілком виправдовують спорудження ГАЕС.

Як у випадку вантажних акумуляторів, так і у разі ГАЕС акумульована енергія може обчислюватися формулою:

$$W=m \cdot g \cdot h,$$

Питома акумулююча здатність також виражається аналогічно вантажним акумуляторів:

$$w=W/m=g \cdot h,$$

При напорі (50 ... 500) м отримуємо питомий енергозміст води $w = (0,5 \dots 50)$ кДж/кг або $(0,14 \dots 14)$ кВтч/кг. Водосховища великих ГАЕС дозволяють акумулювати енергію у кількості $(1 \dots 10)$ ГВтч. Особливо важливою вважається спільна робота ГАЕС з атомними електростанціями, щоб ті могли працювати якомога з більш рівномірним навантаженням.

Акумулювання тепла. Тепло можна акумулювати відносно просто – шляхом нагрівання твердих речовин або рідин. Відбір тепла з такого акумулятора може відбуватися природною або примусовою конвекцією, випромінюванням або за допомогою будь-якого теплоносія. Принцип пристрою найпростішого теплового акумулятора представлений на рис. 1.11.

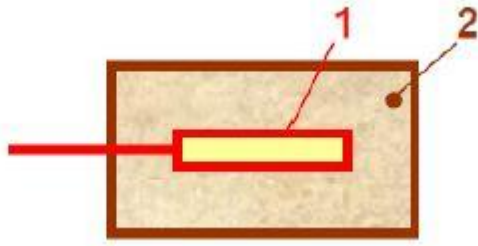


Рис. 1.11. Принцип пристрою теплового акумулятора:

1 – електричний або інший нагрівач, 2 – теплоакumuлююче речовина.

Акумульована кількість тепла визначається формулою:

$$W = m \cdot c (\theta_2 - \theta_1),$$

де W – акумульоване тепло, Дж; m – маса акумулюючої речовини, кг; c – питома теплоємність акумулюючої речовини, Дж / (кг К); θ_2 – кінцева температура нагріву, °С; θ_1 – початкова температура нагріву або кінцева температура охолодження, °С.

Питома акумулююча здатність дорівнює, відтак:

$$w = W/m = c \cdot (\theta_2 - \theta_1),$$

Однією з кращих теплоакumuлюючих речовин, завдяки своїй доступності, дешевизні, нешкідливості для навколишнього середовища і великої питомої теплоємності (4,2 кДж/(кг К)), є вода. Однак при атмосферному тиску воду можна нагріти без побоювання закипання тільки до температури 95 °С і, якщо вибрати температуру в кінці охолодження, наприклад, 45 °С, то отримуємо: $w = 4,2 (95 - 45) \approx 200$ кДж/кг ≈ 60 Вт·ч/кг.

Для акумулювання тепла можуть використовуватися і метали, природні та штучні кам'янисті породи, хімічні сполуки та ін. Їх питома теплоємність менше, ніж у води, і знаходиться зазвичай в межах від 0,5 кДж/(кг К) до 2 кДж/(кг К), але їх можна нагрівати до більш високої температури (наприклад, до 750 °С).

Питома акумулююча здатність таких матеріалів, в залежності від питомої теплоємності і допустимої температури нагріву, знаходиться зазвичай в межах від 50 Вт·год/кг до 400 Вт·год/кг. В електричних акумулюючих опалювальних приладах якості акумулюючої речовини часто використовують магнезит (кам'янисту породу, що складається головним чином з окису магнію), питома теплоємність якого дорівнює 1,3 кДж/(кг К), щільність – 3500 кг/м³ і жароміцність – 2000 °С. Температура нагріву його, враховуючи теплостійкість і допустиму температуру інших матеріалів теплоаккумулятора, зазвичай не перевищує 800 °С, що, в разі кінцевої температури охолодження $\theta_1 = 150$ °С, дає питому акумулюючі здатність 230 Вт·год/кг.

Ефективно може акумулюватися і теплота плавлення деяких матеріалів. В такому випадку акумульована енергія виражається формулою:

$$W=m[c_t \cdot (\theta_s - \theta_1) + C + c_s \cdot (\theta_2 - \theta_s)],$$

де c_t – питома теплоємність в твердому стані Дж/(кг К); c_s – питома теплоємність в рідкому стані Дж/(кг К); C – теплота плавлення Дж/кг; θ_1 – початкова температура °С; θ_s – температура плавлення °С; θ_2 – температура нагріву °С.

Часто з цією метою використовується гідроксид натрію (NaOH, каустична сода, їдкий натр), питома теплоємність якої дорівнює $c_t \approx c_s \approx 2,1$ кДж/(кг·К), теплота плавлення $C = 180$ кДж/кг і температура плавлення $\theta_s = 322$ °С. При нагріванні до температури 600 °С і охолодженні до температури 150 °С її питома акумулююча здатність дорівнює приблизно 310 Вт·год/кг. Ще більшої акумулюючої здатності – до 600 Вт·год/кг – можна домогтися в разі використання фторидів натрію, магнію і літію.

На акумулюванні тепла ґрунтується пічне опалення, де в якості акумулюючої речовини використовуються матеріали печі (вогнетривка цегла, кахельна цегла, керамічні плитки та ін.). Акумулювання тепла часто доцільно і в електричному опаленні, де для цієї мети можуть використовуватися акумулюючі

електронагрівачі, а також будівельні конструкції будівель, насамперед підлогу і міжповерхові перекриття.

Акумулявання тепла в великих кількостях може виявитися доцільним на електростанціях. Наприклад:

- акумулятори перегрітої пари між котлом і турбіною для вирівнювання витрати пари, коли навантаження турбогенератора в часі занадто нерівномірне;
- акумулятори гарячої води на теплоелектроцентралях, щоб забезпечити більш рівномірне навантаження ТЕЦ при добових коливаннях теплоспоживання;
- акумулятори нагрітого рідкого теплоносія між сонячним нагрівальним пристроєм і парогенератором сонячної електростанції, щоб забезпечити роботу станції при коливаннях і перервах прямого сонячного випромінювання.

Водневе акумулявання енергії. Зазвичай водневе акумулявання енергії розглядається у вигляді ланцюжка, зв'язуючої первинне джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку. Щодо застосування з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) цей ланцюжок зводиться як правило до отримання водню шляхом електролізу, зберігання водню в стислому або твердофазному пов'язаному вигляді і отримання електричної енергії з використанням електрохімічних генераторів (паливних елементів) або водородоспалюючих установок (включаючи двигуни внутрішнього згорання).

Подібна система розглядається в якості буфера між електричною мережею і ВДЕ і призначена не тільки для довготривалого зберігання енергії, а й для згладжування суттєвих пульсацій, пов'язаних зі змінним характером ВДЕ.

Водень можна зберігати або в чистому вигляді, або у вигляді хімічних сполук з високим вмістом водню, з яких, при необхідності, він може бути легко одержаний безпосередньо на борту транспортного засобу в одному з наступних процесів:

Зміна параметрів або агрегатного стану водню:

- стиснення газу або комбінований процес стиснення і охолодження;

- зрідження водню. Водень, що володіє низькою критичною температурою, необхідно охолоджувати до температури нижче 20 К, щоб зберігати його в рідкому стані в посудинах без надлишкового тиску.

Сполука водню з іншими речовинами:

- адсорбція газоподібного водню деяким відповідним адсорбентом, наприклад, активованим вугіллям;

- утворення сполук з високим вмістом водню. Такими сполуками можуть бути:

- з'єднання з сильним водневим зв'язком, що вимагають реалізації щодо складних хімічних процесів для отримання водню. До таких сполук можна віднести, наприклад, метанол, етанол, аміак, а також воду, яку можна розглядати як «носій» водню;

- з'єднання, які можуть бути оборотно перетворені в інші речовини з більш високим (або низьким) вмістом водню;

- гідриди металів, тобто з'єднання «метал» - «водень», що володіють властивістю оборотно абсорбувати і десорбувати водень при зміні температури.

Характеристики первинних джерел енергії та графіків споживання надають істотний вплив на основні технічні та економічні характеристики як окремих агрегатів, так і системи акумулювання. Серед інших технологій зберігання енергії водневе акумулювання відрізняється відносно низьким ККД (40 ... 60%), однак цей недолік компенсується достоїнствами водневих систем, серед яких виділяються можливість тривалого зберігання енергії без втрат, що недосяжно для хімічних джерел струму, висока щільність зберігання енергії і малі капітальні витрати в порівнянні з ГАЕС і ПАЕС.

Зокрема, при добовому зберіганні водню в металлогідридній системі і виробництві електроенергії для кінцевого споживача з використанням ТПТЕ частина вартості електроенергії, пов'язана із зберіганням водню, становить близько 1,2 цента США/кВт·год, а при зберіганні водню протягом 30 діб - 12 центів США/кВт·год. Повна вартість пікової електроенергії в залежності від

режимів і методів зберігання і споживання водню змінюється від 19 до 60 центів США за кВт·год.

Відомі різні способи виробництва водню, починаючи від традиційних, таких як електроліз води і конверсія вуглеводнів, і закінчуючи біологічними методами, коли водень виділяється спеціально підібраними мікроорганізмами. У світі промисловим способом виробляється близько 50-60 млн.т. водню, при цьому практично 95% виробленого водню виходить з сировини, що містить вуглець, в першу чергу викопного – природного газу і вугілля, а також нафтопродуктів. Велика частина виробленого водню є побічним продуктом переробки нафти і використовується на місці виробництва в технологічній ланцюжку. Наприклад, в ЄС в 2006 р 42% водню вироблялося з нафтопродуктів і 47% споживалося на нафтопереробку. Другим основним джерелом водню є природний газ (метан), а сферою споживання – виробництво аміаку. Енергетичне споживання водню в даний час мало.

Традиційно водень зберігається в стислому вигляді, в даний час розроблені і комерціалізовані системи зберігання з тиском понад 70 МПа. Низький тиск одержуваного водню призводить до необхідності використання компресора, що призводить до зростання енерговитрат на виробництво кінцевого продукту. В даний час водень стискається переважно за допомогою поршневих компресорів, що мають низьку ефективність. Наприклад, адіабатний ККД компресора для водневої заправної станції продуктивністю 1000 кг/сут становить 56% і ККД мотора 92%. В результаті майже 11.3% енергії водню на заправці витрачається на його компресію.

Створення паливних елементів високої потужності наштовхується на безліч перешкод, пов'язаних з труднощами масштабування технології. Існує фундаментальне обмеження на зростання потужності ТЕ, викликане тим, що перенесення енергії через електроліт пов'язано з процесами дифузії. Таким чином, зростання потужності призводить до різкого збільшення площі поверхні електродів і мембран, що катастрофічно збільшує матеріалоемність, складність і знижує надійність енергоустановок. Таких обмежень не виникає при використанні

водню в паросиловому циклі. Отримання пара в воднево-кисневих парогенераторах не тільки підвищувати компактність і маневреність енергоустановок, а й сприяє зростанню ККД за рахунок використання високотемпературної пари, в той час як ККД паливних елементів із зростанням температури падає.

Акумулявання електричної енергії. Електроенергія може акумулюватися:

- в конденсаторах (у вигляді енергії електричного поля);
- в котушках індуктивності (у вигляді енергії магнітного поля);
- в первинних і вторинних гальванічних елементах (у вигляді хімічної енергії).

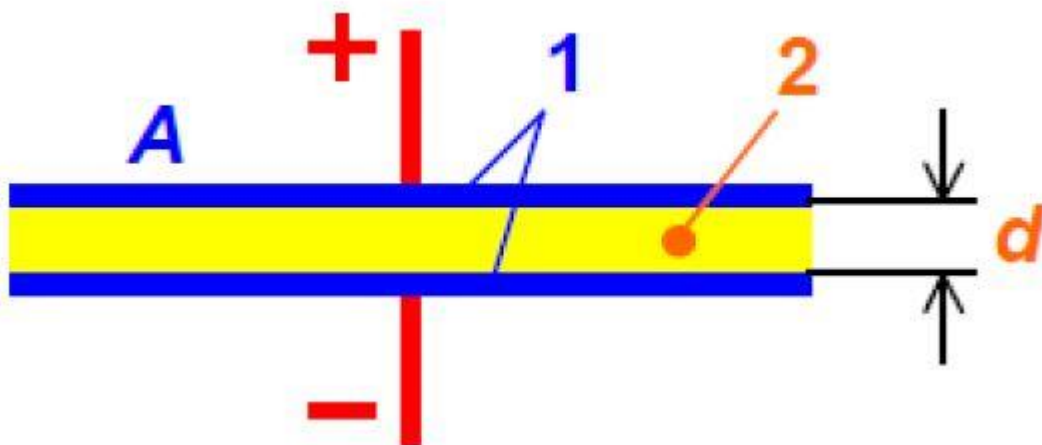


Рис. 1.12. Принцип пристрою плоского конденсатора:
1 обкладки, 2 діелектрик

Ємність такого конденсатора визначається за формулою:

$$C = \varepsilon \cdot (A/d),$$

де C – ємність конденсатора, Ф; A – площа обкладки, m^2 ; d – товщина діелектрика, м; ε – діелектрична проникність, Ф/м.

Енергія, запасена в конденсаторі, визначається формулою:

$$W = (C \cdot U^2) / 2,$$

де W – запасена енергія, Дж; C – ємність конденсатора, Ф; U – напруга, прикладена до конденсатора, В.

Якщо використовувати обкладки з фольги і багатошаровий плівковий діелектрик, то можна виготовити конденсатори рулонного типу, у яких питома акумулююча здатність знаходиться приблизно в межах від 0,1 Дж/кг до 1 Дж/кг або від 0,03 мВт·год/кг до 0,3 мВт·год/кг. Через малу питому акумулюючу здатність конденсатори такого виду не підходять для тривалого збереження істотної кількості енергії, але вони широко застосовуються як джерела реактивної потужності в ланцюгах змінного струму і як ємнісні опори.

Значно ефективніше енергія може акумулюватися в електролітичних конденсаторах.

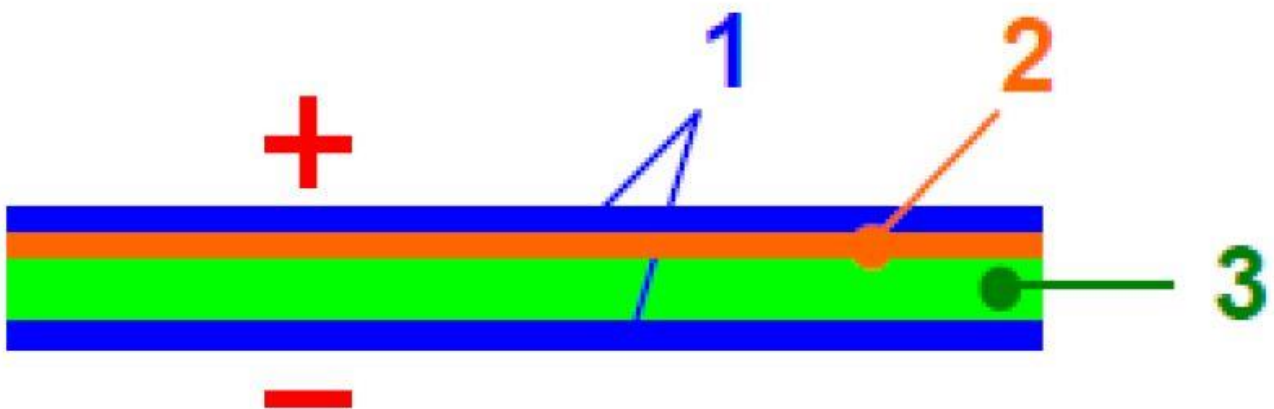


Рис. 1.13. Принцип пристрою електролітичного конденсатора. 1 металевий лист або фольга (алюміній, тантал або ін.), діелектрик з окису металу (Al_2O_3 , Ta_2O_5 або ін.), 3 папір і т.п., просочена електролітом і гліцерином

Так як товщина шару діелектрика в цьому випадку зазвичай залишається в межах 0,1 мкм, то ці конденсатори можуть виготовлятися з дуже великою ємністю (до 1 Ф), але на відносно малу напругу (зазвичай на декілька вольт).

Ще більшу ємність можуть мати ультраконденсатори (супер-конденсатори, іоністори), обкладинками яких служить подвійний електричний шар товщиною в декілька десятків часток нанометра на кордоні розділу електрода, виготовленого з мікропористого графіту, і електроліту. Ефективна площа обкладок таких

конденсаторів досягає, завдяки пористості, до 10000 м² на кожен грам маси електродів, що дозволяє досягати дуже великої місткості при дуже малих розмірах конденсатора. На даний час ультраконденсатори випускаються на напругу до 2,7 В і ємністю до 3 кФ. Їх питома акумулююча здатність знаходиться зазвичай в межах від 0,5 Вт·год/кг до 50 Вт·год/кг і є дослідні зразки з питоною акумулюючою здатністю до 300 Вт·год/кг.

Технологія виготовлення ультраконденсаторів вельми складна, і вартість за одиницю зберігаємої в них енергії тому набагато вище, ніж у інших конденсаторів, доходючи до 50000 €/кВт·год. Незважаючи на це, завдяки простоті конструкції, малим розмірам, надійності, високому ККД (95% і більше) і довговічності (кілька мільйонів циклів заряду-розряду), вони стали застосовуватися як в транспортних засобах, так і в промислових силових установках замість електрохімічних акумуляторів і інших засобів акумулювання енергії. Особливо вигідні вони тоді, коли енергія споживається у вигляді коротких імпульсів (наприклад, для живлення стартера двигунів внутрішнього згорання) або коли потрібна швидка (секундна) зарядка акумулюючого пристрою.

У котушці індуктивності енергія акумулюється у вигляді магнітного поля, коли через котушку протікає постійний струм. При підключенні до котушки ланцюгів споживання електроенергії і одночасному зниженні або припиненні струму збудження магнітного поля в цих ланцюгах виникає струм і виділяється енергія.

Енергія, акумульована в котушці індуктивності, виражається відомою формулою:

$$W=(L \cdot I^2)/2,$$

де W – акумульована енергія Дж, L – індуктивність котушки Гн, I – струм, що протікає в котушці А.

Питома акумулююча здатність котушок індуктивності зазвичай дуже мала – (0,1 ... 1) Дж/кг, або (0,03 ... 0,3) мВт/кг. Тільки в разі застосування надпровідних

обмоток котушки індуктивності можна акумулювати енергію, достатню для використання, наприклад, в енергосистемах, схильних к швидким коливанням електричного навантаження.

Принцип дії первинних гальванічних елементів заснований на використанні електрорушійної сили (ЕРС), що виникає між електродами із різних речовин, що вступають в електрохімічну реакцію з електролітом, та знаходяться між ними. Отримана при цьому електрична енергія визначається кількістю реагентів (використовуваної масою електродів і електроліту), і характеризується:

- початкової ЕРС, що знаходиться зазвичай, в залежності від типу елемента, в межах від 1 В до 3 В;

- зарядом, що віддається в електричний ланцюг при заданому способі розряду (наприклад, при деякому постійному струмі навантаження або при постійному опорі навантаження ланцюга); ця величина називається ємністю і виражається зазвичай в ампер-годинах (А·год).

Отримана при розряді енергія, яку можна вважати рівною акумулюючої здатності елемента, може визначатися формулою:

$$W = \int \cdot u i dt,$$

де u – напруга на затискачах елемента В, i – струм навантаження А, t – час год, W – отримана енергія Вт.

Більш ефективними, ніж вугільно-цинкові, є лужні марганцево-цинкові первинні елементи, в якості електроліту в яких зазвичай застосовується гідроокис калію (КОН). Зовні такий елемент схожий на вугільно-цинковий, але його оболонка виконана з металу і з'єднана з позитивним полюсом; крім того, замість графітового стержня застосовується латунний. Початкова ЕРС також дорівнює 1,5 В, але питома енергоемність набагато більше – найчастіше від 120 до 130 Вт·год/кг.

Ще більш ефективно енергія може акумулюватися в літієвих первинних елементах, початкова ЕРС яких дорівнює 3 В, а питома здатність яка

акумуляється знаходиться, в залежності від конкретного типу, в межах від 250 до 600 Вт·год/кг. У цих елементах знаходиться застосування близько 10 різних катодних матеріалів, і вони можуть виконуватися як циліндричними, як і дисковими. Мініатюрні дискові елементи знаходяться застосування, зокрема, в наручних годинниках, в кишенькових калькуляторах, в відключаються ланцюгах відеокамер і в іншій мікроелектронній апаратурі.

Вторинний гальванічний елемент або акумулятор після розряду може повторно заряджатися від декількох десятків до декількох тисяч разів, в залежності від конкретного типу. Найбільш поширеним є свинцевий (кислотний) акумулятор.

Існує багато інших видів акумуляторів (всього близько 100). Наприклад, в системах електропостачання літаків, де маса обладнання повинна бути якомога менше, знаходяться застосування срібно-цинкові акумулятори з питомою акумуляуючою здатністю, в середньому, 100 Вт·год/кг. Найвищу ЕРС (6,1 В) і найбільшу питомою акумуляуючі здатність (6270 Вт·год/кг) мають фторо-літєві акумулятори, серійного виробництва яких, однак, ще немає.

Первинні гальванічні елементи добре підходять для роботи в тривалому режимі, а акумулятори можуть використовувати як для тривалої роботи, так і для покриття короткочасних і штовхових навантажень. Конденсатори і котушки індуктивності Використовують, головним чином, для покриття імпульсних і навантажень і для вирівнювання потужності при швидких змінах навантажень. Для вирівнювання потужності, що віддається в енергосистему вітряними і сонячними електростанціями, можуть застосовуватися комбінації акумуляторів з ультраконденсаторами.

Раздел 2

2.1 Вибір способу і засобів акумулювання енергії, що виробляється електростанцією на поновлюваних джерелах енергії

Як відомо, в даний час, з огляду на небувале зростання потужності вітроенергетичних установок (ВЕУ), сонячних станцій (СЕС) та інших джерел альтернативної енергії, в Україні, різко зріс попит на акумулюючі пристрої, необхідні для компенсації нерівномірного виробництва і споживання електроенергії. Незважаючи на домінуюче становище гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС), не можна скидати з рахунків і інші пристрої (електрохімічні батареї, виробництво водню і синтетичного метану, а також пневмоакумулюючих пристроїв).

Для порівняння розглянемо параметри деяких систем акумулювання енергії.

В сталевий резервуар ємністю 1 м^3 закачується повітря під тиском 50 атмосфер (5 МПа). Щоб витримати такий тиск, стінки резервуара повинні мати товщину 5 мм і більше. Стисле повітря використовується для виконання роботи. Для спрощення розрахунку, приймемо припущення, що повітря є ідеальним газом. При ізотермічному процесі робота A , що здійснюються ідеальним газом при розширенні в атмосферу, визначається формулою:

$$A = (M / m) \cdot R \cdot T \cdot \ln (V_2 / V_1)$$

де M – маса газу, m – молярна маса газу, R – універсальна газова постійна, T – абсолютна температура, V_1 – початковий обсяг газу, V_2 – кінцевий обсяг газу.

З урахуванням рівняння стану для ідеального газу:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

для даної реалізації накопичувача:

$$V_2 / V_1 = 50; R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{град}); T = 293 \text{ }^\circ\text{K};$$

$$M / m = 50 / 0,0224 = 2232$$

робота газу при розширенні:

$$A = (M / m) \cdot R \cdot T \cdot \ln (V_2 / V_1) = 2232 \cdot 8,31 \cdot 293 \cdot \ln 50 = 20 \text{ МДж}$$

чи інакше 5,56 кВт · год за цикл. При масі накопичувача приблизно 250 кг. Питома енергія складе 80 кДж / кг. При роботі пневматичний накопичувач може протягом години забезпечувати навантаження не більше 5,5 кВт. Термін служби пневматичного накопичувача може становити 20 і більше років.

Переваги: накопичувальний резервуар може бути розташований під землею, в якості резервуара можуть використовуватися стандартні газові балони в необхідній кількості з відповідним обладнанням, при використанні вітродвигуна останній може безпосередньо пускати в хід насос компресора, є досить велика кількість пристроїв, що безпосередньо використовують енергію стислого повітря.

Зведемо в таблицю параметри акумулюючих систем на базі свинцево-кислотних акумуляторів, стислого повітря і водню.

Таблиця 2.1. Параметри розглянутих накопичувачів енергії.

Накопичувач енергії	Характеристики можливої реалізації накопичувача	Запасена енергія, кВт * год	Питома енергетична ємність, Вт · год / кг	Максимальний час роботи на навантаження 100 Вт, хвилин	Об'ємна питома енергоємність, Вт · год / дм ³	Термін служби, років
Свинцево-кислотний акумулятор	Ємність 190 А · год, вихідна напруга 12 В, маса 70 кг	1,083	15,47	650	60-75	3 ... 5
Стисле повітря	Сталевий резервуар об'ємом 1 м ³ масою 250 кг зі стислим повітрям під	0,556	22,2	3330	0,556	більше 20
Водень	Об'єм 50 л., Щільність 0,09 кг / м ³ , ступінь стиснення 10: 1 (маса 0,045 кг)	1,5	33580	906,66	671600	більше 20

Виходячи з результатів представлених в таблиці 2.1 можна зробити висновок, що найбільш ефективним є застосування стислого повітря і водню. Розглянемо більш докладно системи акумулювання засновані на стислому повітрі і водні.

Досвід будівництва пневмоакумулюючих електростанцій вже є. Перша електростанція такого роду була побудована в Німеччині в 1978 році біля міста Гунторф компанією E.ON. Вона видавала потужність 290 МВт протягом двох годин. Друга була побудована в Америці в 1991 році і є комбінованою газотурбінною і пневмоакумулюючою. Потужність її становить 110 МВт протягом 26 годин. Особливого розвитку цей напрямок енергетики не отримало через низький ККД, у станції в Гунторфе він становить 42%. Але з початком нового тисячоліття, в зв'язку з вибуховим зростанням потужності вітроенергетичних установок та сонячних станцій, а також інших альтернативних джерел енергії, попит на енергоакумулюючі пристрої різко зріс. Отже, виникло питання про підвищення ефективності таких установок.

Втрати енергії в пневмоакумулюючому пристрої відбуваються головним чином при стисненні (нагрівання) і розширенні (охолодження) технологічного повітря. Для збільшення ефективності подібних установок необхідно, щоб процес відбувався без втрат тепла, тобто був адіабатичним. Питання полягає в тому, як зберегти і стисле повітря і величезну кількість тепла. Над цим і працюють вчені з різних науково-дослідних центрів.

Професор Шеймус Гарві (Seamus Garvey) з Ноттінгемського університету пропонує встановити на глибині 600 м під водою гігантські балони, в яких можна буде накопичувати стисле повітря під тиском в 60 атмосфер при температурі 630 градусів за Цельсієм.

Вже на початку 2010 року запущена програма ADELE (Адіабатичне акумулювання електроенергії для електропостачання). Співучасниками програми є RWE Power, DLR і General Electric. Вони хочуть до 2020 року побудувати ПАЕС потужністю 90 МВт біля Страсбурга. «Для цього, - каже Штефан Цунфт (Stefan Zunft) з інституту термодинаміки DLR, - переваги розробленого методу наступні:

Тепло повітря, що стискається по знову розробленої технології зберігається при високій температурі, при стисненні воно накопичується у високій концентрації, а при розширенні витрачається на нагрів расширяемого повітря. Така технологія підвищує ККД до 70%. »

Принцип такої системи простий: під час надлишку потужності включаються компресори, нагнітають в підземні порожнини повітря, створюючи там певний тиск, при нестачі потужності стиснене повітря крутить турбіну, турбіна генератор, який і повертає в мережу запасені енергію. Але існує проблема. При стисненні повітря нагрівається, тепло розсіюється, але потім при розширенні відбувається сильне охолодження і виникає потреба в підігріві. На рисунку 2.1 ми бачимо рекуператор, який частково вирішує цю проблему. Зрозуміло, це не єдина проблема: потрібно знайти підземну порожнину, потрібно щоб вона була герметичною, та й потрібного обсягу, так на пристойній відстані від мережі і т.д. і т.п. І це не враховуючи чисто технічних проблем.

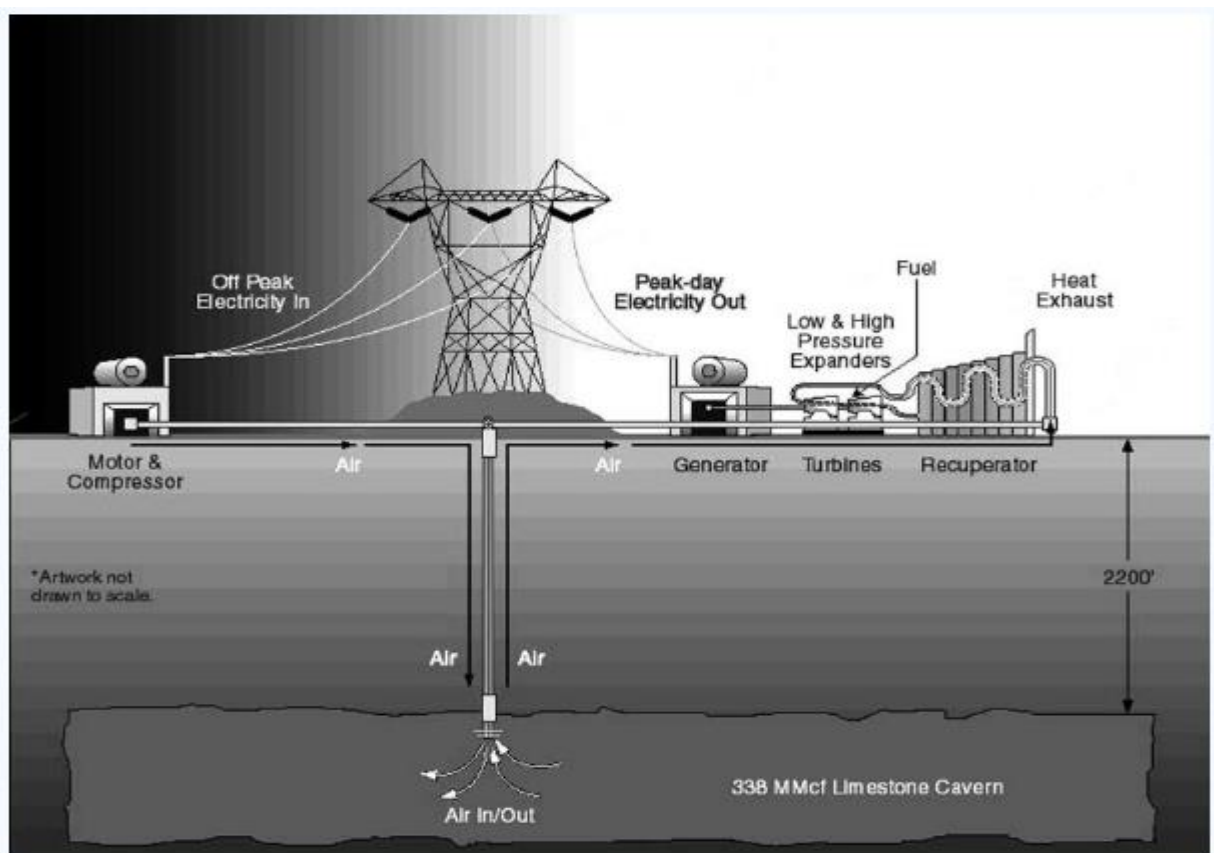


Рис. 2.1 Схема промислової пневматичної акумулюючої установки.

Далі розглянемо системи акумулювання енергії на основі водню. Один з найбільш перспективних шляхів розвитку водневої енергетики заснований на використанні водню, виробленого електролізом, як акумулятор енергії, при цьому все більшої популярності набуває технологія Power-to-Gas (P2G), а також заміни вуглеводневих моторних палив для більшості автомобілів. Також використання паливних елементів разом мікротурбінами і поновлюваними енергоресурсами буде сприяти зниженню вартості і кількості шкідливих викидів, при цьому паливні елементи мають більшу екологічну чистоту в порівнянні з мікротурбінами і поширення паливних елементів не робить негативного впливу на роботу мережі. Гібридні сонячно / вітро / водневі енергоустановки на паливних елементах можуть сприяти максимальній конвертації сонячної і вітрової енергії в електричну для віддалених районів.

Зазвичай водневе акумулювання енергії розглядається у вигляді ланцюжка, що зв'язує первинне джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку. Щодо застосування з ВДЕ цей ланцюжок зводиться як правило до отримання водню шляхом електролізу, зберігання водню в стислому або твердофазному пов'язаному вигляді і отримання електричної енергії з використанням електрохімічних генераторів (паливних елементів) або воднюпаливних установок (включаючи двигуни внутрішнього згорання). Подібна система розглядається в якості буфера між електричною мережею і ВДЕ і призначена не тільки для довготривалого зберігання енергії, а й для згладжування суттєвих пульсацій, пов'язаних зі змінним характером ВДЕ.

Водень можна зберігати або в чистому вигляді, або у вигляді хімічних сполук з високим вмістом водню, з яких, при необхідності, він може бути легко отриманий безпосередньо на борту транспортного засобу в одному з наступних процесів:

Зміна параметрів або агрегатного стану водню:

- стиснення газу або комбінований процес стиснення і охолодження;

- зрідження водню. Водень, що володіє низькою критичною температурою, необхідно охолоджувати до температури нижче 20 К, щоб зберігати його в рідкому стані в посудинах без надлишкового тиску.

Сполука водню з іншими речовинами:

- адсорбція газоподібного водню деяким відповідним адсорбентом, наприклад, активованим вугіллям;

- освіту сполук з високим вмістом водню. Такими сполуками можуть бути:

- з'єднання з сильною водневою зв'язком, що вимагають реалізації щодо складних хімічних процесів для отримання водню. До таких сполук можна віднести, наприклад, метанол, етанол, аміак, а також воду, яку можна розглядати як «носій» водню;

- з'єднання, які можуть бути оборотно перетворені в інші речовини з більш високим (або низьким) вмістом водню;

- гідриди металів, тобто з'єднання «метал» - «водень», що володіють властивістю можна зупинити абсорбувати і десорбувати водень при зміні температури.

Характеристики первинних джерел енергії та графіків споживання істотно впливають на основні технічні та економічні характеристики як окремих агрегатів, так і системи акумулювання. Серед інших технологій зберігання енергії водневе акумулювання відрізняється відносно низьким ККД (40 ... 60%), однак цей недолік компенсується достоїнствами водневих систем, серед яких виділяються можливість тривалого зберігання енергії без втрат, що недосяжно для хімічних джерел струму, висока щільність зберігання енергії і малі капітальні витрати в порівнянні з ГАЕС і ПАЕС.

Для виробництва енергії в сучасній розподіленій енергетиці і системах акумулювання пропонується використовувати водневі паливні елементи - хімічні джерела струму (ХДС), здатні перетворювати хімічну енергію в електричну енергію при електрохімічних процесах з постійно надходять активних речовин: водню і окислювача. На відміну від гальванічних елементів ТЕ можуть працювати до тих пір, поки здійснюється підведення реагентів (палива і окислювача) і відведення продуктів реакції.

2.2. Параметри водневих-повітряних газотурбінних системи акумулювання енергії

Потреба у створенні ефективних акумулюючих систем зростає з кожним роком. У централізованій енергетиці з встановленою потужністю в десятки гігават це пов'язано з необхідністю згладжування нерівномірності добових, тижневих і сезонних графіків енергоспоживання. В автономній енергетиці, по мірі розвитку і збільшення частки енергоустановок на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), проблема з акумулюванням електроенергії стоїть найгостріше. При цьому до 2013 р сумарна потужність діючих енергоустановок на ВДЕ досягла 500 ГВт - в півтора рази більше потужності всіх атомних електростанцій у світі

Для вирішення проблем нерівномірності виробництва і споживання енергії в централізованій енергетиці, а також для забезпечення гарантованого енергопостачання в автономній, необхідна установка систем акумулювання енергії. Найбільшого поширення в даний час отримали гідроакумулюючі (ГАЕС) і повітряно-акумулюючі газотурбінні електростанції (ВАГТЕ). Для автономної енергетики найбільше поширення мають електрохімічні акумулятори, що пов'язано в першу чергу з їх надійністю, високим коефіцієнтом рекуперації і безпекою. Однак, в даних системах є і суттєві недоліки серед яких найбільше значення мають висока вартість і низький ресурс, обмежений кількома тисячами циклів заряду-розряду. Це гарантує їх роботу, в разі використання на енергоустановках ВДЕ, на протязі 3 ... 5 років, а далі потрібно їх повна заміна. Таким чином, застосування більш дешевого і ефективного акумулятора, що володіє високим ресурсом (більше 20 років), є актуальним завданням.

За основу даної далі схеми взяті повітряно-акумулюючі газотурбінні електростанції, які володіють відносно хорошими експлуатаційними характеристиками: високим коефіцієнтом рекуперації (65 ... 80%), який можна порівняти з ГАЕС, і низькою вартістю кіловата встановленої потужності (400 ... 800 \$ / кВт)

Принцип роботи ВАГТЕ полягає в закачуванні стислого повітря в спеціальні резервуари за рахунок використання електроенергії, виробленої в години «провального» енергоспоживання. У години «пікового» енергоспоживання стисне повітря, що підігрівається спалюванням природного газу, використовується для приводу газотурбінної енергоустановки, що виробляє додаткову електроенергію. До теперішнього часу в світі побудовано 2 електростанції такого типу, перша ВАГТЕ Хунторф експлуатується з листопада 1978 року на ТЕС в Німеччині, друга ВАГТЕ Макінтош з середини 1991 р США. Вартість ВАГТЕ Макінтош склала 65 млн. дол., а питома вартість - 590 дол. / КВт. В даний час питома вартість аналогічних електростанцій оцінюється в 800 ... 850 дол. / КВт. Основними недоліками подібних установок є потреба у великих обсягах сховищ і наявність шкідливих викидів в атмосферу через спалювання природного газу.

Існують варіанти без споживання палива, т.зв. адіабатичні (безпаливної) ВАГТЕ. В цьому випадку, для підігріву повітря використовується тільки теплота, акумульована після його стиснення в компресорах. Такі установки не створюють шкідливих викидів в атмосферу при роботі, однак, для них характерний менший діапазон регулювання потужності, велика питома вартість і наявність втрат в акумуляторах тепла, що залежать від часу зберігання. При цьому залишається проблема, пов'язана з необхідністю наявності великих ємностей зберігання. Розрахунковий коефіцієнт рекуперації для такої установки потужністю 115 МВт і тиском повітря в сховищі до 17 МПа складає до 72,7%.

У даній роботі пропонується комбінована схема повітряно-акумулюючої газотурбінної системи, в якій для підігріву повітря перед турбіною використовується теплота спалювання водню в кисні, отриманих шляхом електролізу. Водень як акумулятор енергії має низку переваг у порівнянні з іншими системами акумулювання: висока щільність енергії, що запасється (до 38 кВт · год / кг (т)), відсутність шкідливих викидів при роботі, широке поширення в природі. Продуктом спалювання водню в кисні є водяна пара високої температури, що дозволяє використовувати його для підігріву повітря зі сховища

шляхом змішування, виключаючи утворення шкідливих речовин, на відміну, наприклад, від спалювання водню безпосередньо в повітрі.

Використання водню дозволяє вирішити основну проблему, пов'язану з великими обсягами сховищ і використанням додаткового палива для підігріву, шляхом створення комбінованої воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання (ВПГТСА).

Принцип роботи ВПГТСА, спрощена схема якої представлена на рисунку 2.2, полягає в наступному. Під час «провального» енергоспоживання,

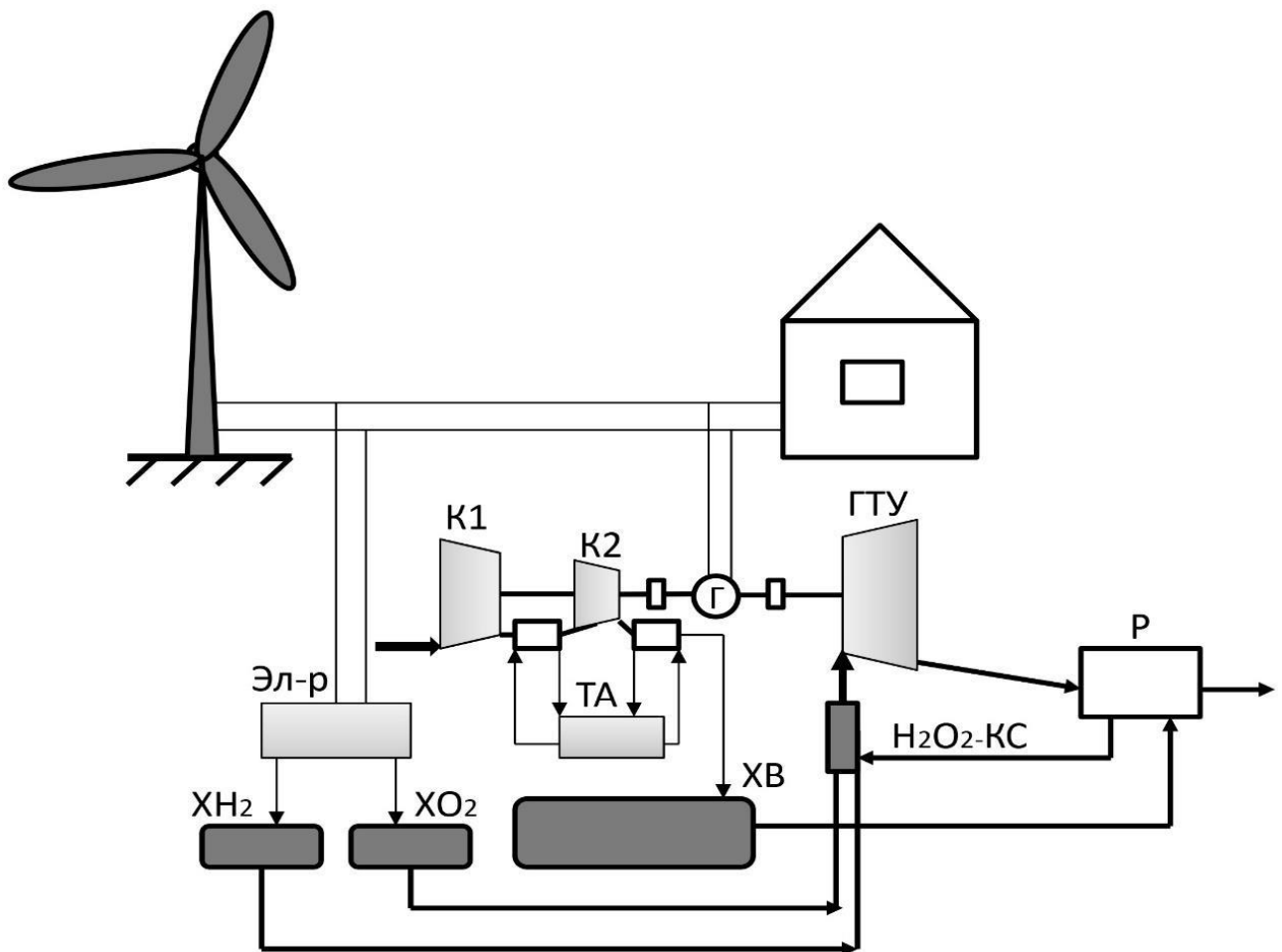


Рис. 2.2 Спрощена схема ВПГТСА: К1, К2 – компресорна група, ХН₂ – сховище водню, ХО₂ – сховище кисню, ХВ – сховище повітря, ТА – тепловий акумулятор, Г – генератор, ГТУ – газотурбінна установка, Р – рекуператор, Н₂О₂-КС – воднево киснева камера згоряння.

акумулювання відбувається за двома напрямками. Перший – отриманням водню і кисню методом електролізу води і подальшим закачуванням їх в сховища. У разі використання електролізера високого тиску дотискній компресор для водню і кисню може або не знадобитися, або знадобиться компресор з невеликим ступенем підвищення тиску. Другий – шляхом стиснення повітря компресорами, які приводилися в дію мотор-генератором. Компресорна група може складатися з декількох (як показано на рисунку 2.2) компресорів середнього і високого тиску або одного осьового компресора з проміжними відводами тепла. Відведено при стисненні повітря тепло може бути направлено в тепловий акумулятор або використовуватися безпосередньо – для опалювальних потреб і т.д. Охолоджене повітря після компресорів надходить в сховище.

У режимі вироблення електроенергії повітря зі сховища спочатку надходить в регенератор, де відбувається його підігрів вихлопними газами ГТУ до температури 200 ... 350 °С. Далі повітря надходить в H_2O_2 -камеру згоряння, де відбувається його нагрівання до 850 ... 950 °С за рахунок теплоти згорання водню в кисні. У H_2O_2 -камері згоряння здійснюється попереднє спалювання водню у кисні з подальшим змішуванням одержаної високотемпературної водяної пари з повітрям, внаслідок чого відбувається його нагрівання до необхідної температури. Такий спосіб виключає утворення будь-яких шкідливих викидів при роботі, зокрема NO_x .

Слід зазначити, що практично всі основні елементи системи в даний час відомі і не потребують суттєвих витрат на проведення НДР, новим елементом в даному випадку є H_2O_2 – камера згоряння. Складність її виготовлення полягати в тому, що для підвищення ефективності її роботи необхідно забезпечити якомога більш повне згоряння водню в кисні при стехіометричному співвідношенні компонентів і плавний підігрів повітря, для запобігання утворення окислів азоту. При цьому, температура нагрітого повітря повинна бути менше 1200 °С, для чого необхідно забезпечити попереднє зниження температури генерується пара до 1500 ... 1800 °С за рахунок відведення теплоти від камери згоряння, і далі проводити його поступове змішання з основним витратою повітря.

Неоднорідність температур в нагрітому таким чином повітрі не повинна перевищувати 40 градусів, щоб виключити виникнення сильних термічних напружень в лопатках ГТУ. Прототипи таких камер згоряння мегаватного і кіловатного рівнів потужності, що охолоджуються водою, тепловою потужністю від 50 кВт до 25 МВт розроблені в ОИВТ РАН спільно з ВАТ КБХА, але вимагають доопрацювання відповідно до вищенаведених вимог.

2.3. Розрахунок основних параметрів воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання

Основними параметрами будь-якої акумулюючої системи є її вартість, питома ємність, коефіцієнт рекуперації і ресурс. З огляду на, що одним з основних мінусів повітряно-акумулюючих газотурбінних систем є великий обсяг сховищ повітря, почнемо з визначення цього важливого параметра. Для визначення необхідної маси повітря в сховище скористаємося технічними характеристиками сучасних газотурбінних установок. Наприклад, в газовій турбіні компанії Siemens STG-100 потужністю 4,7 МВт питома витрата повітря при ступені стиснення компресора 14,1:1 становить близько 4 кг/с на 1 мегават номінальної електричної потужності. При підвищенні ступеня стиснення і збільшенні одиничної потужності ГТУ компресора питома витрата повітря знижується. У газовій турбіні GT24 компанії ALSTOM потужністю 193,3 МВт і ступенем підвищення тиску 33,8:1 він становить близько 2,34 кг/с на 1 МВт номінальної електричної потужності. Зауважимо, що близько 50% потужності, що виробляється газовою турбіною, споживається компресором, для стиснення повітря. З огляду на це повітря подається вже з необхідним тиском, питома витрата повітря складе 2 і 1,17 кг / с на 1 МВт для вищевказаних турбін. Ці дані також підтверджуються досвідом експлуатації газових турбін, встановлених у Хунторфі і Макінтоші, для яких питома витрата повітря становить 1,44 і 1,41 кг/с на 1 МВт номінальної електричної потужності при тиску на вході в турбіну 43 і 42 атм відповідно. Слід зазначити, що дані акумулюючі станції були побудовані більше 20 років тому і

можливо цим пояснюються більш високі показники питомої витрати повітря в порівнянні з турбіною ALSTOM. Проте, для розрахунку приймемо значення 1,4 кг/с на 1 МВт. Таким чином, масу повітря, необхідну для акумулюючої системи ємністю $E_{\text{акк}}$ [кВт·год] можна визначити наступним чином:

$$M_{\text{пов}} = g_{\text{пов}} \cdot E_{\text{акк}}$$

де $g_{\text{пов}}$ – питома витрата повітря [кг/(с·Вт)].

Визначивши масу повітря розрахуємо маси водню і кисню, необхідну для його нагрівання від температури T_1 [К] до температури T_2 на вході в газову турбіну:

$$M_{\text{H}_2} = (c_p \cdot M_{\text{пов}} \cdot (T_2 - T_1)) / q_{\text{H}_2}$$

$$M_{\text{O}_2} = M_{\text{H}_2} \cdot 7,96$$

де c_p – питома ізобарна теплоємність повітря, $q_{\text{H}_2} = 120 \cdot 10^6$ – нижча теплота згоряння водню [Дж/кг], 7,96 – стехіометричний коефіцієнт, що визначає кількість отриманого кисню при розкладанні води.

Обсяг сховищ, з урахуванням того, що мінімальний тиск в них P_{min} [Па] буде визначатися мінімальним тиском на вході в газову турбіну, а максимальне P_{max} параметрами сховища і компресорів, визначимо наступним чином:

$$V_{\text{xp}} = M_{\text{H}_2} / (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}})$$

де ρ_{max} і ρ_{min} – щільність газу [кг/м³] при тисках P_{max} і P_{min} відповідно.

Відзначимо, що при стисненні повітря в компресорі відбувається його нагрівання до 250 ... 470 °С, а перед подачею в сховище його необхідно охолодити до 30 ... 50 ° С для зменшення питомого обсягу. Відведене тепло, може бути використано різними способами. По-перше, для опалення, підігріву води або

технологічних потреб. По-друге воно може бути заготовлено в тепловому акумуляторі і згодом використано для підігріву повітря перед турбіною, що підвищить коефіцієнт рекуперації. По-третє це тепло може бути скинуто в атмосферу, що дозволить знизити вартість акумуляуючої системи. Вибір того чи іншого варіанту залежить від споживача і вимагає оптимізації. Витрати на стиск і втрати теплоти для водню і кисню будуть істотно нижче, з урахуванням їх меншого обсягу, а також наявністю надлишкового тиску після електролізера (більше 40 атм.), що потребують меншому ступені підвищення тиску в компресорі.

Вибір типу сховищ також вимагає проведення оптимізаційних розрахунків. Можливі 2 основні варіанти зберігання стислого повітря: при низькому (до 18 атм.) або при високому тиску (понад 80 атм.). У першому випадку не виникає проблем з безпекою, а ціна таких сховищ може бути дуже низькою, але потрібно істотне збільшення необхідного обсягу сховищ, і установка додаткового компресора перед турбіною. Наприклад, можна закачати повітря в сховище під тиском 8 атм., а при його подачі в турбіну підвищувати тиск до 18 ... 40 атм. в компресорі, але в цьому випадку збільшиться витрата водню і кисню. У другому випадку обсяг сховища знижується, але зростає його вартість, з'являються витрати на установку компресора високого тиску і проблеми, пов'язані з забезпеченням безпеки при роботі з високим тиском. При цьому вплив тиску акумуляування на ККД найбільш велике при значеннях до 12,4 МПа, тому в подальшому для розрахунку приймемо значення тиску в сховище рівне 12 МПа.

Розглянемо питання з визначенням коефіцієнта рекуперації ВПГТСА. Для цього необхідно враховувати, що в такій схемі використовується 2 різних типи зберігання енергії: фізичний – у стислому повітрі і хімічний – у водні та кисні, тому і оцінювати їх необхідно окремо. Почнемо з фізичного способу. ККД сучасних гвинтових компресорів досягає 80 ... 90% і більше, для поршневих цей показник становить 65 ... 80%. На перший погляд більш вигідним є використання гвинтових компресорів, проте їх вартість на 30 ... 50% вище, ніж у поршневих, при цьому поршневі компресори здатні забезпечувати більшу питому ступінь

стиснення. Втрати в компресорі перетворюються в теплову енергію, яка також може бути використана споживачем, проте, для визначення електричного ККД будемо керуватися значенням 70 ... 90%. Втрати на тертя в трубах, камері згоряння, дроселювання і т.д. можна оцінити в 3 ... 4%. ККД перетворення в сучасних газових турбінах становить 89 ... 92%.

Таким чином, сумарний коефіцієнт рекуперації для повітря складе 61 ... 79%. Далі визначимо коефіцієнт рекуперації для хімічного способу зберігання енергії. ККД сучасних електролізерів досягає 75 ... 80%, при тиску газів на виході більше 40 атм., що дозволяє знизити витрати на стиск. З урахуванням високої питомої щільності енергії водню, втрати на тертя, дроселювання і стиснення складуть менше 2%. ККД воднево-кисневої камери згоряння становить понад 98,5% при охолодженні водою, а з урахуванням використання в якості охолоджувача повітря, він буде близький до 100%, тому даними втратами можна знехтувати. ККД перетворення теплової енергії, отриманої при згорянні водню в кисні, в газовій турбіні складе 63 ... 72% (за умови, що енергію на роботу компресор не витрачає). Таким чином, коефіцієнт рекуперації для хімічного способу складе 48 ... 59%. З наведеного аналізу видно, що для підвищення загального коефіцієнта рекуперації всієї системи акумулювання необхідно збільшувати частку енергії, що запасється в стислому повітрі. Це досягається шляхом підвищення тиску на вході в газову турбіну, зниженням температури робочого тіла і використанням регенерації вихлопних газів.

Найбільш складним завданням є оцінка вартості ВПГТСА, що пов'язано з відсутністю аналогів подібних установок в світі. Однак слід врахувати, що основні вузли, що визначають більш 80% вартості всієї системи доступні на ринку і їх вартість відома. Вузлом з найбільш високою питомою вартістю є електролізер, його вартість може бути оцінена на рівні 700 ... 2000 \$/кВт. Вартість компресорів високого тиску можна оцінити в 400 ... 800 \$/кВт, в залежності від типу компресора. Вартість сховищ високого тиску становить 150 ... 190 \$/кВт·год для повітря і 12 ... 15 \$/кВт·год для водню і кисню. Вартість теплообмінного обладнання, трубопроводів і регенератора буде залежати від оптимізаційних

розрахунків, що визначають їх розміри і обґрунтовують необхідність їх установки, але сумарна їх частка у вартості всієї системи становить не більше 3 ... 5%. Вартість ГТУ оцінюється в 450 ... 1200 \$/кВт в залежності від потужності, однак, в даному випадку буде потрібно ГТУ без компресора, системи охолодження, камери згоряння і на більш низькі робочі температури, що може істотно знизити її вартість. Наприклад, вартість ПАГТЕ мегаватного рівня потужності, зі зберіганням повітря в підземних сховищах в даний час оцінюється в 700 ... 900 \$/кВт, з яких вартість газотурбінного устаткування, включаючи камеру згоряння, становить близько 55%. Таким чином, можна прийняти питому вартість газової турбіни 385 ... 495 \$/кВт.

У таблиці 2.2 представлені результати розрахунку у вигляді порівняння ВПАГТЕ з ПАГТУ Хунторф і Макінтош, для систем мегаватного рівня потужності і для кіловатного.

Таблиця 2.2. Параметри розглянутих накопичувачів енергії.

Технічні характеристики	ПАГТЕ Хунторф	ПАГТЕ Макінтош	ВПГТСА МВт	ВПГТСА кВт
Метод зберігання	Підземне сховище	Підземне сховище	Металеві ємності	Металеві ємності
Тиск в сховище: номінальний мінімальний	7 МПа	7,62 МПа	12 МПа	12 МПа
	2 МПа	4,5 МПа	1,5 МПа	1,5 МПа
Обсяг сховища	310 тис. м3	624 тис. м3	4436 м3	44,6 м3
Питома ємність сховищ	1,87 кВ · год/м3	3,2 кВ · год/м3	22,51 кВ · год/м3	16,14 кВ · год/м3
Потужність ГТУ	290 МВт	110 МВт	50 МВт	0,03 МВт
Тиск на вході в ТВД / ТНД	4,3 / 1,1 Мпа	4,1 / 1,1 Мпа	4 / 1,4 МПа	4 / 1,4 Мпа
Використання регенератора	ні	так	так	так
Підігрів повітря перед турбіною	природний газ	природний газ	водень	водень
Коефіцієнт рекуперації	46,1	83,2	67/84 *	64/81 *

* - з урахуванням використання тепла, отриманого при стисканні.

З таблиці 2.2 видно, що питома ємність сховищ для ВПАГТЕ мегаватного рівня потужності більш ніж в 12 і 7 разів вище ніж для ПАГТУ Хунторф і Макінотош відповідно. У першому випадку це пов'язано з більш низьким коефіцієнтом рекуперації. Слід зазначити, що для підземних сховищ мінімальний і максимальний тиски повітря і швидкість його зміни обмежені особливостями підземного зберігання в результаті чого необхідний обсяг збільшується.

2.4. Висновки о параметрах воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання

ВПГТСА може знайти широке застосування як в централізованій, так і в автономній енергетиці в діапазоні потужностей від десятків кіловат до сотень мегават. Використання водню і зберігання повітря в металевих ємностях при тиску до 12 МПа дозволяє знизити необхідний обсяг сховищ більш ніж в 7 разів, в порівнянні з традиційними ПАГТЕ. Разом з тим для мегаватного рівня потужності необхідний обсяг сховищ залишається все ще відносно великим і для підвищення конкурентоспроможності більш оптимальним буде зберігання повітря в підземних резервуарах. Установки кіловатного рівня потужності вимагають відносно невеликих обсягів сховищ, мають високу маневреність, є екологічно чистими і не залежать від рельєфу місцевості, що дозволяє їм знайти широке застосування особливо на енергоустановках на основі ВДЕ. Запропонована схема ВПГТСА є більш ефективною і має меншу питому вартість в порівнянні з безпаливної ПАГТЕ, разом з тим в даному випадку відбувається її ускладнення, що вимагає розробки більш складної системи управління.

Розділ 3

3.1 Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень

Всі прийняті науково-технічні рішення повинні бути економічно обґрунтованими, мати чітку оцінку доцільності їхньої розробки, виробництва й експлуатації. У цьому зв'язку методи визначення витрат і ефективності виробництва, правильний економічний розрахунок окремих техніко-економічних показників у процесі планування, проектування й експлуатації повинні стати невід'ємною частиною кваліфікаційної роботи.

В роботі запропоновано впровадження воднево-повітряної газотурбінної системи акумуляування замість традиційних свинцево-кислотних акумуляторів. В цьому розділі проведений розрахунок капітальних і експлуатаційних витрат та виконано аналіз показників економічної ефективності від впровадження запропонованої воднево-повітряної газотурбінної системи акумуляування.

Виходячи зі запропонованої, керівником, електричної ємності акумуляуючих пристроїв – 750 кВт*г, треба вказати, що виходячи з табл. 2.1 кількість свинцево-кислотних акумуляторів становить – 693 шт., а параметри запропонованої системи представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри запропонованої системи

Параметр	Рівень потужності, кВт
1	2
Номінальна потужність енергоустановки	50
Максимальна потужність, споживана ВПГТСА в режимі акумуляування енергії	50
Максимальна потужність, що виробляється ВПГТСА в режимі вироблення енергії	30

1	2
Максимальна потужність, споживана електролізером	5
Максимальна потужність, споживана компресорами	45
Максимальна місткість акумулювання енергії, кВт·г	720

3.2. Розрахунок капітальних витрат

Капітальні вкладення - це кошти, призначені для створення і придбання основних фондів та нематеріальних активів, підлягають амортизації.

Капітальні вкладення, необхідні для впровадження пропонованої системи, є одним з найважливіших показників застосовуваних для економічної оцінки ефективності заходу впровадження.

Проектні капіталовкладення в обладнання та будівельно-монтажні роботи визначаються на основі договірних цін і розцінок за станом на 01.11.2018 р. постачальника. Вартість монтажно-налагоджувальних робіт приймається на рівні 8-10%, а транспортно-заготівельні і складські витрати 5-7% від вартості устаткування.

Проектні капіталовкладення в устаткування наведені в таблиці. 3.2.

Таблиця 3.2 - Розрахунок капітальних витрат по проектному варіанту

№	Найменування встаткування й виконуваних робіт	Обґрунтування	Кількість	Вартість, грн.	
				за одиницю	усього
1	Компресорна група	[1, 5]	1	172000	172000
2	Сховище водню	[1, 5]	1	28000	28000
3	Сховище кисню	[1, 5]	1	14000	14000
4	Сховище повітря	[1, 5]	1	14000	14000
5	Тепловий акумулятор	[1, 5]	1	80000	80000

6	Генератор	[1, 5]	1	100000	100000
7	Газотурбінна установка	[1, 5]	1	1000000	1000000
8	Рекуператор	[1, 5]	1	500000	500000
9	Воднево киснева камера згоряння	[1, 5]	1	1200000	1200000
10	Разом				3108000
11	Транспортування	грн.	-	-	155400
12	Монтаж	грн.	-	-	248640
13	УСЬОГО	грн.	-	-	3512040

Капітальні витрати становлять:

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн}$$

де: $K_{об}$ – вартість устаткування по зведенню витрат (без ПДВ), грн.;

$K_{тр}$ – транспортно-заготівельні й складські витрати, грн.;

$K_{мн}$ – витрати на монтаж і налагодження встаткування, грн.;

$$K = 3108000 + 155400 + 248640 = 3512040 \text{ грн}$$

3.3. Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати - це поточні витрати на експлуатацію й обслуговування об'єкта проектування за певний період, виражений у грошовій формі.

До основних статей експлуатаційних витрат по електротехнічному встаткуванню й енергомережам ставляться:

а) амортизаційні відрахування (C_a);

б) вартість спожитої електроенергії (C_e);

в) основна й додаткова заробітна плата обслуговуючого персоналу й відрахування на соціальні заходи (C_3);

г) витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт устаткування
(C_T)

д) інші витрати ($C_{ін}$).

У такий спосіб річні експлуатаційні витрати по об'єкті проектування становлять:

$$C = C_a + C_e + C_3 + C_T + C_{ін}$$

де: C_3 - заробітна плата з нарахуваннями персоналу, зайнятого обслуговуванням пристроїв, грн/рік;

C_T - витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт, грн/рік;

C_a - сума амортизаційних відрахувань, грн/рік;

C_e - вартість спожитої електроенергії, грн/рік;

$C_{ін}$ - інші витрати, грн/рік.

У зв'язку з тим, що на підприємстві не планується додатковий прийом фахівців для обслуговування системи освітлення заробітна плата з нарахуваннями персоналу, зайнятого обслуговуванням пристроїв приймається рівною нулю ($C_3=0$).

Річний фонд амортизаційних відрахувань визначається у відсотках від суми капітальних витрат по видах основних фондів:

Річний фонд амортизаційних відрахувань визначають за формулою:

$$C_a = K \cdot H_a = 3512040 \cdot 0,1 = 351204 \text{ грн}$$

де: H_a – норма амортизаційних відрахувань

$$H_a = \frac{\Phi_n - \Pi}{\Phi_n \cdot T_{min}} = (3108000 - 248640) / (3108000 \cdot 10) = 0,092$$

де: Φ_n - первісна (відновлювальна) вартість;

$T_{min}=10$ років - строк корисного використання основних фондів.

Річні витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт електротехнічного встаткування включає витрати на матеріали, запасні частини, і визначаються за фактичним даними підприємства або укрупнено у відсотках від капітальних витрат. Приймаємо в розмірі 0,01% від капітальних витрат, а саме:

$$C_T = 0,01 \cdot K_{об} = 0,01 \cdot 3512040 = 35120,4 \text{ грн}$$

Відповідно до практики, інші витрати визначаються в розмірі 4% від річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу. У зв'язку з тим, що фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу $C_3=0$ ця складова експлуатаційних витрат також дорівнює нулю.

Річна споживана електрична енергія, системою акумулювання з ВПГТСА:

$$W_{CДрік} = T_c \cdot P_{ВПГТСА} = 973 \cdot 50 = 48650 \text{ кВт г}$$

де: T_c – число світлових годин, за рік, у Дніпропетровському регіоні.
 $P_{ВПГТСА}$ – потужність ВПГТСА в режимі акумулювання енергії.

Вартість електроенергії спожитої об'єктом проектування протягом року визначається за формулою:

$$C_e = W_{CДрік} \cdot C_e = 48650 \cdot 2,3 = 111895 \text{ грн}$$

де: C_e – тариф на електроенергію для 2 класу споживачів, (1,92·1,2=2,3 грн./кВт·годин);

Річні експлуатаційні витрати по об'єкту проектування становлять:

$$C = C_a + C_e + C_3 + C_T + C_{ін} = 351204 + 111895 + 0 + 35120,4 + 0 = \\ = 498219,4 \text{ грн}$$

3.4 Визначення та аналіз показників економічної ефективності

Визначаємо розрахунковий коефіцієнт ефективності (доходу) капітальних витрат:

$$E_p = \frac{\mathcal{E}_{\text{повна}}}{K}$$

де: $\mathcal{E}_{\text{повна}}$ - річна економія від впровадження обраних заходів;

K - капітальні витрати, грн.

Річна споживана електрична енергія, системою акумулювання з свинцево-кислотними акумуляторами:

$$W_{\text{скрік}} = N_{\text{ск}} \cdot P_{\text{зар}} \cdot T_c = 693 \cdot 0,8 \cdot 973 = 539431,2 \text{ кВт}\cdot\text{г}$$

Визначимо річну економію за рахунок зниження споживання електроенергії автоматичною системою освітлення:

$$\mathcal{E}_{\text{рік}} = (W_{\text{скрік}} - W_{\text{сДрік}}) \cdot C_r = (539431,2 - 48650) \cdot 2,3 = 1128796,76 \text{ грн}$$

$$\mathcal{E}_{\text{повна}} = \mathcal{E}_{\text{рік}} - C = 1128796,76 - 498219,4 = 630577,36 \text{ грн}$$

$$E_p = \frac{\mathcal{E}_{\text{повна}}}{K} = \frac{630577,36}{3512040} = 0,18$$

Визначаємо термін окупності капітальних витрат

$$E_p = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{повна}}} = \frac{3512040}{630577,36} = 5,57 \text{ року}$$

Для остаточної оцінки порівнюються розрахункові значення E_p з нормативним E_n . Визначити нормативне значення коефіцієнта ефективності можна виходячи з прийнятною для підприємства індивідуальної норми прибутковості:

$$E_n = \frac{1}{T_{оч}} = \frac{1}{10} = 0,1$$

де: $T_{оч}$ - очікуваний прийнятний для підприємства термін окупності капітальних вкладень, $T_{оч} = 10$ років (сонячна електростанція).

$$E_p > E_n ; 0,18 > 0,1$$

Таблиця 3.2 - Зведена таблиця техніко-економічних показників.

№ п/п	Найменування показників	Одиниці виміру	Проектний варіант
1	Капітальні витрати	грн.	3512040
2	Експлуатаційні витрати	грн.	498219,4
3	Річна економія	грн.	1128796,76
	Повна річна економія	грн.	630577,36
4	Розрахунковий коефіцієнт ефективності	-	0,18
5	Розрахунковий термін окупності	років	5,57

3.5 Висновок.

Капітальні витрати на впровадження воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання окупаються за 5,57 року, що для сонячної електростанції є економічно доцільним.

ВИВОДИ

У дипломному проекті розглянуті особливості систем акумулювання енергії, проведено аналіз основних факторів, що впливають на параметри розглянутих накопичувачів енергії.

Виконано розрахунки параметрів акумулюючих систем на базі свинцево-кислотних акумуляторів, стислого повітря і водню. Проведено їх аналіз з точки зору енергоефективності. Визначено параметри воднево-повітряних газотурбінних систем акумулювання енергії з ВДЕ, та представлені результати розрахунку у вигляді порівняння ВПАГТЕ з ПАГТУ Хунторф і Макінотош, для систем мегаватного рівня потужності і для кіловатного.

На підставі проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Використання водню і зберігання повітря в металевих ємностях при тиску до 12 МПа дозволяє знизити необхідний обсяг сховищ більш ніж в 7 разів, в порівнянні з традиційними ПАГТЕ.

2. Запропонована схема ВПГТСА є більш ефективною і має меншу питому вартість в порівнянні з безпаливної ПАГТЕ.

3. Установки кіловатного рівня потужності вимагають відносно невеликих обсягів сховищ, мають високу маневреність, є екологічно чистими і не залежать від рельєфу місцевості, що дозволяє їм знайти широке застосування особливо на енергоустановках на основі ВДЕ.

Капітальні витрати на впровадження воднево-повітряної газотурбінної системи акумулювання окупаються за 5,57 року, що для сонячної електростанції є економічно доцільним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Безруких П. П. Состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Д. С. Стребков // Малая энергетика. М. : ОАО «НИИЭС», 2008. № 4–5.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. К.: 73 с.
3. Кудря С. А., Васько В. П., Кирпатенко И. Н., Яценко Л. В. Состояние развития ветроэнергетики и малой гидроэнергетики Украины // Техн. електродинаміка. Темат. вип. Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем. – 1999. - Ч. 1.– С. 32 – 33.
4. Кудря С. О., Яценко Л. В., Кирпатенко І. М., Васько В. П. Методи підвищення ефективності застосування обладнання на основі відновлюваних джерел енергії в комбінованих енергетичних системах // Винахідник і раціоналізатор. – 1999. - № 1-2. – С. 43.
5. Гребенюк А.М. Способи акумуляції енергії нетрадиційних джерел / А.М. Гребенюк // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. техн. збірник. Д.: ДВНЗ "НГУ". 2014. – № 93. – С. 131-136.
6. Ольховский Г.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. «Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ)». М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. – 360 с.
7. Мальшенко С.П., Пригожин В.И., Счастливец А.И., Игнатов А.С. «Исследование и оптимизация тепловых процессов в водородно-кислородных парогенераторах киловаттного класса мощности», Тепловые процессы в технике, 2014, №1, с. 12-19.
8. Правила устройства электроустановок. – Минэнерго СССР. – М: Энергоатомиздат. – 1985.

9. Ольховский Г.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. «Методы регулирования неравномерности электропотребления». М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 712 с.
10. Малышенко С.П., Пригожин В.И., Савич А.Р., Счастливец А.И., Ильичев В.А., Назарова О.В. Эффективность генерации пара в водородокислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 6. — С. 820.
11. Правила пользования электрической энергией. // НКРЭ. – 2002. – 64с
12. Синяк Ю.В., Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения, “Проблемы прогнозирования”, №3, 2007.
13. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту для студентів з напряму підготовки 0906 «Електротехніка» / Укладачі: І.В.Шереметьєва, Л.В.Тимошенко. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 32 с.
14. Стандарт вищого навчального закладу. Кваліфікаційні роботи випускників. Загальні вимоги до дипломних проектів і дипломних робіт / Упорядн.: В.О. Салов, О.М. Кузьменко, В.І. Прокопенко. – Дніпропетровськ.: Національна гірнича академія України, 2002. – 52 с.

ДОДАТОК А

Відомості матеріалів дипломного проекту

№ п/п	Формат	Позначення	Найменування	Кіл-ть аркушів	Примітка
	A4		Пояснювальна записка		
	A4		Графічні матеріали	13	