

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **СТИСНЕНЕ ПОВІТРЯ, ЯК АЛЬТЕРНАТИВНИЙ
ЕНЕРГОНОСІЙ ПРИ АКУМУЛЮВАННІ ЕНЕРГІЇ ВІД
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Марушка І.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2021

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Тарасенко М.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Марушці Івану Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Стиснене повітря, як альтернативний енергоносіє
при акумулюванні енергії від вітроенергетичної установки

Керівник роботи к.т.н., доц. Мовчан Л.Т.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» січня 2021 року № 4/7-47.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 14.06.2021

3. Вихідні дані до роботи вітроустановка знаходиться у м. Тернопіль. До неї під'єднані
Споживачі, електроенергії, механічної енергії та стисненого повітря

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Виробництво різних енергоносіїв на базі ВЕУ

2. Порівняння варіантів виробництва стисненого повітря за традиційною
схемою і з безпосереднім приводом

3. Вибір компресора для спільної роботи з вітроустановкою

4. Розрахунок ємності акумулятора стисненого повітря

5. Робота повітряного акумулятора в залежності від режимів споживання енергії

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Вітроенергетична система

2. Поршневий компресор

3. Сфери використання стисненого повітря

4. Порівняння систем подачі повітря від вітроустановки

5. Графік споживання стисненого повітря

6. Теплова схема повітряно-акумулюючої газотурбінної електростанції

7. Система подачі повітря різних споживачів з використанням вітрокомпресорної
установки

8. Залежність питомої ємності акумулятора від тиску компресора

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності та основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Вакуленко О.О., ст. викладач кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 22.01.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 22.01.2021 по 20.02.2021	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 21.02.2021 по 21.04.2021	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності та основи охорони праці»	з 21.05.2021 по 28.05.2021	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 29.05.2021 по 05.06.2021	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 06.06.2021 по 10.06.2021	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 11.06.2021 по 13.06.2021	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 13.06.2021 по 14.06.2021	

Студент _____
(підпис)

Марушка І.М.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Мовчан Л.Т.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2021.

Стор. 68; рис. 19; табл. 14; креслень (презентацій) ; джерел 19.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Стиснене повітря, як альтернативний енергоносіє при акумулюванні енергії від вітроенергетичної установки».

Метою роботи є встановлення ефективності використання стисненого повітря в якості енергоносія у вітроенергетичній установці.

У роботі проведено аналіз роботи ВЕУ та виробництва різних енергоносіїв на базі вітроенергетичної установки. Також Проаналізовано можливість використання стисненого повітря як єдиного носія для комплексного постачання споживача теплом, електроенергією, стисненим повітрям, холодом різного потенціалу. Запропонувати пневмосистема для комплексного енергопостачання. Проведено аналіз зміни тиску в акумулюючій ємності при різних режимах генерації/споживання стисненого повітря.

Ключові слова: ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, СТИСНЕНЕ ПОВІТРЯ

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РЕФЕРАТ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Марушка І.М.</i>					4	
<i>Перевірів</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>						
<i>Консульт.</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Вакуленко О.О.</i>						
<i>Зав каф.</i>		<i>Тарасенко М.Г.</i>				гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ		

ЗМІСТ

ВСТУП

1	АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	6
1.1	Вітрові енергоустановки і енергосистема	6
1.2	Виробництво електричної енергії.....	6
1.3	Виробництво різних енергоносіїв на базі ВЕУ	10
1.4	Стиснення повітря.....	11
1.5	Висновки до розділу	12
2	ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	13
2.1	Сфери застосування стисненого повітря	13
2.2	Споживачі стисненого повітря	14
2.3	Класи забрудненості стисненого повітря	17
2.4	Пристрої очищення повітря	21
2.5	Способи осушення повітря	23
2.6	Енергетичні показники роботи компресорних установок	26
2.7	Охолодження повітря та утилізація тепла.....	29
2.8	Порівняння варіантів виробництва стисненого повітря за традиційною схемою і з безпосереднім приводом компресора від вітроустановок.....	30
2.9	Вибір компресора для спільної роботи з вітроустановкою	32
2.10	Висновки до розділу	38
3	РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	40
3.1	Споживання і виробництво стисненого повітря	
3.2	Типи енергоакумулюючих систем	43

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ			
Розробив	Марушка І.М.							
Перевірів	Мовчан Л.Т.							
Консульт.	Мовчан Л.Т.							
Н. Контр.	Вакуленко О.О.							
Зав каф.	Тарасенко М.Г.					Літ.	Аркуш	Аркушів
						4		
						гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ		

3.3 Розрахунок ємності акумулятора стисненого повітря	48
3.4 Робота повітряного акумулятора в залежності від режимів споживання/генерації енергії	56
3.5 Висновки до розділу	58
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	60
4.1 Блискавкозахист	60
4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час більшість вітроустановок виробляють електроенергію. Існує ряд особливостей при використанні ВЕУ на вироблення електроенергії для енергопостачання автономного споживача:

- мінливість швидкості вітру призводить до розбіжностей режимів виробництва і споживання енергії. Дефіцит заповнюється роботою резервних установок, таких як дизель-генераторна установка (ДГУ);
- складність акумулювання електричної енергії в промислових масштабах;
- великі втрати енергії вітру при використанні електроенергії в якості проміжного носія при виробництві інших промислових енергоносіїв (наприклад, виробництво стисненого повітря за традиційною схемою «ВЕУ-електрогенератор-електромережа-електродвигун-компресор» веде до втрат енергії до 10-15 %)

Досить перспективним енергоносієм для акумулювання електроенергії є стиснене повітря. Це екологічний, пожежо-, електро- і вибухобезпечний енергоносієй високої якості. За допомогою стиснутого повітря, з високим ККД можна отримувати холод (аж до криоуровня), тепло, електроенергію, виконувати механічну роботу.

Виробництво стисненого повітря - енергоємне і на промисловому підприємстві на його отримання витрачається до 30% загального енергоспоживання.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Марушка І.М.</i>					6	
<i>Перевірів</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>						
<i>Консульт.</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Вакуленко О.О.</i>						
<i>Зав каф.</i>		<i>Тарасенко М.Г.</i>			гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ			

Стиснене повітря - зручний енергоносіє для інтегрування різних споживачів і виробників енергії (як на традиційних, так і відновлюваних джерелах) в пневмокомплекс з єдиним акумулятором і виробництвом спектра енергоносіїв.

Мета кваліфікаційної роботи. Встановлення ефективності використання стисненого повітря в якості енергоносія у вітроенергетичній установці.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Проаналізувати роботу ВЕУ.
2. Провести аналіз виробництва різних енергоносіїв на базі вітроенергетичної установки.
3. Проаналізувати можливість використання стисненого повітря як єдиного носія для комплексного постачання споживача теплом, електроенергією, стисненим повітрям, холодом різного потенціалу.
4. Запропонувати пневмосистема для комплексного енергопостачання.
5. Провести аналіз зміни тиску в акумуляуючій ємності при різних режимах генерації/споживання стисненого повітря.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 68 арк. формату А4, графічна частина – аркушів презентації.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Вітрові енергоустановки і енергосистема

Згідно [1] енергосистеми, в складі яких є генеруючі потужності від вітроустановок, класифікуються залежно від частки участі ВЕУ наступним чином:

- Клас А: потужність вітроустановки (P) в енергосистемі (P_G) є визначальною, тобто $P \geq 5P_G$. В основному до цього класу належать окремі вітроустановки, не підключені до великої енергосистеми.
- Клас В: потужність вітроустановок одного порядку з потужністю інших джерел генерації, тобто $P \approx P_G$.
- Клас С: вітроустановка підключена до потужної енергосистеми, тобто $P \leq 5P_G$.

Це поширений випадок роботи вітроустановок в районах, де є великі енергосистеми. Нерівномірність виробництва енергії вітром компенсується за рахунок енергосистеми. При цьому енергія вітру використовується найбільш повно.

В даний час для забезпечення потреб як промислових, так і побутових споживачів використовується в основному електроенергія як найбільш гнучкий і універсальний енергоносіє, який потім перетворюється в інші види носіїв, такі як холод, тепло, робота.

1.2 Виробництво електричної енергії

При розгляді вітроелектричних систем (рис. 1.1) докладно зупинимося

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Марушка І.М.</i>						
<i>Перевірів</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>					6	
<i>Консульт.</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>				єр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Вакуленко О.О.</i>						
<i>Зав каф.</i>		<i>Тарасенко М.Г.</i>						

на класах А і Б, що представляють автономні енергосистеми.

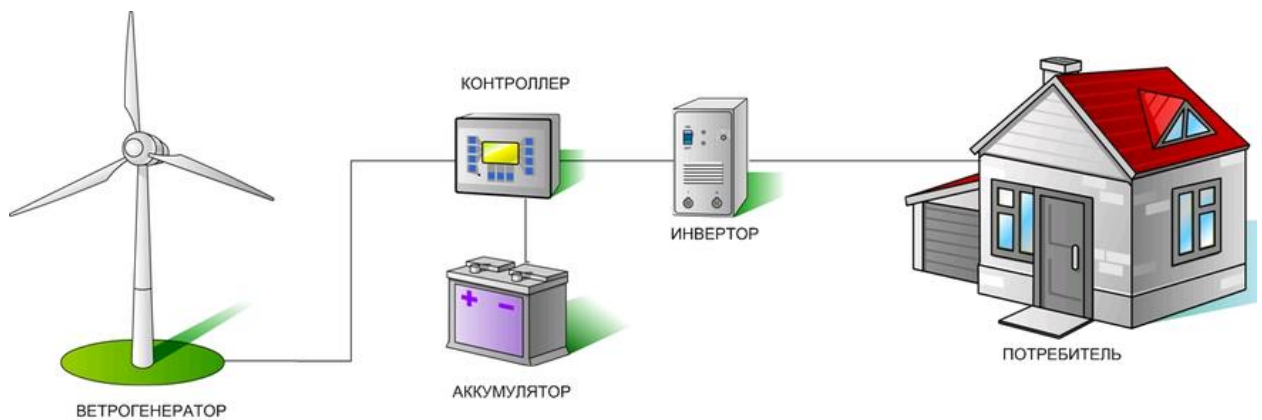


Рис. 1.1 – Вітроенергетична система

Клас А. Ефективність роботи вітроустановки і її вартість багато в чому залежать від вибору системи управління генератором.

При мінімальному управлінні генератором напруга на його виході (і частота в разі генератора змінного струму) буде нестабільною. Електроенергію з такими параметрами можна застосовувати в нагрівальних елементах, і в випрямлячах для подальшого використання. При невеликих навантаженнях ВЕУ комбінують з акумуляторами електричної енергії.

У деяких випадках рекомендується стабілізувати частоту усієї електроенергії, яка виробляється генератором. Для цього існують два різні способи.

1. Механічне управління лопатями вітроколеса (рис. 1.2) з метою стабілізації частоти його обертання. При такому управлінні крок лопатей ротора ВЕУ при зміні швидкості вітру змінюється так, щоб частота його обертання лишалася незмінною. Недоліком методу є великі втрати енергії вітрового потоку, складність виготовлення.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7



Рисунок 1.2 – Зміна кута атаки лопатей вітроколеса

2. Електричне управління, при якому сталість частоти обертання вітроколеса і генератора забезпечується зміною електричного навантаження на виході генератора. При такому способі стабілізації частоти енергія вітру використовується набагато ефективніше, так як лопаті вітроколеса працюють в оптимальному режимі. Використання сучасного обладнання робить його більш дешевим і надійним, порівняно з механічним керуванням.

Клас В. У цьому випадку необхідна надійність енергопостачання забезпечується за рахунок резервних джерел на традиційному паливі. У таких енергосистемах ними є дизельні енергоустановки [2]. Використання вітроелектрогенератора дозволяє економити дизельне паливо.

У вітроустановках цього класу використовуються дві різні схеми розподілу виробленої енергії: одноканальна схема і багатоканальна схема [3].

1. Одноканальна схема. У такій схемі підтримується стабілізована напруга в залежності від потреб споживача.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Цілодобове постачання електроенергією без обліку її споживання вимагає тривалої роботи дизельного генератора в періоди затишшя. Дизель при цьому або працює безперервно або вимикається тільки при дуже сильному вітрі. На практиці в такій схемі при сильному вітрі іноді більше 70% енергії, що виробляється вітроелектрогенератор, гаситься на баластних опорах.

2. Багатоканальна схема. Застосування цієї схеми дозволяє найбільш повно використовувати енергію вітру. Це досягається зниженням ціни електроенергії для певних споживачів в залежності від її якості (рис. 1.21,6). При слабкому вітрі споживачі дешевої електроенергії, яка виробляється ВЕУ, автоматично відключаються, зменшуючи цим навантаження на енергосистему. У періоди затишшя електроенергією забезпечуються тільки споживачі дорогої стабілізованої енергії, що виробляється дизельним електрогенератором. Перевагою такої схеми розподілу енергії є максимальне використання в будь-який момент часу енергії вітру.

Спільна робота вітродизельного енергокомплексу для вироблення електричної енергії має ряд особливостей:

- надлишок електроенергії перетворюється в тепло на баластному опорі;
- технічний мінімум по потужності дизель-генератора, який становить не менше 40 % від номінальної потужності ДГУ;
- для забезпечення узгодження ВЕУ і ДГУ по частоті і фазі виробленого струму, номінальні потужності цих енергоустановок повинні знаходитися в співвідношенні $N_{\text{ВЕУ}} / N_{\text{ДГУ}} = 1/2$ [3].

Тому, вітроелектрогенератор може лише частково замінити дизельну установку в автономній енергосистемі.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1.3 Виробництво різних енергоносіїв на базі ВЕУ

Промисловій енергетиці для забезпечення технологічних процесів потрібні різні енергоносії: електроенергія, тепло, холод різного потенціалу, кисень, кондиційоване повітря, азот, аргон, прісна вода, стиснене повітря. В даний час всі вони виробляються за допомогою електроенергії, як найбільш гнучкого, універсального і легко трансформуючого джерела енергії. При цьому, чим більше ступенів перетворення, тим нижче загальний ККД системи. Отже, для зниження втрат первинної енергії в системі, необхідний комплексний підхід до вирішення проблем енергопостачання.

На виробництво цих енергоносіїв витрачається значна кількість, як первинного палива, так і електроенергії (табл. 1.5).

Таблиця 1.1 - Витрати енергії на виробництво різних енергоносіїв

Вид продукції	Витрати електричної енергії	Витрати палива
Електроенергія: (на ДЕС)		350 г у.п./кВт·год
Тепло на опалення і ГВП:	1 кВт·год електроенергії (при безпосередньому перетворенні електричної енергії в тепло)	360 г у.п./кВт·год
	0,3 кВт·год електроенергії (при використанні теплового насоса з $t_{НПТ} = 10^{\circ} \text{C}$)	120 г у.п./кВт·год
	На водонагрівуючій котельні	38 г у.п./МДж
Стиснене повітря ($p = 8$ атм):	0,15 кВт * год /кг (при використанні компресора з електроприводом)	52,2 г у.п./ кг

Продовження таблиці 1.1

Продукти розділення повітря [3]:		
Зріджений природний газ	0,48 кВт·год/кг	
Азот	0,43 кВт· год /кг	
Кисень	0,2-1,5 кВт· год /м ³	
Кондиціоноване повітря	0,3 кВт· год / м ³	210 г у.п./кВт·год

В автономних енергосистемах, при використанні вітродизельних установок, при виробництві комплексу енергоносіїв, виникають великі втрати палива, в зв'язку з трансформацією енергії через проміжний носій - електроенергію.

1.4 Стиснення повітря

Пропонується використовувати повітряний компресор, який має безпосередній привід від вітроустановки без проміжного перетворення енергії.

Компресор виробляє два види енергії: механічну (у вигляді стислого повітря) і теплову. В процесі політропного стиснення без відводу тепла температура повітря, що стискається підвищується. У цьому випадку спостерігається ефект теплового насоса.

Одним з переваг стисненого повітря як енергоносія є можливість його акумулювання в промислових масштабах широко відомими технічними рішеннями.

У промисловій енергетиці особливий інтерес до стисненого повітря обумовлений можливістю його перетворення в інші енергоносії з високим ККД.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рисунок 1.3 – Поршневий компресор

Це дає можливість інтегрування різних систем енергопостачання, заснованих як на традиційних, так і на відновлюваних джерелах енергії, в єдиний комплекс, як то тепло- і електропостачання, холодопостачання, вентиляція і кондиціонування повітря, кріогенна техніка, опріснення води та ін. [4].

1.5 Висновки до розділу

1. В даний час більшість вітроустановок працюють на привід електрогенераторів з виробленням електроенергії, як універсального енергоносія. Однак, промислового підприємству для забезпечення технологічного процесу потрібні різні енергоносії. Отримання їх за допомогою електричної енергії пов'язано з істотними втратами в ланцюжку агрегатів, що знижує сумарну ефективність системи.
2. Проведено аналіз виробництва різних енергоносіїв на базі вітроенергетичної установки.
3. Проаналізовано варіант акумулювання енергії шляхом використання стисненого повітря.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Сфери застосування стисненого повітря

В даний час стиснене повітря виробляється в основному з використанням електроенергії. На промисловому підприємстві на це витрачається від 5 до 30 % від загального електроспоживання [5].

Стиснене повітря на підприємстві застосовують за такими напрямками (рис. 2.1). Серед них:

- технологічні цілі;
- механічна робота (пневмопривід);
- холодильні та криогенні системи;
- системи кондиціонування повітря;
- пневмоавтоматика.

Стисле повітря широко використовується в нафтовидобувній промисловості (при проходженні нафтових свердловин), вугільній промисловості (перфоратори, бури, отримання холоду, транспортні потреби), підприємствах чорної і кольорової металургії, хімічної промисловості, будівництві (пневмомолотки, трамбувальні машини, вібратори, розпорошення барвників), на транспорті (підйомники, гальмівні пристрої) і в зв'язку (пневмопочта).

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	2 ПРОЕКТНО- КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Марушка І.М.</i>						
<i>Перевірів</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>					13	
<i>Консульт.</i>		<i>Мовчан Л.Т.</i>				<i>гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Вакуленко О.О.</i>						
<i>Зав каф.</i>		<i>Тарасенко М.Г.</i>						



Рисунок 2.1 - Сфери використання стисненого повітря

2.2 Споживачі стисненого повітря

За способом перетворення енергії стисненого повітря пневмоприймачі можна розділити на групи [4]:

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1. Механізми, що перетворюють потенційну енергію стисненого повітря в механічну роботу - пневмоприводи;

2. Пристрої, що перетворюють потенційну енергію стисненого повітря в кінетичну енергію потоку (струменеві пневмоприймачі) - ежектори, обдувальні пристрої, форсунки, розпилювачі рідин і ін.

Пневмомеханізми і пневмопристрої широко застосовуються при механізації та автоматизації виробничих процесів. Оснащення пневматичними системами верстатів і машин досягає 70 % (зварювальні та ливарні машини), а всього в промисловій експлуатації перебуває понад 100 млн. одиниць пневмоприймачів, що працюють на різних рівнях тиску: низького 1,0-10 кПа, середнього 100-250 кПа, високого 0,25-2,5 МПа і надвисокого - більше 2,5 МПа [4].

Вибір оптимального тиску стисненого повітря для пневмоприймачів є найважливішою умовою їх ефективної експлуатації. Технічні характеристики пневмоприймачів визначають наступні величини тиску в мережі, МПа [6]:

- для пневмоприводів різних машин і систем механізації, пресів і т. д. : 0,63-0,9;
- для пневмосистем автоматичного управління; 0,4-0,63;
- для ручного пневмоінструменту: 0,4-0,63;
- для форсунок, піскоструйних апаратів, фарборозпилювачів, обдувочних сопел і т. д.: 0,2-0,4.

При виборі робочого тиску необхідно врахувати його коливання в мережі через одночасне підключення великої кількості пневмоприймачів, а також втрати тиску в магістральному повітропроводі. У раціонально виконаних пневмомережах коливання тиску не перевищують 0,05 МПа, а втрати - 5-10% від величини робочого тиску [6].

Витрати повітря характерних його споживачів на промисловому підприємстві наведені в табл. 2.1 [6].

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Таблиця 2.1 - Витрати стисненого повітря характерних споживачів стисненого повітря в машинобудуванні [6]

Споживач	Характеристика	Тиск, МПа	Витрата повітря, м ³ /хв
Кувальні і штампувальні молоти	Зусилля, кН	0,6	
	5		10,0
	7		13,0
	10		16,5
	15		20,0
	20		24,0
	30		30,0
	50		40,0
	100		55,0
Молотки: Рубальні карбувальні клепальні	Потужність, кВт	0,5 – 0,6	0,6 – 0,8
	0,37 — 0,51		0,7 – 1,5
	0,12 – 0,74		
Свердлильні машини	Найбільший діаметр свердління, мм	0,5 – 0,6	0,5 – 0,8
	8		0,6 – 0,9
	10		0,7 – 1,0
	13		0,9 – 1,7
Шліфувальні машини	Найбільший діаметр круга, мм	0,5 – 0,6	0,6 – 0,8
	25		1,0 – 1,3
	50		1,6 – 2,1
	125		1,7 – 2,2
Гайковерти і ключі	Найбільший діаметр різьби, мм	0,5 – 0,6	0,3 – 0,7
	12 – 14		1,2 – 1,5
	20 – 22		1,3 – 2,5
Напильники	28 – 32	0,5 – 0,6	
	Потужність 0,15 кВт		0,2 – 0,3

2.3 Класи забрудненості стисненого повітря

Якість стисненого повітря визначається паспортними даними споживачів. В [7] встановлені класи забрудненості (табл. 2.2). Вони розбиті на 15 градацій. Зміст забруднень зазначено в міліграмах на кубометр, які приведені до нормальних умов по ДСТУ ISO 15552:2006.

Таблиця 2.2 - Норми забрудненості стисненого повітря [7]

Клас забрудненості	Тверді частинки			Вода		Мінеральні масла	
	Нормальний розмір	Максимальний розмір	Склад	Рідка фаза	пароподібна фаза	Рідка фаза	пароподібна фаза
	мкм			мг/м ³ , не більше			
0	0,2	-	0,001	Не доп.	*	Не доп.	
1	1	5	1	Не доп.			
2				500	Не обм.		
3	5	0	2	Не доп.	**	16	16
4				800	Не обм.		
5	10	25	2	Не доп.	**	Не доп.	3
6				800	Не обм.	16	16
7	25	40	4	Не доп.	**	Не доп.	3
8				800	Не обм.	16	16
9	40	80	4	Не доп.	**	Не доп.	3
10				800	Не обм.	16	16
11	80	Не обм.	12,5	Не доп.	**	Не доп.	3
12				3200	Не обм.	25	25
13	Не обм.		25	Не доп.	**	Не доп.	3
14				10000	Не обм.	100	100

Ступінь осушки:

* - точка роси повинна бути нижчою за мінімальну робочу температуру не менше ніж на 10° С і не вище - 10° С;

** - точка роси повинна бути нижчою за мінімальну робочу температуру не менше ніж на 10° С .

ДСТУ ISO 15552:2006 передбачає вісім норм номінального і максимально розміру і концентрації твердих частинок в стисненому повітрі. Концентрація твердих частинок розмірами більшими номінального до максимального не повинна перевищувати 20 % від встановленого загального вмісту твердих частинок в міліграмах на кубометр для класів 1-4 і 30 % - для класів 5-10.

Незалежно від класу забрудненості в стислому повітрі допускаються тільки сліди кислот і лугів або концентрацій, що не роблять шкідливого впливу на пневмосистему.

Класи забрудненості стисненого повітря вказуються в технічних вимогах до експлуатації пневматичних систем і пристроїв.

Орієнтовний вибір класу забрудненості стисненого повітря для деяких пневматичних пристроїв і систем управління можна зробити згідно табл. 2.3 [4]. Пневматичне обладнання розділене на чотири групи в залежності від чутливості обладнання до забруднень стисненого повітря [4].

Група А. Комунікації пневматичних систем, ємності, обладнання силових приводів мембранного типу і сифонні пристрої, що мають надійне антикорозійне покриття, в яких поверхні, що труться, безпосередньо не стикаються з повітрям.

Група В. Пневматичне обладнання для систем механізації та автоматизації виробничих процесів (пневматичні циліндри і пневматичні мотори, пневматичний інструмент, розподільна та контрольно-регулююча

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

апаратура та інші пристрої з прохідними і дросельними отворами, що мають мінімальний розмір поперечного перерізу не менше 0,8 мм).

Група С. Пневматичне обладнання для систем механізації та автоматизації виробничих процесів з підвищеними вимогами до надійності (точні дросельні і демпфіруючі пристрої, апаратура з прецизійними парами і діаметрами умовних проходів 0,5-2,0 мм).

Група D. Пневматичні прилади та пристрої автоматизації систем контролю і регулювання теплоенергетичних і хімічних процесів, а також вимірювальних та інших відповідальних систем (блоки АУС, точні регулятори, датчики, складні прилади і т. П.).

При виборі ступеня очищення повітря необхідно визначити точку роси, тому що може з'явитися волога при розширенні, а це неприпустимо для обладнання групи D. Для груп А, В і С необхідно запобігти утворенню льоду. У графі 5 табл. 2.3 дані орієнтовні значення точки роси t_p , до якої необхідно осушити повітря. Вони визначені виходячи з робочої температури t_m в магістральному трубопроводі, температури навколишнього середовища t_0 .

У табл. 2.3 [4] наведені такі позначення для необхідного ступеня очищення від забруднень.

Очищення від механічних домішок: х - грубе очищення (тонкість фільтрації від 80 до 100 мкм); хх - нормальне очищення (від 20 до 50 мкм); ххх - тонке очищення (від 5 до 15 мкм); хххх - особливо тонке очищення (тонкість фільтрації менше 5 мкм).

Очищення від вологи: х - грубе очищення (концентрація вологи в рідкому стані не більше 4 г/м³); хх - нормальне очищення (не більше 0,4-0,6 г/м³); ххх - тонке очищення (не більше 0,04-0,1 г/м³); хххх - особливо тонке очищення (волога в рідкому стані не допускається; концентрація пароподібної вологи повинна відповідати точці роси t_p (графі 5)).

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 2.3 - Ступінь очищення стисненого повітря для пневматичного обладнання в залежності від ступеня розширення і температурних умов [4]

$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_o, ^\circ\text{C}$	Ступінь розширення повітря, не більше	Температура стисненого повітря на вході	$T_p, ^\circ\text{C}$	Пневматичне обладнання					
					Група А		Група В		Група С	
					І	ІІ	І	ІІ	І	ІІ
40	20	2	t_m	15	x	x	xx	xx	xxx	xxx
			t_o	0	x	x	xx	xx	xxx	xxx
	6	t_m	5	x	x	xx	xx	xxx	xxx	
		t_o	-15	xx	xx	xxx	xxx	xxxx	xxx	
	0	2	t_m	-5	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
			t_o	-20	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
6	t_m	-5	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		
	t_o	-35	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		
20	20	2	t_m	0	x	x	xx	xx	xxx	xxx
			t_o	0	x	x	xx	xx	xxx	xxx
	6	t_m	-15	xx	xx	xxx	xxx	xxxx	xxx	
		t_o	-15	xx	xx	xxx	xxx	xxxx	xxx	
	0	2	t_m	-5	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
			t_o	-20	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
6	t_m	-15	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		
	t_o	-35	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		
5	20	2	t_m	-15	xx	xx	xxx	xx	xxxx	xxx
			t_o	0	x	x	xx	xx	xxxx	xxx
	6	t_m	-30	xxx	xx	xxxx	xx	xxxx	xxx	
		t_o	-15	xx	xx	xxx	xxx	xxxx	xxx	
	0	2	t_m	-15	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
			t_o	-20	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx
6	t_m	-30	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		
	t_o	-35	xxxx	x	xxxx	xx	xxxx	xxx		

Примітка: для пневмопристроїв групи D ступінь очищення від вологи і механічних домішок у всьому діапазоні температур і будь-якого ступеня розширення xxxx, I - ступінь очищення від вологи, II - ступінь очищення від механічних забруднень.

Рекомендації, наведені в табл. 2.3, дані для безперервного розширення стисненого повітря і теплообміну між пневматичним пристроєм і навколишнім середовищем. При наявності теплоізоляції вимоги до очищення повітря необхідно підвищити, щоб звести до мінімуму можливість конденсації пари при $t_p < 0^\circ \text{C}$ для груп А, В і С устаткування.

Для забезпечення економічної та надійної роботи, як компресорів, так і пневмообладнання, зменшення зносу компресорів, а також для подачі споживачам стисненого повітря необхідних параметрів по температурі, чистоті і вологості використовується допоміжне обладнання, до складу якого входять:

- пристрої для прийому та очищення всмоктуваного повітря від механічних домішок і вологи (фільтри і фільтр-камери);
- пристрої для очищення і осушення стисненого повітря від масла і води (масловологовідділювачі, системи осушення);
- пристрої для охолодження стисненого повітря (проміжні та кінцеві охолоджувачі);
- системи автоматичного контролю і управління.

2.4 Пристрої очищення повітря

В даний час для очищення повітря від механічних домішок застосовують фільтри і пиловловлювачі, які випускаються серійно. Характеристика повітряних фільтрів подана в табл. 2.4 [4], а їх ефективність - в табл. 2.5 [4].

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 2.4 - Характеристика повітряних фільтрів

Тип фільтра	Повітряне навантаження на перетин входу, м ³ /м ²		Початковий опір ΔP, Па	Пилоємність при збільшенні ΔP в 2—3 рази, г/м ²	Спосіб регенерації
	Рекомендована	Допустима			
Сухі волокнисті					Зміна фільтруючого матеріалу
осередкові ФяЛ	6000	7000	98	430	
рулонні ФРП	5000	9000	98	1000	
Сухий сітчастий					Очищення пневматично або промивка у воді
ФяВ	6000	7000	59	2600	
Сухий губчатий					
ФяП	6000	7000	68	3500	
Промаслені (10% масла від маси волокна) волокнистые					Зміна фільтруючого матеріалу
рулонні ФРУ	8000	10000	59	450	
осередкові ФяУ	6000	7000	39	570	
Масляні					
які самоочисні	7000	8000	78	7—15	—
осередкові ФяР	6000	7000	59	2300	Промивання в содовому розчині з промаслюванням
осередкові ФяВ	6000	7000	59	2600	

Таблиця 2.5 - Ефективність очищення основних типів фільтруючих матеріалів

Фільтруючі матеріали	Тонкість фільтрації, мкм	Ефективність очищення, %		
		тверді частинки	Вода в рідкому стані	мінеральне масло в рідкому стані
Сітчасті:				
сухі	15—200	70-95	—	—
масляні	5—200	До 80**	До 80	До 80
Металокерамічні	0,5—200	90 — 98*	До 90	До 90
Керамічні	1 — 100	90 — 98*	До 90	До 90
Волокнисті:				
Паперові	> 10	60 — 80*	До 95	До 95
Ткани	15—30	—	До 95	До 95
особливо тонкі	>0,2	До 99,999	До 99,95	До 99,95

*Ефективність очищення від часточок розміром, який відповідає номінальній товщині фільтрації.

**Ефективність очищення від атмосферного пилю.

Вимоги до повноти вловлювання частинок визначаються захистом проточної частини компресорів та умовами експлуатації пневмосистеми в цілому [7].

2.5 Способи осушення повітря

Одним з найважливіших етапів по обробці стисненого повітря є його осушення. Вміст вологи стисненого повітря визначається за допомогою

психрометричної номограми, зображеної на рис. 2.2 [4] в залежності від параметрів атмосферного повітря і тиску компресора на нагнітанні.

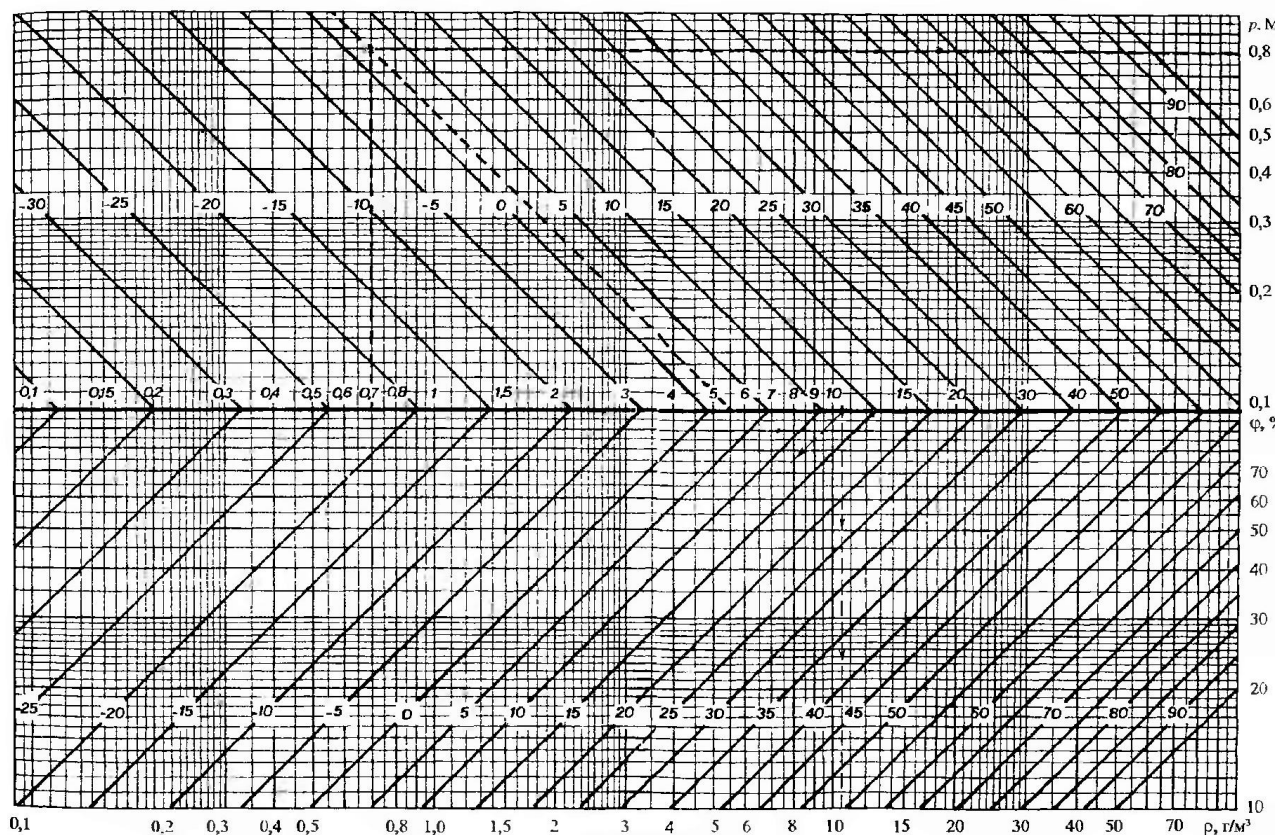


Рисунок 2.2 - Психрометрична номограма повітря [4]

Волога зі стисненого повітря виділяється: при стисканні, охолодженні в проміжному і / або кінцевому охолоджувачах, а також при розширенні у споживача. Існують стандартні методи очищення стисненого повітря від парів води. Серед них: охолодження з подальшим виділенням і видаленням конденсату, адсорбція і абсорбція вологи. Порівняльна характеристика представлена в табл. 2.6 [4].

Вода, виділена зі стисненого повітря, за якістю відповідає дистильованій воді і може бути використана в подальшому на різні цілі. Наприклад, в якості підживлювальної води в системі утилізації тепла стисненого повітря.

Таблиця 2.6 - Порівняльні дані осушувачів різних типів

Показники	Спосіб осушення		
	адсорбційний	охолодженням	абсорбційний
$V_{\text{повітря}}, \text{ м}^3/\text{хв}$	від 0,14 до 200	від 0,14 до 860	від 0,03 до 440
Поглинаючі речовини	Силікагель, активний оксид алюмінію, цеоліти	—	хімікати; карбамід
Вид енергії, яка споживається осушувачами	Електрика; для безнагрівних 0,1-0,5 кВт на $1 \text{ м}^3/\text{хв}$; з термічною регенерацією - 0,9 - 1,2 кВт на $1 \text{ м}^3/\text{хв}$. Пар і повітря для регенерації адсорбенту	Електрика: 0,1-0,25 кВт на $1 \text{ м}^3/\text{хв}$; вода для охолодження в конденсаторах і осушувачах з водяним охолодженням	
Температура точки роси при тиску 0,7 МПа	Від -20 до -70° C . Залежить від витрати і тиску повітря. Поступово піднімається, $<3^\circ \text{ C} / \text{цикл}$	$2-10^\circ \text{ C}$ температура точки роси постійна, не залежить від витрати, тиску і температури стисненого повітря на вході	На 12° C нижче температури стисненого повітря на вході
Видалення масла	Не застосовується для видалення масла	Видаляється конденсацією при охолодженні стисненого повітря	Видаляє масло у вигляді крапель
$\Delta p, \text{ МПа}$	0,007-0,014	0,025-0,035	$<0,01 P_{\text{вх}}$

Продовження таблиці 2.6

$T_{св}$, на вході, °С:			
максимальна	35	45	35
мінімальна	2	2	Не лімітується
$T_{ос}$, °С:			
максимальна	35	45	35
мінімальна	2	4	Не лімітується
Розташування	В приміщенні	У приміщенні і поза приміщенням, при температурі не нижче 4°С	У приміщенні або поза приміщенням
Об'єм *	1,25	1	0,4
Маса *	1,5	1	0,4
Попереднє очищення стисненого повітря	Потрібен захист адсорбенту від забруднень твердими частинками і крапельною вологою (водою і маслом)	Потрібен захист від масла і твердих частинок для запобігання засмічення труб теплообмінників. Номінальна тонкість фільтрації пристроїв очищення на вході 50 – 80 мкм.	Зазвичай не потрібно, за винятком, коли від компресора надходить значна кількість масла.

Примітки: Порівняльні дані приведені без фільтрів попереднього і остаточного очищення. За одиницю прийнята величина для пристроїв осушки охолодженням.

2.6 Енергетичні показники роботи компресорних установок

Виробництво стисненого повітря - енергоємний процес. Наприклад, компресор К-250-В1-1, що виробляє 250 м³/хв, стисненого повітря з тиском 0,9 МПа має електродвигун зі встановленою потужністю 1,75 МВт [5].

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Питома робота стиснення залежить від виду робочого процесу.

При ізотермічному стисканні (Т- const):

$$l_{iz} = RT_1 \ln p_2 / p_1, \text{ Дж /кг} \quad (2.1)$$

де T_1 - температура на початку процесу стиснення, К;

p_1 - тиск на початку процесу стиснення, Па;

p_2 - тиск в кінці стиснення, Па;

R - універсальна газова постійна (для повітря $R = 287$), Дж / (кг К).

При адіабатному (ізоентропному) процесі стиснення:

$$l_{ad} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = c_p T_{2ad} - T_1, \text{ Дж /кг} \quad (2.2)$$

де T_{2ad} - температура в кінці процесу адіабатного стиснення, К;

c_p - теплоємність повітря, Дж / (кг К);

k - показник адіабати (для повітря $k = 1,4$).

Відведена теплота дорівнює роботі стиснення в ізотермічному процесі:

$$q_{iz} = l_{iz}.$$

При адіабатному стисненні:

$$q_{ad} = 0$$

Потужність, що витрачається на стиснення газу в компресорі:

$$P_{компр.} = G_{в-ха} l_{стиснення} = G_{в-ха} (h_2 - h_1), \text{ Вт} \quad (2.3)$$

де $G_{в-ха}$ - продуктивність компресора, кг/с;

$l_{стиснення}$ - робота стиснення компресора, Дж/кг;

h_1, h_2 - ентальпії повітря на початку і в кінці процесу стиснення.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергетична досконалість компресорів визначається відносним термодинамічним ККД, що є відношенням роботи в ідеальному циклі стиснення до дійсного політропного циклу [8]. Для компресорів з проміжним охолодженням еталонним є ізотермічний процес:

$$\eta_{із.ом} = \frac{l_{із}}{l_{пол}} = \frac{RT_1 n \frac{P_2}{P_1}}{\frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \quad (2.4)$$

де n - показник політропи.

Неохолоджувані установки порівнюють з адіабатним циклом стиснення:

$$\eta_{а.ом} = \frac{l_a}{l_{пол}} = \frac{\frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{\frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \quad (2.5)$$

Відносний як ізотермічний, так і адіабатний ККД компресорних агрегатів знаходяться в межах 0,8-0,92 [8].

Дійсна робота, що витрачається в компресорі, залежить також від механічної досконалості установки, яка враховується механічним η_M . Механічний ККД η_M - 0,9 - 0,96 [8].

Дійсна питома робота, що підводиться від двигуна на вал компресора:

$$l = l_{із} / \eta_{із.ом} \eta_M \quad \text{і} \quad l_{пол} = l_a / \eta_{а.ом} \eta_M \quad (2.4)$$

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2.7 Охолодження повітря та утилізація тепла

При стисненні, температура повітря підвищується. Температура стисненого повітря в кінці політропного процесу (pp) визначається з рівняння:

$$T_2 / T_1 = p_2 / p_1^{\frac{n-1}{n}}, \text{ К} \quad (2.5)$$

На рис. 2.3 наведені залежності для визначення T_2 / T_1 [8].

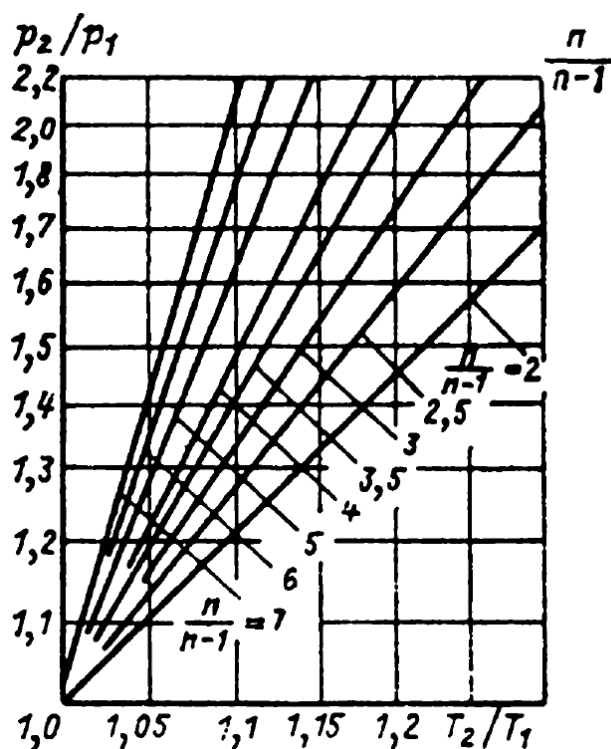


Рисунок 2.3 - Діаграми для визначення T_2 / T_1 в залежності від ступеня підвищення тиску і показника політропи

Питома кількість тепла, підведена або відведена в процесі стиснення газу:

$$q = \frac{n - k}{k - 1} l_{\text{пол}}, \text{ Дж/кг} \quad (2.4)$$

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Тепло стиснення і втрати відводяться за рахунок системи охолодження. Кількість тепла, одержуваного від стисненого повітря рівна за величиною потужності приводу [9]. Причому, температурний рівень отриманого тепла коливається від 40 до 100° С в залежності від способів тепловідбору [9].

На даний час в більшості випадків тепло системи охолодження скидається в навколишнє середовище. Однак, до 90 % цього потенціалу може бути використано з користю [9].

Теплота стиснення, що відводиться від компресора, відноситься до низькопотенційних енергоресурсів, температурний рівень якої дозволяє використовувати її на цілі теплопостачання [9].

В даний час для утилізації тепла стисненого повітря застосовуються рекуперативні пластинчасті або кожухотрубні теплообмінники, як в якості проміжних, так і кінцевих холодильників.

2.8 Порівняння варіантів виробництва стисненого повітря за традиційною схемою і з безпосереднім приводом компресора від вітроустановок

На даний час більшість вітроустановок виробляють електроенергію, а компресори використовують електроенергію як енергоносії. Пропонується безпосередній привід повітряного компресора від вітроенергетичної установки. В роботі проведено порівняння цих варіантів. Системи подачі повітря від вітроустановок представлені на рис. 2.4. У першому випадку це серійна вітроелектрична установка і компресор з електроприводом, а в другому - єдиний вітрокомпресорний блок.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

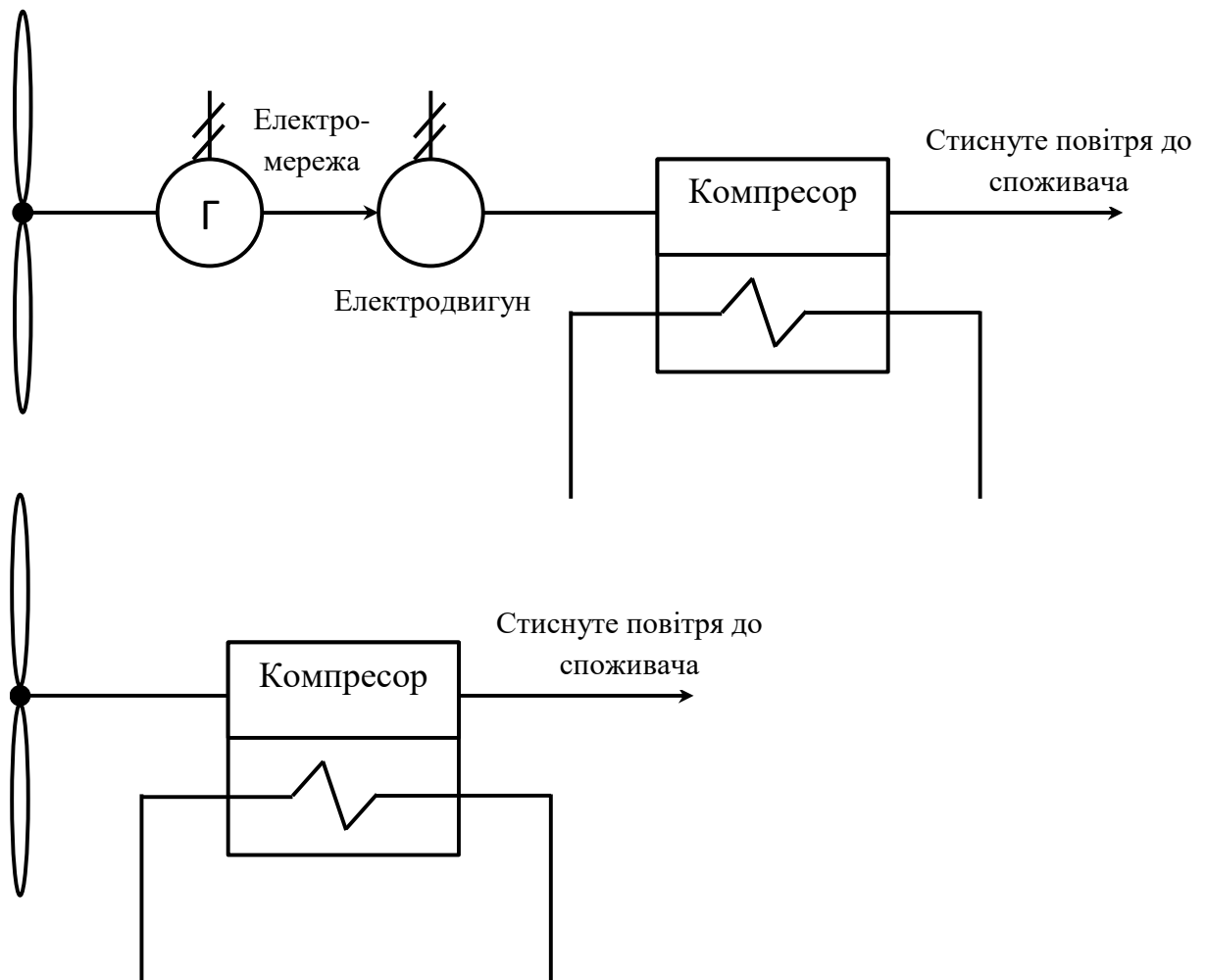


Рисунок 2.4 - Порівняння систем подачі повітря від вітроустановки

Втрати всього ланцюжка агрегатів при використанні вітроелектричної установки на привід повітряного компресора становлять:

$$n_{\text{компр}}^{\text{ном}} = N n_{\text{вк}}^{\text{ном}}$$

$$N = \frac{n_{\text{компр}}^{\text{ном}}}{n_{\text{вк}}} = 0,08 n_{\text{компр}}^{\text{ном}} R$$

де $\eta_{\text{мех}}^{\text{BEV-ген}} = 0,9$ ККД по передачі механічної енергії в системі вітроустановка - електрогенератор;

$\eta = 0,98$ - ККД електрогенератора;

0,98 - ККД з передачі електричної енергії в системі електрогенератор - електромережа.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

0,98 - ККД електродвигуна;

0,95 - ККД по передачі механічної енергії в системі електродвигун - компресор.

При роботі компресора безпосередньо від вітроагрегата без проміжного перетворення енергії в електричну, втрати енергії складуть:

$$\eta_{пер}^{компр} = \eta_{мех}^{BEY-компр} = 0,9$$

де $\eta_{мех}^{BEY-компр} = 0,9$ ККД по передачі механічної енергії в системі вітроустановка - компресор.

Порівняння принципів схем подачі повітря показує, що використання вітрокомпресорної установки дозволяє знизити втрати енергії, що виробляється вітроустановкою на 10 %.

Додатковою перевагою безпосереднього приводу компресора від вітротурбіни є те, що при втраті навантаження (розрив трубопроводу) компресор буде працювати як гальмо.

Одним з достоїнств безпосереднього приводу компресора є зниження витрат на обладнання при виключенні декількох елементів. Відмова від зайвих агрегатів збільшує надійність системи.

2.9 Вибір компресора для спільної роботи з вітроустановкою

Компресор підбирається для спільної роботи з вітроустановкою по моментно-швидкісній характеристиці: рівності моменту на валу вітротурбіни при номінальній швидкості вітру, моменту компресора, а також рівності частот обертання компресора і вітроустановки.

На рис. 2.5 представлено застосування різних типів компресорів в залежності від тиску і продуктивності [8].

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

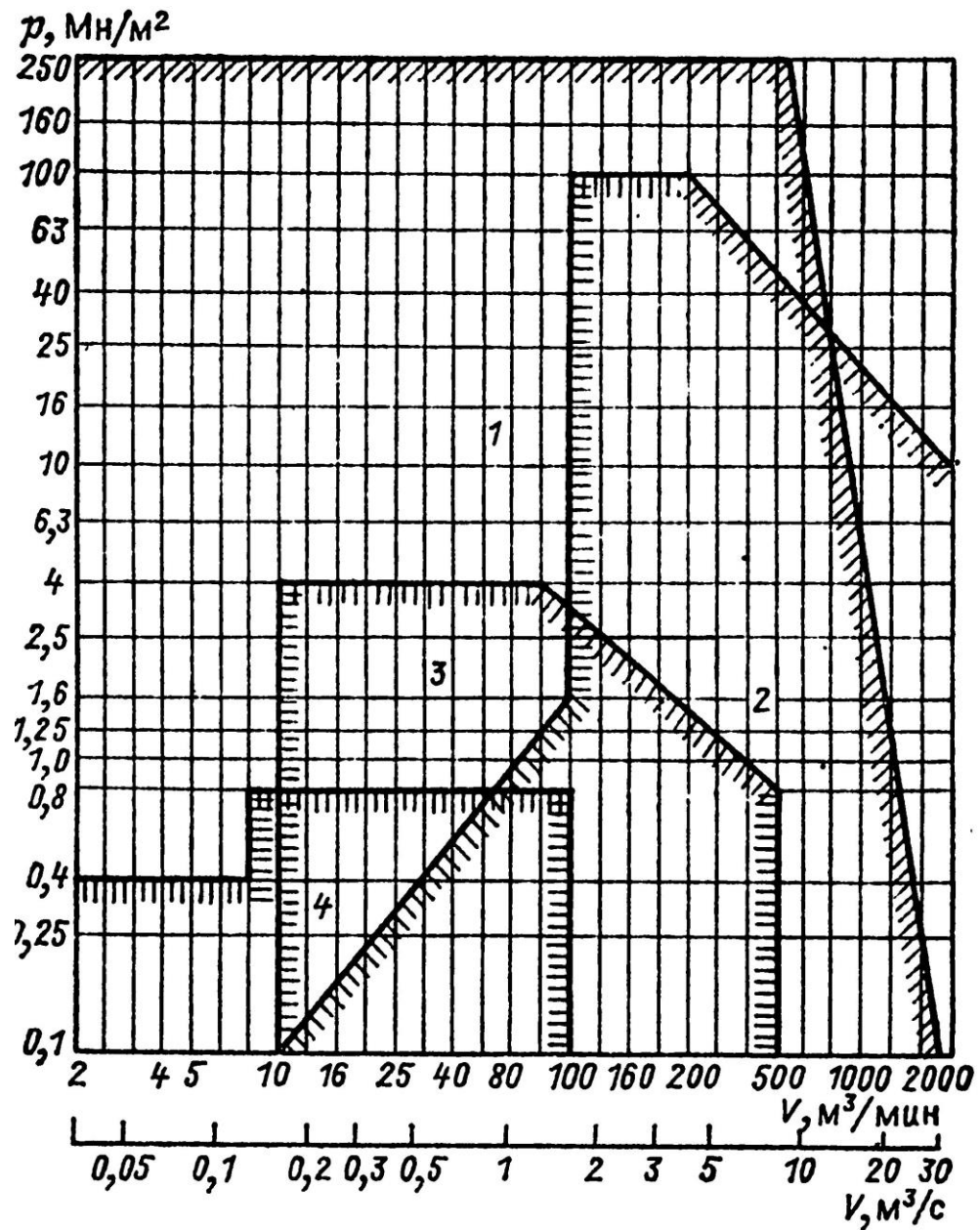


Рисунок 2.5 - Области застосування різних типів компресорів по продуктивності і тиску:

- 1 - поршневі, 2 - відцентрові;
- 3 - гвинтові, 4 - ротаційні

У табл. 2.7 [8] наведено порівняльні характеристики компресорів різних типів.

Таблиця 2.7 - Характеристики компресорного устаткування

Компресори	Тиск, МПа	Продуктивність, м ³ /хв	Діапазон потужності, кВт	Частота обертання, об/хв	Масо габаритні харак теристики	Вібрація	Переваги	Недоліки
Поршневі : одноступеневі двоступеневі багатоступеневі	до 0,7	до 100	Від 1 до 2000	Від 500 і вище	високі	висока	Найбільш економічні для подач до 100 м ³ /хв, забезпечують отримання високих тисків	Великі розміри, маса і металоємність; нерівномірність подачі; в стислому повітрі міститься масло
	до 1,0							
	Св. 1,0							
	Св. 1,0							
мембранні : одноступеневі двоступеневі багатоступеневі	до 0,4	До 1	До 10	Від 300 і вище	низькі	висока	Економічні, забезпечують отримання високих тисків	Те ж, що і у поршневих, але в повітрі НЕ міститься масло
	до 0,7							
	св 0,7							
	св 0,7							
пластинчасті : одноступеневі двоступеневі	до 0,4	2 1000	Від 1 до 1000	Від 1500 і вище	низькі	Низька при збалансованому роторі	Компактність, мала металоємність, порівняно рівномірна подача.	Низька економічність, великий знос робочих механізмів
	до 1,0							
	Дої							
	до 3,0							
Заповнені маслом	Дої	16-560	7,5-500	Від 3000 і вище	низькі	Низька при збалансованому роторі	Компактність, надійність, економічність, швидкохідність, рівномірна подача. В повітрі НЕ міститься масло (сухого стиснення і водозаповнені)	складність виготовлення
	до 3,0							
	до 1,0							
	до 1,0							
Спиральні	до 1,0	0,2 -1,5	Від 1 До 10	1500 і вище	низькі	Низька при збалансованому роторі	Високий ККД, компактність, економічність, рівномірна подача. В повітрі НЕ міститься масло	Складність виготовлення;
	до 1,0							
	до 1,0							
	до 1,0							
Центробіжні : одноступінчасті чотиріступінчасті багатоступінчасті	0,4	16 - 30000	від 1000	Від 3000 і вище	високі	Низька при збалансованому роторі	Висока надійність, швидкохідність, В повітрі НЕ міститься масло	Неекономічні для подач менш 200 м ³ /хв
	2							
	До 10							
	До 10							
осьові	До 10 (вище на замовлення)	Св. 400	від 1000	Від 10000 і вище	високі	Низька при збалансованому роторі	Висока економічність, надійність, швидкохідні. В повітрі практично НЕ міститься масло	Велика область нестійкої роботи . Некономічні для подач менш 400 м ³ / хв
	До 10							
	До 10							
	До 10							

КРБ 19-032.00.00.000ПЗ

Арк.

34

Змн.

Арк.

№ докум.

Підпис

Дата

З аналізу табл. 2.8 випливає, що машини кінетичної дії вимагають високих частот обертання валу приводу (в середньому від 10000 об/хв), що викликає необхідність застосування трансмісії з великими передавальними числами. Особливістю компресорів динамічної дії є залежність кінцевого тиску і споживаної потужності від частоти обертання його валу.

На рис. 2.6 [10] і 2.7 [10] представлені типові характеристики відцентрового і осьового компресорів.

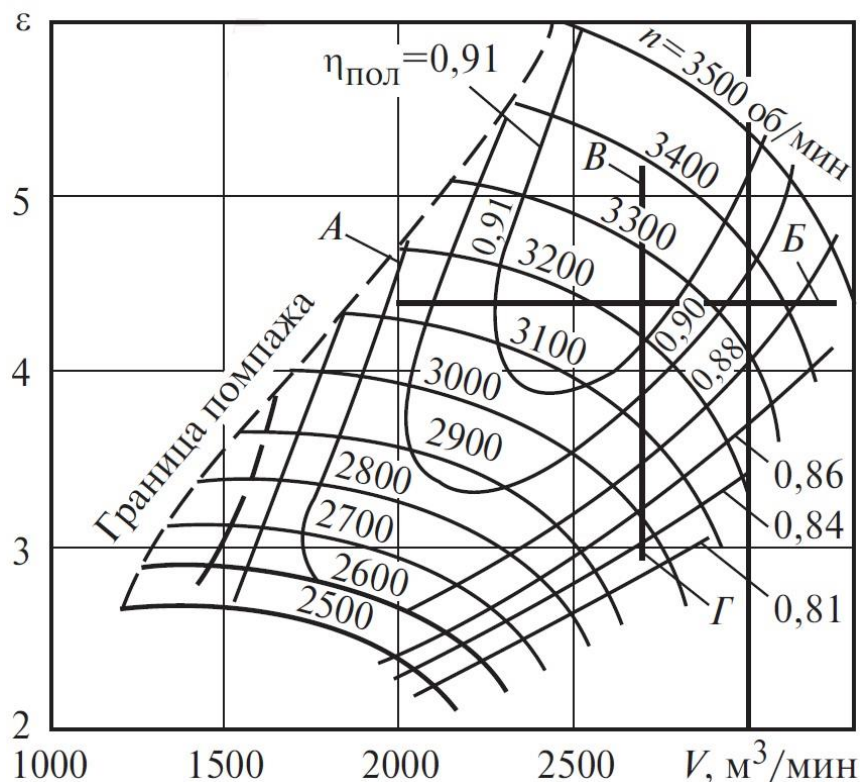


Рисунок 2.6 - Приклад характеристики відцентрового компресора (умови всмоктування 15° С, 0,10013 МПа)

Аналіз характеристик виявив, що обидва типи турбокомпресорів мають великі зони нестійкої роботи (лівіше межі помпажа), в межах якої вони не можуть виробляти стиснене повітря. Межа помпажа для кожного типу турбокомпресорів в великій мірі залежить від тиску нагнітання і частоти обертання [10].

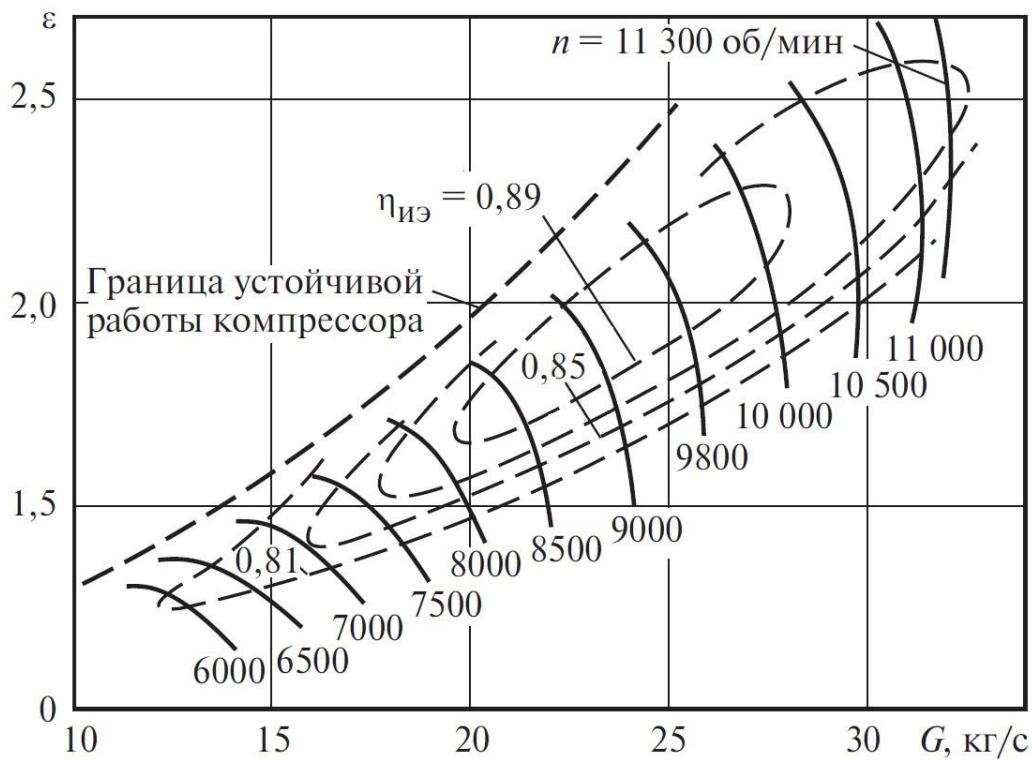


Рисунок 2.7 - Характеристика осевого компрессора (умови всмоктування 15° С, 0,1013 МПа)

З рис. 2.6 і 2.7 слідує, що зона стійкої роботи у відцентрового компрессора більша, ніж у осевого, але в обох вона порівняно мала. Так, у відцентрового компрессора, якщо не виходити із зони високих ККД (лінія АБ на рис. 2.6), зона стійкої роботи лежить в межах 65-100 % номінальної продуктивності. У випадку з осевими компрессорами (рис. 2.7) при тих же умовах - 75-100 % [10]. При низьких температурах, характерних для північних районів, межа стійкої роботи зміщується вправо.

Тому компрессори кінетичної дії за своїми характеристиками обмежені по застосуванню при спільній роботі з віротурбіною через наявність помпажних зон і високих частот обертання.

Компрессори об'ємного типу мають найбільш широкий діапазон по стійкості.

Аналіз табл. 2.7 і рис. 2.5 - 2.7 показав, що найбільш прийнятним для спільної роботи з вітроустановкою в складі вітрокомпресорного агрегату є використання компресорів об'ємної дії.

Для забезпечення спільної роботи компресора з вітротурбіною, важливим конструкційним показником є порівняно низька частота обертання валу компресорного агрегату. Частота обертання валу великих вітроустановок знаходиться в межах 50 об/хв в номінальному режимі. Для забезпечення високих частот обертання вихідного валу потрібне використання підвищених передач з великим передавальним числом. Це призводить до збільшення масогабаритних характеристик трансмісії, ускладнення її монтажу і експлуатації, подорожчання вітрокомпресорної установки в цілому.

З аналізу табл. 2.7 випливає, що в області малих потужностей - до 10 кВт - найбільш економічними, компактними агрегатами є спіральні компресори. У діапазоні від 10 до 500 кВт найбільш переважними є гвинтові машини завдяки економічності, відсутності вібрацій, низьких масогабаритних характеристик, зручній експлуатації, великому міжремонтному періоду (більше 3000 годин). При потужності приводу, більшою 500 кВт, пропонується використовувати серійні поршневі агрегати.

Пропонуються наступні діапазони компресорного устаткування для спільної роботи з вітроустановкою:

- від 1 до 10 кВт - спіральні компресори;
- від 10 до 500 кВт - гвинтові компресори;
- від 500 кВт - поршневі агрегати.

Найважливішим показником спільної роботи вітрокомпресорного блоку є зміна основних характеристик компресора (споживаної потужності, продуктивності і частоти обертання) при зміні швидкості набігаючого на вітроколесо вітрового потоку.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Гвинтові компресори мають ряд переваг перед іншими типами компресорних машин: висока надійність і довговічність у зв'язку з відсутністю деталей, що здійснюють зворотно-поступальний рух; малі габарити установки; повна врівноваженість роторів і, як наслідок, відсутність необхідності у важких фундаментах [8].

Важливою перевагою гвинтових машин в порівнянні з іншими типами компресорів є простота конструкції і висока технологічність.

На даний час велика кількість зарубіжних фірм серійно виробляють гвинтові компресори в широкому діапазоні тиску і продуктивності. Це такі підприємства, як "Kaeser", "Alup kompressoren", "Atlas Copco", "Fini" і ін.

В [11] було проведено дослідження змін показників гвинтового компресора при зміні частоти обертання його вала. Випробування проводилися при тисках нагнітання $p_n = 0,4; 0,6; 0,8$ МПа, на частотах обертання ведучого ротора $n_1 = 17; 33; 50; 67$ с⁻¹, при температурі газу, що нагнітається не більше 363 К.

Згідно [12], частота обертання знаходиться в лінійній залежності від продуктивності компресора. Експерименти показали, що частота обертання прямо пропорційна споживаній потужності в діапазоні від $0,15 \cdot P_{\text{нам}}^{\text{компр}}$ до $P_{\text{нам}}^{\text{компр}}$ [11].

2.10 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз сфер застосування стисненого повітря, його споживачів по тиску, продуктивності і показниками якості.
2. Визначено, що при використанні компресора з безпосереднім приводом від вітротурбіни, економія первинної енергії вітру становить близько 10 %.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

3. В результаті проведеного аналізу сучасного серійного компресорного устаткування, визначені діапазони застосування компресів різних типів.

4. Виявлено, що для спільної роботи з ВЕУ доцільно використовувати агрегати об'ємного дії.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Споживання і виробництво стисненого повітря

Потреба в стисненому повітрі залежить від багатьох чинників і при великій кількості пневмокористувачів, є статистичною величиною [5]. На рис. 3.1-3.3 [13] представлені типові добові графіки навантажень на компресорну станцію машинобудівного заводу, на якому основним споживачем стисненого повітря є пневмоінструменти при тризмінній (а), двозмінній (б) і однозмінній (в) роботі підприємства.

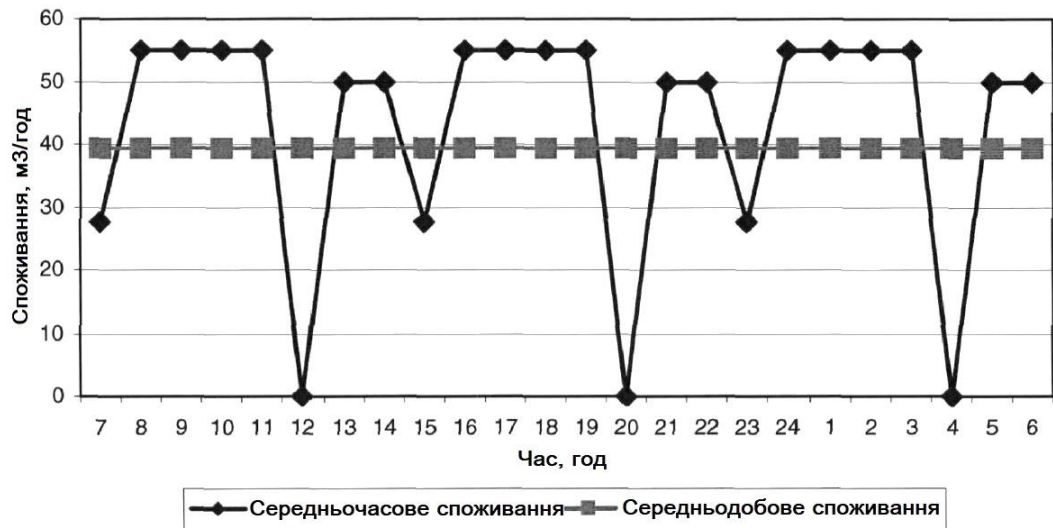


Рисунок 3.1 - Графік споживання стисненого повітря при тризмінному графіку роботи підприємства

Графік навантажень на компресорну станцію показує ступінь використання діючих компресорних установок в певному відрізку часу.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ					
Розробив	Марушка І.М.							Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Мовчан Л.Т.								40	
Консульт.	Мовчан Л.Т.							гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ		
Н. Контр.	Вакуленко О.О.									
Зав каф.	Тарасенко М.Г.									

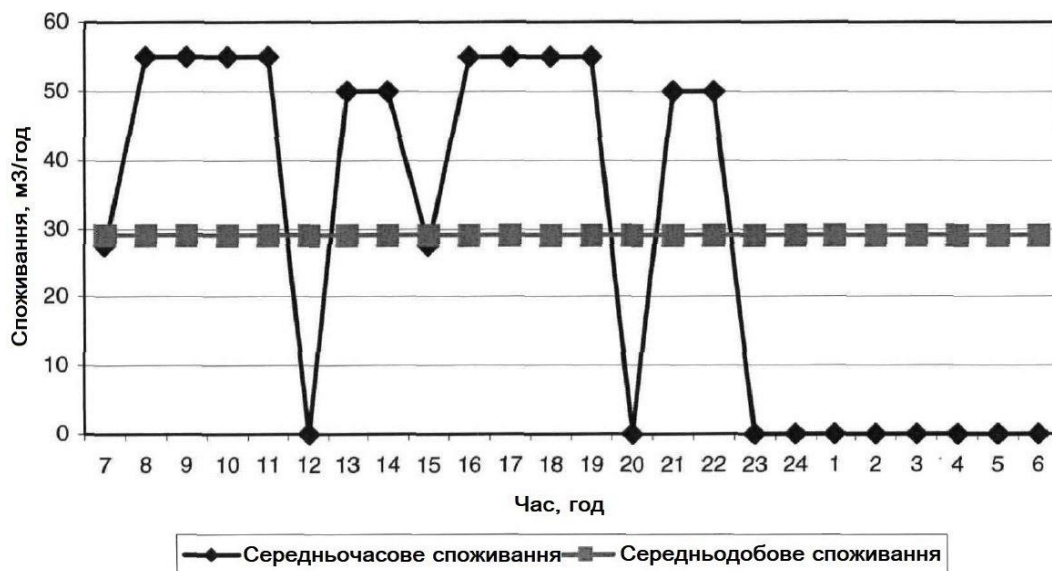


Рисунок 3.2 - Графік споживання стисненого повітря при двозмінному графіку роботи підприємства

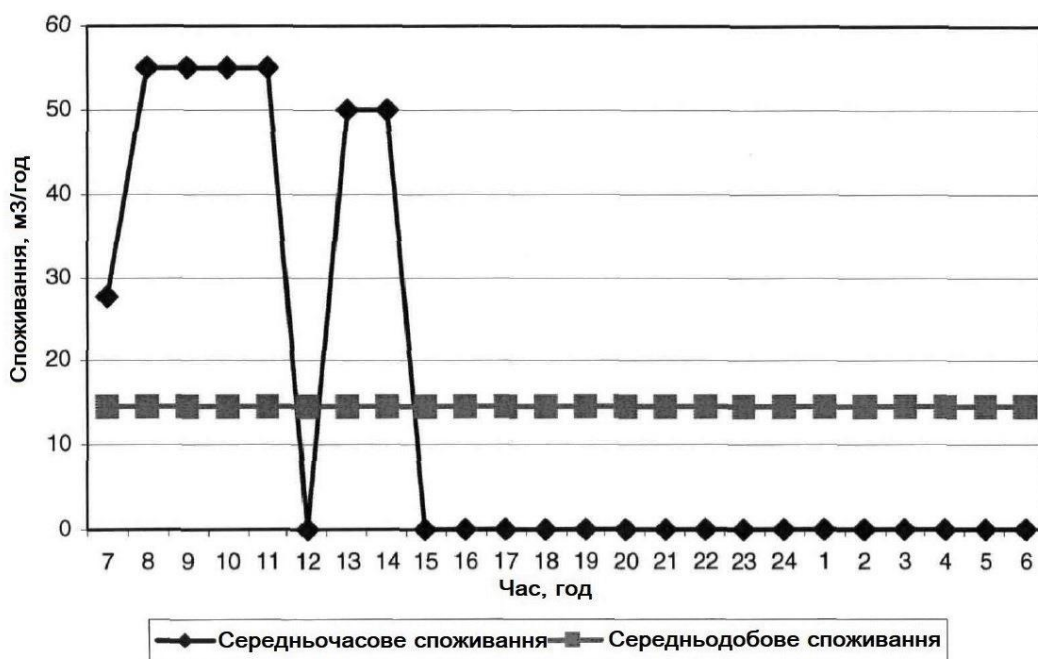
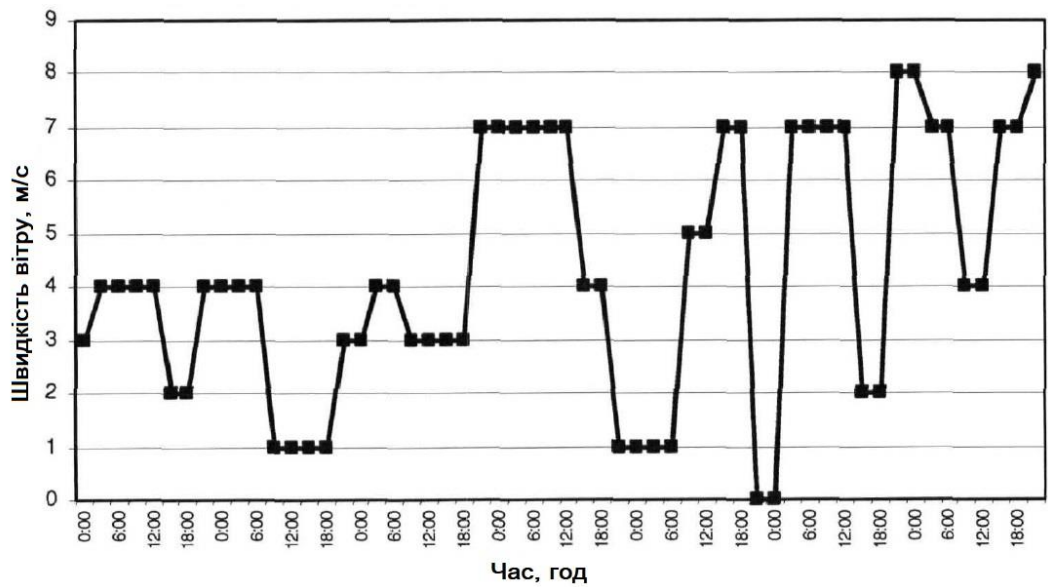
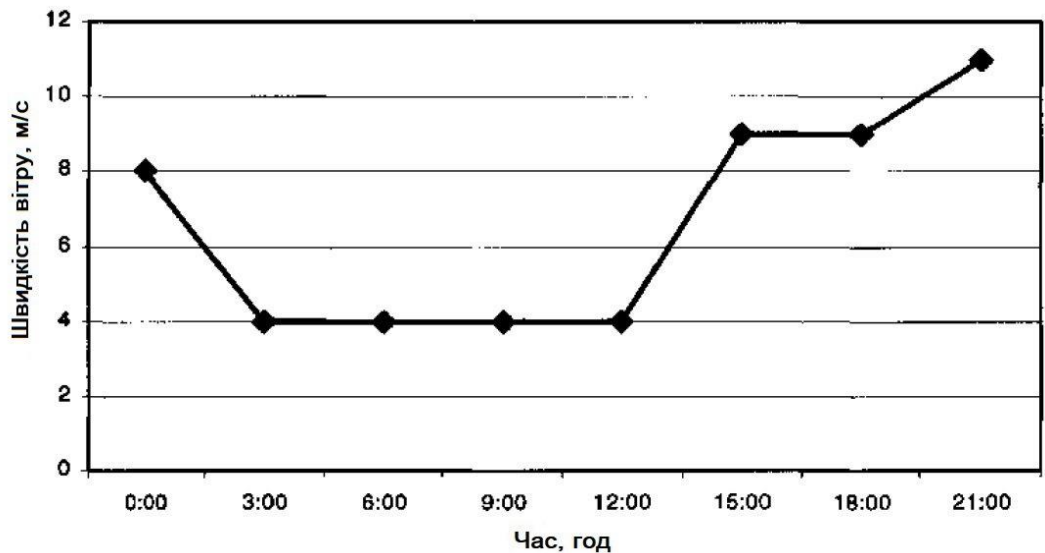


Рисунок 3.3 - Графік споживання стисненого повітря при однозмінному графіку роботи підприємства

Вітрова енергія характеризується стохастичністю і в значній мірі визначається місцевими умовами. На рис. 3.4 наведені фактичні показники швидкості вітру в залежності від тимчасового інтервалу спостереження (1-7 лютого 2019 р).



а) розподіл швидкостей вітру за тиждень



б) розподіл швидкостей вітру за добу

Рисунок 3.4 - Характер зміни швидкості вітру за тижневий і добовий періоди

У більшості тимчасових інтервалів баланс виробництва енергії від вітру і її споживання в пневмосистемі не дотримується.

Для узгодження цих графіків, використовуються наступні методи [1]:

1. Паралельна робота вітрокомпресорної установки з дизель-компресором;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 19-032.00.00.000ПЗ

Арк.

42

2. Скидання надлишків стисненого повітря в навколишнє середовище;
3. Підстроювання режиму споживання під режим генерації;
4. Акумуляування стисненого повітря.

У разі використання дизель-компресорного агрегату при паралельній роботі з вітрокомпресорною установкою, неузгодженість графіків споживання і виробництва демпфує резервне джерело енергії. Акумуляуючі пристрої потрібні для швидкого запуску резервних джерел.

При другому режимі використання енергії вітру, встановлена потужність вітротурбін перевищує потрібну потужність споживача. У таких пневмосистемах, частина енергії марно скидається в навколишнє середовище.

Режим підлаштування споживання енергії під виробництво є неприйнятним для I категорії споживачів. При енергопостачанні об'єктів житлово-комунального господарства, використання такого методу знижує комфортність, змушує обмежувати споживання енергії.

Акумуляування енергії вітру дозволяє використовувати весь потенціал вітрової енергії з мінімальними втратами і знизити витрату палива на резервних джерелах на традиційному паливі.

3.2 Типи енергоаккумуляуючих систем

Однією з проблем при використанні вітроенергетичних установок є акумуляування енергії. В даний час використовуються наступні види акумуляуючих систем:

- гідравлічні;
- пневматичні;
- інерційні;
- ємнісні (електричні);
- електрохімічні;

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- водневі.

Діапазон потужності, а також показники енергоємності та вартості наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння акумулюючих систем

Типи і види систем	Діапазон потужності, МВт	Енергоємність	Питома вартість, \$/кВт
Механічний			
Гідравлічні	0,5-3500	0,05 кВт·год/м ³	400- 1000
Пневматичні	5-500	1,5 кВт· год /м ³	500- 1200
Інерційні	0,5-60	3,5 кВт· год /м ³	400-700
Електричний			
Ємнісні	0,01-0,2	0,05кДж /кг	400- 1500
Електрохімічні	0,001-0,01	0,5 кВт· год /м ³	170 - 250
Водневі	0,001-0,1	1,5 кВт· год /м ³	450- 1500

В даний час в багатьох країнах накопичений великий досвід у використанні гідроакумуляторів в широкому діапазоні потужностей. Можливість використання гідроакумуляюючих установок залежить від сукупності факторів:

- наявність достатньої кількості водних ресурсів;
- вплив ставка-акумулятора на водний баланс місцевості;
- робота системи в зимових умовах.

Гідроакумулятори чинять негативний вплив на навколишнє середовище. Це затоплення і підтоплення вилучених земель, ліквідація лісів і т.д.

Системи з використанням електрохімічних акумуляторів широко використовуються в невеликих автономних системах енергопостачання. Параметри сучасних акумулюючих батарей представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Питома ємність хімічних акумуляторів різних типів

Тип	Марка	Питома ємність, $A \cdot год / м^3$
Срібно-цинковий	СЦП-300	146621,8
Нікель-цинковий	НЦ-125	52292,9
	НЦ-200	89974,3
Нікель-кадмійовий	НК-125	32880,9
Призматичний нікель-кадмієвий	НКГ-200	47062,4
Нікель-залізний (тяговий)	ТНЖ-300У5	29779,3
	ТНЖК-350У3	54015,7
Нікель-кадмієвий (тяговий)	ТНК-300МТ2	36981,4
	ТНК-350Т5	25098,4
	ТНК-400У5	35158,4
	ТПНК-550Т3	23217,2
Свинцевий	СК-100	11679,5
	СК-120	11830,3
	СК-148	12066,7

В даний час проводяться дослідження з використання водню в хімічних джерелах струму. Виділяють дві групи таких пристроїв: зворотно діючі акумулятори з водневим електродом і водневі електрохімічні генератори (паливні елементи). Найбільший розвиток зараз отримали паливні елементи з твердим полімерним електролітом [1].

При використанні вітрокомпресорних установок, перспективним є використання систем акумуляування стисненого повітря. Стиснене повітря на відміну від електричної енергії має велику акумуляуючу здатність і можливість вироблення енергії близько ста мегават.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Акумулятором в подібних установках служать ресивери [14], відпрацьовані шахти, підземні соляні печери. Можливе також використання в якості акумуляторів стандартних труб великого діаметра, які є транспортом, і акумулятором стисненого повітря.

У світі накопичено досвід з використання повітряних акумуляторів в промислових масштабах. Перша повітряно акумуляюча газотурбінна установка (ват), потужністю 290 МВт, була побудована поблизу м. Хунторф в 1978 р з метою виробництва електроенергії в пікових режимах, використовуючи електроенергію в періоди провалів енергосистеми за навантаженням для стиснення повітря і накопичення його в резервуарі [15]. Вироблення електроенергії відбувається на вільній газовій турбіні. Принципова схема повітряно-акумуляючої газотурбінної електростанції представлена на рис. 3.5 [15].

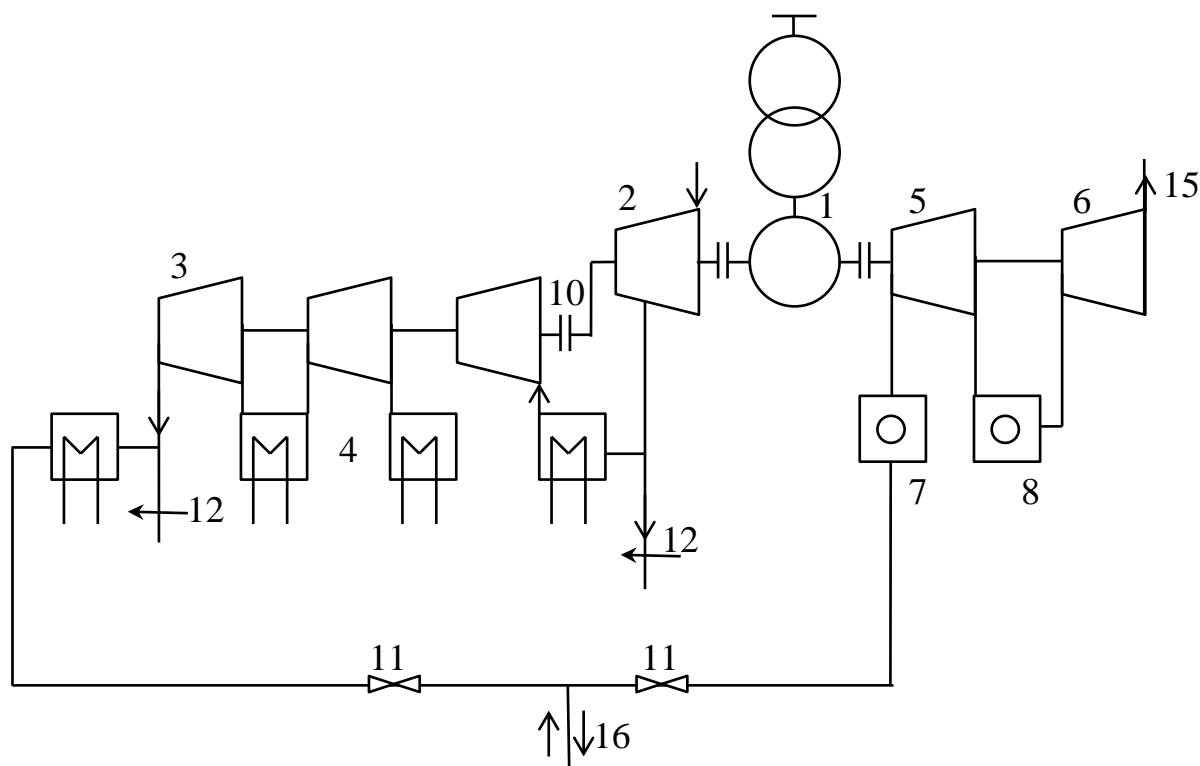


Рисунок 3.5 - Теплова схема повітряно-акумуляючої газотурбінної електростанції

Умовні позначення: 1 - електричний мотор-генератор; 2 - компресор низького тиску; 3 - компресор високого тиску; 4 - повітроохолоджувач; 5 – турбіна високого тиску; 6 - турбіна низького тиску; 7 – камера згорання високого тиску; 8 - камера згорання низького тиску; 9 - розчіпна муфта; 10 - редуктор; 11 - вентилі; 12 - скидний клапан; 13 - гази в димову трубу; 14 - повітря з акумулятора

Показники повітряно-акумуляуючої газотурбінної електростанції Хунторф наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Показники повітряно-акумуляуючої газотурбінної електростанції

> потужність турбіни	290 МВт (<3 час)
> потужність компресора	60 МВт (<12 час)
розхід повітря	
> турбіна	417 кг/с
> компресор	108 кг/с
відношення витрат	1/4
кількість резервуарів	2
об'єми резервуарів:	
1	= 140 000 м ³
2	= 170 000 м ³
Сума	= 310 000 м ³
Тиск в резервуарах	
> Мінімально допустимий	1 бар
> Мінімальний робочий (критичний)	20 бар
> Мінімальний робочий (номінал)	43 бар
> Максимальний робочий і допустимий	70 бар
Максимальна швидкість зниження тиску	15 бар/год

Друга станція була споруджена в 1991 р. в м. Макінтош, Алабама, США, потужністю 110 МВт. Капітальні витрати склали \$ 591/кВт.

На рис. 3.6 представлений графік зміни тиску стисненого повітря в резервуарі, і потужності локальної енергосистеми протягом доби.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Додатковою перевагою акумулятора стисненого повітря є можливість інтегрування джерел енергопостачання, заснованих як на традиційних, так і на поновлюваних джерелах енергії і споживачів в єдиний комплекс з виробництвом тепла, електроенергії, холоду різного потенціалу, прісної води і ряду інших енергоносіїв (рис. 3.7).

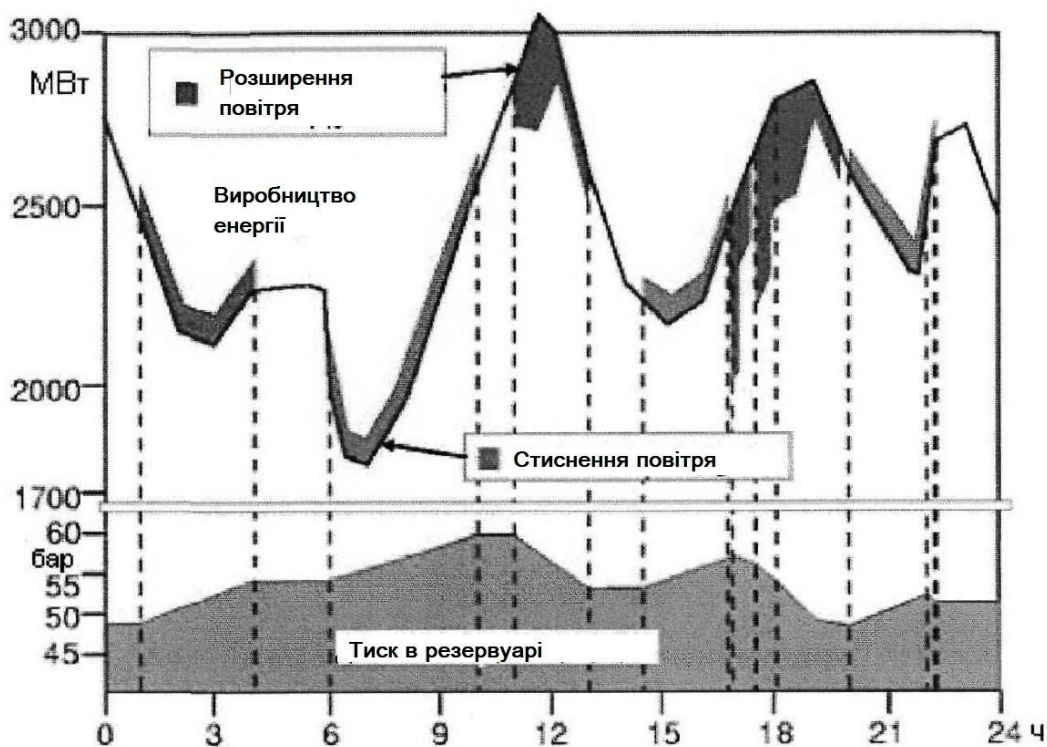


Рисунок 3.6 - Графік зміни тиску в акумуляторі і потужності енергосистеми протягом доби

3.3 Розрахунок ємності акумулятора стисненого повітря

В роботі [16] запропонована методика кількісного визначення об'єму сховищ для компенсації нерівномірності виробництва і споживання газу на базі відповідних графіків.

Графік споживання газу за час τ ділиться на k рівних частин по часу. При цьому $k = 24$, якщо йдеться про добову нерівномірність, 7 - якщо тижнева, 30 - якщо місячна, і т.д.

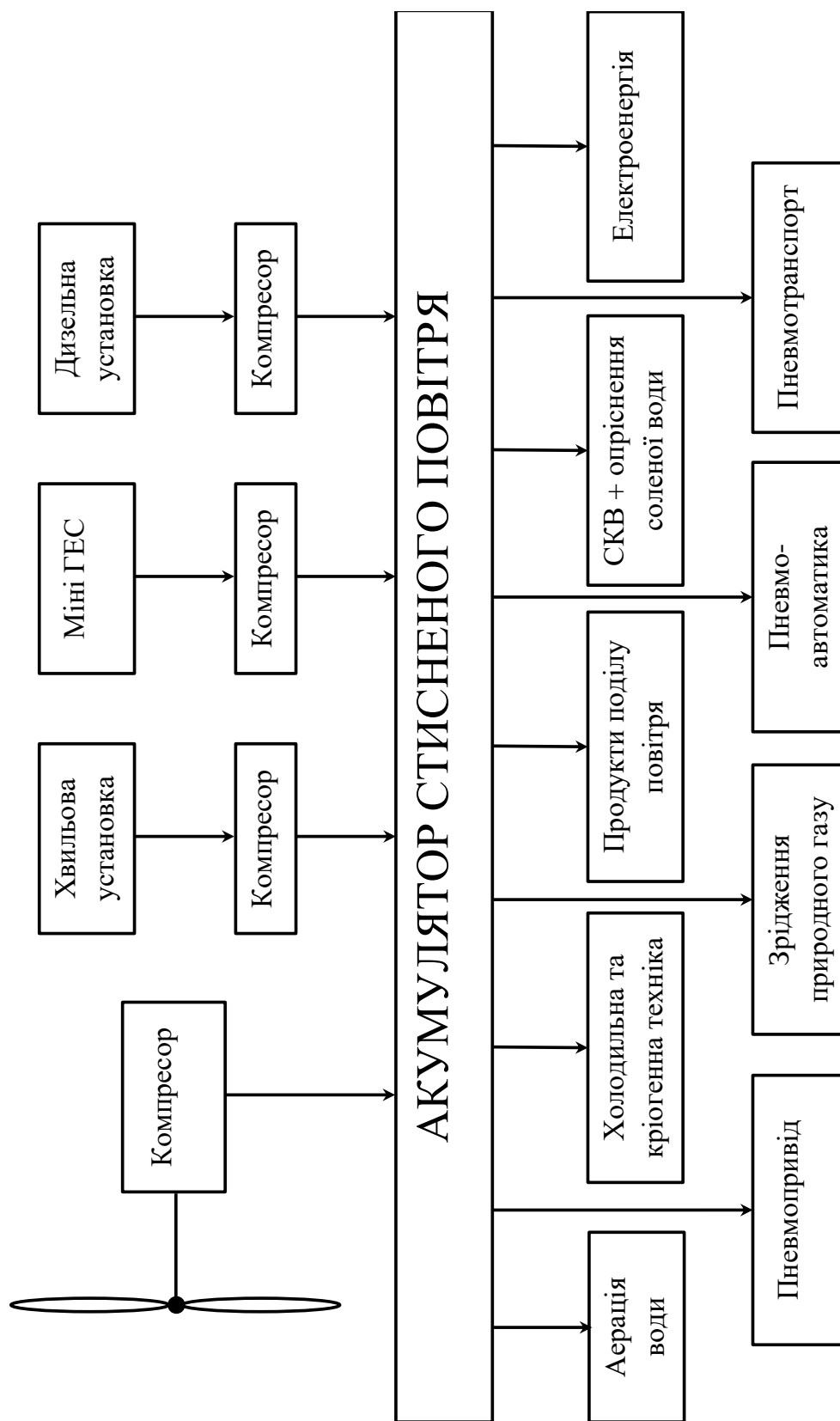


Рисунок 3.7 - Система подачі повітря різних споживачів з використанням вітрокомпресорної установки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Вона визначається часом і точністю вимірів при побудові графіка споживання газу і його виробництва. При відомих величинах подачі газу V_0 (τ) ($\text{м}^3/\text{с}$) і його споживання $V_n(\tau)$ ($\text{м}^3/\text{с}$) для кожного інтервалу часу $\Delta\tau$, $2\Delta\tau$, $3\Delta\tau$, $k\Delta\tau$ обчислюється сумарна кількість газу, тобто:

$$V_{01} = \int_0^{\Delta\tau} V_0 \tau d\tau, \text{м}^3$$

$$V_{02} = \int_0^{2\Delta\tau} V_0 \tau d\tau, \text{м}^3$$

$$V_{0k} = \int_0^{k\Delta\tau} V_0 \tau d\tau, \text{м}^3$$

$$V_{n1} = \int_0^{\Delta\tau} V_n \tau d\tau, \text{м}^3$$

$$V_{n2} = \int_0^{2\Delta\tau} V_n \tau d\tau, \text{м}^3$$

$$V_{nk} = \int_0^{n\Delta\tau} V_n \tau d\tau, \text{м}^3$$

Для повної компенсації необхідно мати такий запас газу в сховищі, який дозволив би покрити весь надлишок споживання за період.

Визначається різниця, що дорівнює кількості газу, який знаходиться в сховищі для компенсації нерівномірності:

$$\pm\Delta_1 = V_{01} - V_{n1}, \text{м}^3$$

$$\pm\Delta_2 = V_{02} - V_{n2}, \text{м}^3$$

$$\pm\Delta_n = V_{0n} - V_{nk}, \text{м}^3$$

Абсолютна сума максимальних негативного і позитивного значення за весь час τ дає об'єм акумулятора для покриття нерівномірності графіків споживання і виробництва газу, тобто:

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$V_{xp} = | - \Delta |_{\max} - | + \Delta |_{\max}, M^3 \quad (3.1)$$

Для визначення об'єму акумулятора пропонується використовувати методику [17]. Вона дозволяє обчислити необхідний об'ємакумуляуючої ємності в залежності від режиму споживання і виробництва стисненого повітря, тиску нагнітання компресора, тиску споживача з урахуванням впливу нагрівання та охолодження стисненого повітря при його стисненні і розширенні. Акумулятори, як правило, працюють в одному з наступних режимів:

1. Тривале зберігання стисненого повітря з разовою видачею всього запасу його під необхідним тиском. При цьому стиснене повітря, що знаходиться в акумуляторі під максимальним тиском, приймає температуру навколишнього середовища. Після видачі всього запасу стисненого повітря тиск повітря - знижується. Так як час видачі стисненого повітря зазвичай недовгий, прийнято, що температура залишку стисненого повітря в акумуляторі відповідає кінцю процесу адіабатичного розширення.

2. Циклічне наповнення акумулятора до максимального і спорожнення до мінімального тиску при безперервно протікаючому процесі. Стиснене повітря при наповненні акумулятора нагрівається до температури, що відповідає максимальному тиску, а під час спорожнення - охолоджується до температури на вході в акумулятор (за умови адіабатичного стиснення і розширення).

3. Частина корисної ємності акумулятора зайнята збереженим запасом стисненого повітря, а інша частина безперервно циклічно заповнюється і спорожняється. В цьому випадку поєднуються перший і другий режими. Запас стисненого повітря зберігається не при максимальному тиску, як при першому режимі, а при проміжному тиску (між максимальним і мінімальним). Циклічне спорожнення відбувається не до мінімального, а до проміжного тиску.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Прийняті позначення:

Необхідний запас стисненого повітря,

м^3 (+ 20 ° С і 760 мм рт. ст.)

$V_{\text{зап}}$

Необхідний об'єм стисненого повітря

для згладжування нерівномірності

споживання, м^3 (+ 20° С і 760 мм рт.

ст.)

$V_{\text{роб}}$

Повна корисне ємність акумулятора,

м^3

$V_n = V_{\text{зап}} + V_{\text{роб}}$

Коефіцієнт використання об'єму

$K_v = V_{\text{роб}} / V_n$

Необхідна гідравлічна ємність

акумулятора, м^3

W

Мінімальний абсолютний тиск

стисненого повітря в акумуляторі, атм

P_{min}

Максимальний абсолютний тиск

стисненого повітря в акумуляторі, атм

P_{max}

Максимальний ступінь стиснення.

$\varepsilon = P_{\text{max}} / P_{\text{min}}$

Абсолютний тиск, відповідний

повному значенню $V_{\text{зап}}$, атм

$P_{\text{раб}}$

Робоча ступінь стиснення

$\varepsilon_l = P_{\text{раб}} / P_{\text{min}}$

Температура стисненого повітря, К

При P_{max}

T_{max}

При P_{min}

T_{min}

При $P_{\text{раб}}$

$T_{\text{роб}}$

На вході в акумулятор

T_k

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Температурний поправочний

коефіцієнт

K_t

Перший режим:

$$V_n = V_{\text{зап}}; V_{\text{раб}} = 0; K_v = 0; P_{\text{раб}} = P_{\text{max}}; T_{\text{max}} = T_k;$$

$$W = \frac{V_{\text{зап}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot K_t$$

де

$$K_t = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{284 \cdot \left(\frac{P_{\text{max}}}{T_{\text{max}}} - \frac{P_{\text{min}}}{T_{\text{min}}} \right)};$$

При адиабатичному розширенні і показнику адиабати $k = 1,4$:

$$T_{\text{min}} = \frac{T_{\text{max}}}{\varepsilon^{0,286}}; W = \frac{V_{\text{зап}} + V_{\text{роб}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot K_t; W = \frac{V_{\text{зап}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot K_t; \quad (3.2)$$

Другий режим:

$$V_n = V_{\text{раб}}; V_{\text{зап}} = 0; K_v = 1; P_{\text{раб}} = P_{\text{min}}; T_{\text{min}} = T_k; T_{\text{max}} = T_k \cdot \varepsilon^{0,286};$$

$$K_t = \frac{T_k \cdot \varepsilon - 1}{284 \cdot \varepsilon^{0,714} - 1}; W = \frac{V}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot K_t. \quad (3.3)$$

Третій режим:

$$V_n = V_{\text{роб}} + V_{\text{зап}}; K_v = \frac{V_{\text{раб}}}{V}; T_{\text{роб}} = T_k; T_{\text{min}} = \frac{T_k}{\varepsilon^{0,286}};$$

$$K_t = \frac{T_k \cdot 1 - K_v \cdot \varepsilon - 1}{284 \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_1^{0,286}}; \varepsilon_1^{0,714} = \varepsilon^{0,714} \cdot 1 - K_v + K_v;$$

$$W = \frac{V_{\text{зап}} + V_{\text{роб}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \cdot K_t \quad (3.4)$$

Значення K_v і $\varepsilon_1 = P_{\text{роб}}/P_{\text{min}}$ наведені в таблиці 3.4.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Величина $1/W$ - показує скільки стисненого повітря (m^3) з необхідним тиском можна отримати з акумулятора, ємністю W , m^3 .

Таблиця 3.4 - Значення $\varepsilon_1 = P_{роб}/P_{min}$ в залежності від K_v і $\varepsilon = P_{max}/P_{min}$

$\varepsilon =$ $P_{max}/$ P_{min}	ε_1 при значенні K_v								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,1	1,09	1,08	1,06	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01	1,01
1,2	1,19	1,14	1,14	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,01
1,3	1,28	1,25	1,21	1,19	1,16	1,13	1,09	1,06	1,03
1,4	1,35	1,32	1,27	1,23	1,20	1,16	1,12	1,07	1,04
1,5	1,46	1,40	1,35	1,29	1,25	1,20	1,14	1,10	1,04
1,6	1,54	1,48	1,41	1,36	1,29	1,23	1,17	1,12	1,06
1,7	1,61	1,52	1,46	1,38	1,32	1,26	1,19	1,13	1,06
1,8	1,71	1,67	1,52	1,46	1,39	1,31	1,22	1,15	1,07
1,9	1,80	1,70	1,61	1,52	1,43	1,34	1,25	1,17	1,08
2,0	1,90	1,79	1,67	1,57	1,48	1,38	1,28	1,19	1,08
2,2	2,07	1,95	1,81	1,70	1,57	1,42	1,34	1,22	1,11
2,4	2,27	2,10	1,95	1,79	1,67	1,52	1,38	1,25	1,13
2,6	2,42	2,27	2,08	1,92	1,75	1,58	1,43	1,29	1,14
2,8	2,59	2,41	2,20	2,02	1,84	1,65	1,47	1,32	1,16
3,0	2,78	2,55	2,32	2,13	1,92	1,73	1,54	1,35	1,17
4,0	3,59	3,33	2,90	2,68	2,37	2,07	1,79	1,51	1,25
5,0	4,53	4,10	3,62	3,22	2,80	2,41	2,02	1,65	1,32
6,0	5,50	4,70	4,34	3,80	3,26	2,77	2,12	1,78	1,40
7,0	6,27	5,54	4,87	4,23	3,61	3,03	2,45	1,93	1,44
8,0	7,35	6,77	5,63	4,90	4,14	3,41	2,74	2,10	1,52
9,0	8,03	7,08	6,12	5,28	4,44	3,66	2,91	2,21	1,57

Продовження таблиці 3.4

10,0	8,87	7,80	6,75	5,77	4,86	3,96	3,13	2,33	1,63
20,0	18,15	16,40	13,80	11,33	9,25	7,24	5,40	3,72	2,24
30,0	29,10	22,15	19,00	16,00	12,80	9,95	6,48	4,99	2,70
40,0	34,40	29,90	25,20	20,80	16,60	12,70	9,20	5,95	3,20
50,0	43,90	37,50	31,60	26,30	20,80	15,80	11,20	7,18	3,70
60,0	52,00	44,60	37,50	30,20	24,50	18,55	13,50	8,22	4,15
70,0	60,30	52,00	43,10	35,50	28,20	21,25	14,90	9,35	4,57
80,0	71,50	61,00	51,20	41,70	34,70	24,80	17,40	10,70	5,15
90,0	77,50	66,80	56,00	45,70	36,30	27,10	18,80	11,60	5,50
100,0	86,00	74,30	62,50	51,20	40,20	30,00	21,00	12,70	5,97

При зменшенні швидкості вітру, в певний проміжок часу подача повітря в акумулятор знижується і тиск буде падати при збереженні темпів споживання. Зниження споживання стисненого повітря пневмоприймачів і одночасне збільшення за швидкістю вітру приведе до збільшення тиску стисненого повітря в акумуляторі. Тому тиск в акумуляторі буде падати не до мінімального, а до проміжного значення.

Виходячи з особливостей даної системи, коли подача стисненого повітря безпосередньо залежить від швидкості вітру в кожен момент часу, ємність акумулятора розраховується для третього варіанту, коли ємність безперервно заповнюється і спорожняється, і стиснене повітря зберігається при проміжному тиску. За описаною методикою проведено розрахунки для $P_{\min} = 5$ і 10 атм і тисків $P_{\max} = 13$ і 20 атм.

У методиці [17] визначено кількість стисненого повітря (m^3) з тиском споживача, як забезпечує $1 m^3$ об'єму акумулятора. За результатами виконаного розрахунку, побудований графік залежності кількості одержуваного повітря з заданим тиском в залежності від вихідного тиску компресора (рис.3.8).

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

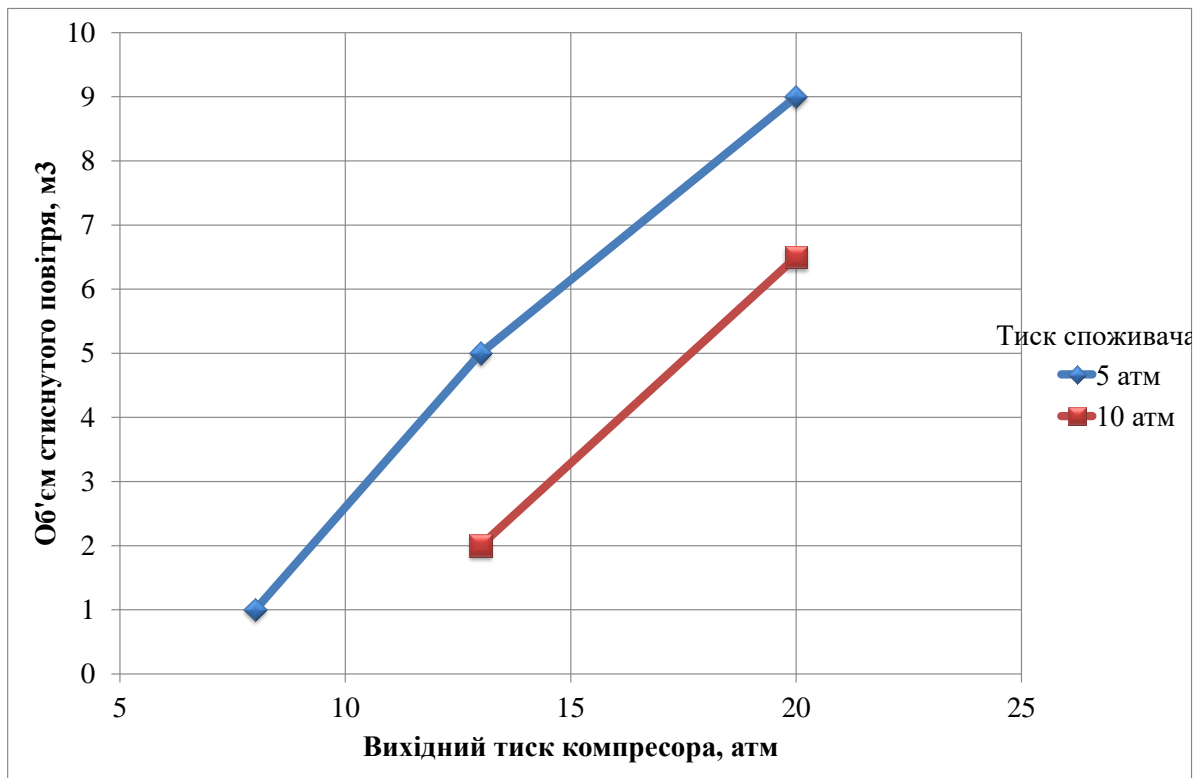


Рисунок 3.8 - Залежність питомої ємності акумулятора від тиску компресора на нагнітанні

Гідравлічна ємність показує, який об'єм акумулятора необхідний для отримання необхідної кількості стисненого повітря з тиском. Розрахунки показують, що при збільшенні тиску на нагнітанні компресора, зменшується необхідний об'єм акумулятора, що робить систему більш компактною. Залежно від потрібного об'єму акумулятора, параметрів генеруючих джерел, типу і доступного об'єму пневмосистеми, а також економічних показників, підбирається підсумкова ємність повітряного акумулятора.

3.4 Робота повітряного акумулятора в залежності від режимів споживання/генерації енергії

Проведено аналіз зміни тиску в повітряному акумуляторі на різних режимах споживання і виробництва стисненого повітря.

Розрахунок будеється на основі класичних рівнянь термодинаміки.
Рівняння Менделєєва - Клапейрона:

$$q = \frac{n-k}{k-1} l_{пол} pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (3.5)$$

де p - тиск повітря, Па;

V - об'єм повітря, м³;

m - маса повітря, кг;

R - універсальна газова стала $R = 8314$ Дж / (кмоль' К);

μ - молекулярна маса речовини, кг/кмоль (для повітря $\mu = 29$);

T - температура, К.

Розрахунок проведено для стандартних умов: $T = 288$ К.

Згідно [8] при стисненні повітря і його складових (азот, аргон, водень, гелій і ін.) в області тисків до 10 МПа і температур понад 273 К застосування рівняння (3.5) дає похибку не більше 2 %.

Після диференціювання рівняння Менделєєва - Клапейрона за часом:

$$\frac{\partial pV}{\partial \tau} = \frac{\partial \left(\frac{m}{\mu} RT \right)}{\partial \tau} \quad (3.6)$$

Об'єм акумулятора не змінюється в часі. Температура стисненого повітря за часом не змінюється, тому:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\partial m}{\partial \tau} \left(\frac{RT}{\mu V} \right) \quad (3.7)$$

де $\frac{\partial m}{\partial \tau}$ - витрата повітря, кг/с.

За результатами розрахунку побудований графік зміни тиску за часом у залежності від режимів споживання/генерації стисненого повітря, який представлений на рис. 3.9.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

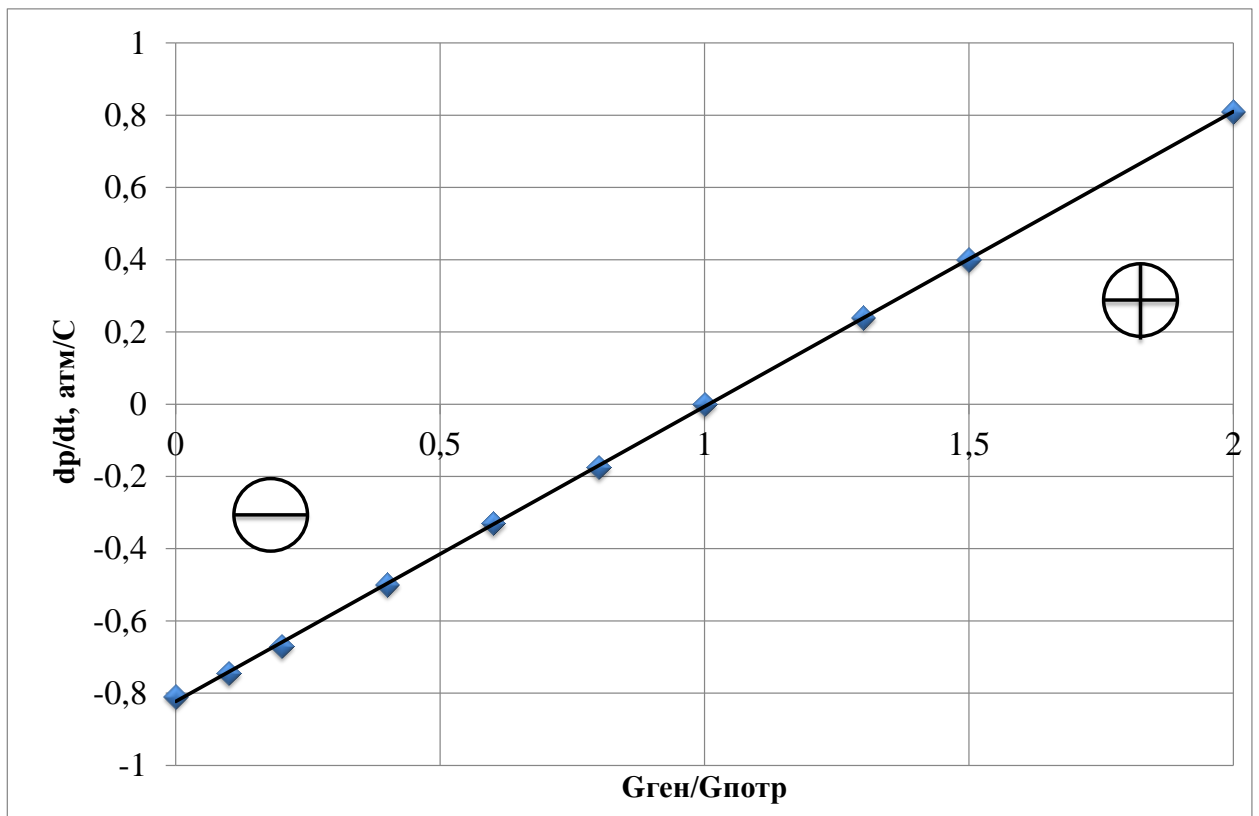


Рисунок 3.9 - Зміна тиску в різних режимах. $V_{акк} = 1 \text{ м}^3$.

Графік показує, що зростання і падіння тиску в акумуляторі носить лінійний характер в залежності від режиму споживання/виробництва стисненого повітря.

3.5 Висновки до розділу

- У даному розділі розглянуті існуючі способи акумулювання енергії вітру. При використанні вітрокомпресорних установок пропонуються пневмосистеми, які використовують в якості енергоносія стиснене повітря. В якості акумуляторів стисненого повітря застосовуються резервуари, підземні порожнини, труби великого діаметру.

2. Проведено аналіз існуючих методик розрахунку акумулюючих ємностей. Визначено, що вибрана методика може служити основою для інженерних розрахунків.
3. Проведено аналіз зміни тиску в акумулюючій ємності при різних режимах генерації/споживання стисненого повітря. Показано, що зростання або падіння тиску в акумуляторі лінійно залежить від відношення масової витрати прихідного повітря і витрати стисненого повітря.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ

4.1 Блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга — 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок [18].

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Марушка І.М.</i>						60	
<i>Перевірів</i>	<i>Мовчан Л.Т.</i>							
<i>Консульт.</i>	<i>Гурик О.Я.</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Вакуленко О.О.</i>							
<i>Зав каф.</i>	<i>Тарасенко М.Г.</i>					<i>зр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ</i>		

людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнених металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжуються появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій (трубопроводів, електропроводів і т. п.) електрорушійну силу (ЕРС).

У замкнених контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металоконструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості [19].

Таблиця 4.1 - Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіонах (областях) України

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності, год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40—60
2	Закарпатська, Запорізька, Донецька	80—100
3	Інші області України	60—80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

Таблиця 4.2 - Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км² поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км ² поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1%, а в смертельному - біля 15-20%. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30%.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групи з електробезпеки [18,19].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

– людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

– струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

– електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробіі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

– розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз виробництва різних енергоносіїв на базі вітроенергетичної установки. Також проаналізовано варіант акумулювання енергії шляхом використання стисненого повітря.
2. Встановлено, що при використанні компресора з безпосереднім приводом від віротурбіни, економія первинної енергії вітру становить близько 10 %.
3. Виявлено, що для спільної роботи з ВЕУ доцільно використовувати агрегати об'ємного дії.
4. Запропоновано використання стисненого повітря як єдиного носія для комплексного постачання споживача теплом, електроенергією, стисненим повітрям, холодом різного потенціалу і т.д. Запропонована пневмосистема об'єднує різні генеруючі джерела як традиційного, так і нетрадиційного типу. За допомогою єдиної пневмомережі, стиснене повітря транспортується різним споживачам, виконуючи при цьому і функцію акумулятора.
5. Проведено аналіз зміни тиску в акумулюючій ємності при різних режимах генерації/споживання стисненого повітря. Показано, що зростання або падіння тиску в акумуляторі лінійно залежить від відношення масової витрати прихідного повітря і витрати стисненого повітря.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Марушка І.М.</i>						66	
<i>Перевірів</i>	<i>Мовчан Л.Т.</i>							
<i>Консульт.</i>	<i>Мовчан Л.Т.</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Вакуленко О.О.</i>							
<i>Зав каф.</i>	<i>Тарасенко М.Г.</i>				гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ			

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра, М.: Энергоатомиздат, 1988. – 185 с.
2. Джалилов Р.А. Режимы параллельной работы ветроэнергетических и дизельных агрегатов и мероприятия по их обеспечению Автореферат дисс. ... канд. техн. наук, 1991.
3. Шевченко В.В. Особенности работы и режимы передвижных ветроэнергетических установок / Сборник тезисов докладов XLIV научно-практической конференции научно-педагогических работников, ученых, аспирантов и сотрудников академии (17-20 декабря 2010 г.), часть 1, секция «Электроэнергетики». –Харьков: УИПА, Энергетический факультет, 2010. -С. 22-23
4. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух. 2-е изд., перераб. и доп. — Екатеринбург: УрО РАН, 2007. — 511 с.
5. <http://www.electrosfera.com>
6. Пневматические устройства и системы в машиностроении. Справочник. — Под общ. редакцией Е.В. Герц. — М.: Машиностроение, 1981. — 408 с.
7. ДСТУ 4169:2003 Стиснене повітря. Частина 1. Забруднювачі та класи чистоти (ISO 8573-1:2001, MOD).
8. Михайлов, А.К. Компрессорные машины: Учебник для вузов /. А.К. Михайлов, В.П. Ворошилов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. – 290 с.
9. Системы охлаждения компрессорных установок/Берман Я. А., Маньковский О. Н., Марр Ю. Н., Рафалович А. П. – Л.: Машиностроение,. 1984. – 228 с.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ					
<i>Розробив</i>	<i>Марушка І.М.</i>							<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірів</i>	<i>Мовчан Л.Т.</i>								67	
<i>Консульт.</i>	<i>Мовчан Л.Т.</i>							гр.ЕТс-41, ФПТ, ТНТУ		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Вакуленко О.О.</i>									
<i>Зав каф.</i>	<i>Тарасенко М.Г.</i>									

10. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий : [Учеб. пособие для вузов по спец. "Пром. теплоэнергетика"] / Б. В. Сазанов, В. И. Ситас. - М. : Энергоатомиздат, 1990. - 302 с.
11. Хисамеев, И.Г. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры. теория, расчет и проектирование / И.Г.Хисамеев, В.А.Максимов // - Казань, «ФЭН». -2000. - 638 с.
12. Сакун И.А. Винтовые компрессоры: Основы теории, методы расчета, конструкции. – М.; Л.: Машиностроение, 1970. 400 с.
13. Тверской, А.К. Системы производства и распределения сжатого воздуха промышленных предприятий. Учебное пособие. [Текст]/ А.К. Тверской - Саратов. СПИ. 1989.-58с.: ил.
14. Бережковский М. И. Газгольдеры / М. И. Бережковский. - М. : Химия, 1985. - 109 с.
15. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г., Богов И.А., и др. Стационарные газотурбинные установки: Справочник. Л., Машиностроение 1989 г. - 543 с.
16. Газовые сети и газохранилища: [учебник для вузов] / С. А. Бобровский, Е. И. Яковлев. - Москва : Недра, 1980. - 412 с.
17. Кислород: Справочник - Часть 1 Автор: Глизманенко Д.Л. (ред.)
Издательство: М.: Металлургия, 1967г. -422 с.
18. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.
19. Купчик М.П., Гандзюк М.П., Степанець І Ф, Вендичанський В.Н., Литвиненко А.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. - К.: Основа, 2000. - 416 с.

					КРБ 19-032.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68