


Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕТЕМ

/Андрій МУХА/
(підпис)

Дата 25.12.2023

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Аналіз використання частотно-регульованого приводу в компресорних установках»
за освітньою програмою: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент
групи «ЕЕ2221»

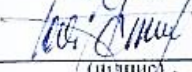


(підпис студента)

/Вадим ГРЕЧУХА/

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:



(підпис)

/доц. Дмитро УСТИМЕНКО/

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:



(підпис)

/доц. Оксана КАРЗОВА/

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

(назва розділу)

(підпис)

// _____
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

// _____
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

// _____
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

// _____
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

Дніпро – 2023 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty «Management of energy and economic processes»
Department «Electrical engineering and electromechanics»

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: «Analysis of the use of frequency-regulated drive in compressor installations»

according to educational curriculum «Energy and electromechanical systems in transport»

in the Speciality: «141 Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics»

Done by the student of the group EE2221:  /Vadym HRECHUKHA/

Scientific Supervisor:  /Dmytro USTYMENKO/

Normative controller:  /Oksana KARZOVA/

Supervisors

_____	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
_____	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
_____	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)
_____	//
(Chapter title heading)	(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»

Кафедра: «Електротехніка та електромеханіка»

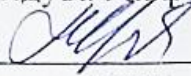
Рівень вищої освіти: магістр

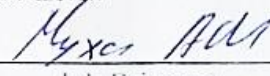
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

Спеціальність: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри «ЕТЕМ»


(підпис)


(Ім'я Прізвище)

« 01 » 06 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
студенту Гречуха Вадим Миколайович

1. Тема роботи: «Аналіз використання частотно-регульованого приводу в компресорних установках»

Керівник роботи: Устименко Дмитро Володимирович, доцент
затвержені наказом № 56 ст від 18.01.2023

2. Строк подання студентом роботи: 04.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Технологічний процес стиснення повітря

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації зі вказаного питання. Класифікація компресорів, їх основні схеми та способи регулювання продуктивності. Енергоефективність в системах стисненого повітря.

4.2 Основна частина: Визначення напрямків ефективного використання електричної енергії електроприводами загальнопромислових компресорних установок. Оцінка енергоефективності застосування частотно-регульованого електроприводу компресорної установки при регулюванні її продуктивності у порівнянні з методами, що базуються на зміні параметрів мережі (байпас, дроселювання).

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: Вимоги охорони праці при експлуатації компресорних установок.

4.4 Економічна частина: –

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1. Загальна інформація про компресорні установки (класифікація по конструкції, схемам увімкнення). Основні підходи до регулювання продуктивності та тиску загальнопромислових компресорних установок;
 2. Енергоефективність в системах стисненого повітря (на прикладі ЄС);
 3. Можливості засобів електроприводу по підвищенню енергоефективності компресорної установки;
 4. Порівняльна оцінка енергоефективності застосування частотно-регульованого електроприводу компресорної установки.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Аналіз літературних джерел та нормативної документації зі вказаного питання.	13.11.2023	10%
2	Класифікація компресорів, їх основні схеми та способи регулювання продуктивності. Енергоефективність в системах стисненого повітря.	17.11.2023	15%
3	Визначення напрямків ефективного використання електричної енергії електроприводами загальнопромислових компресорних установок.	22.11.2023	25%
4	Оцінка енергоефективності застосування частотно-регульованого електроприводу компресорної установки при регулюванні її продуктивності у порівнянні з методами, що базуються на зміні параметрів мережі (байпас, дроселювання).	28.11.2023	35%
5	Вимоги охорони праці при експлуатації компресорних установок.	30.11.2023	10%
6	Загальні висновки та додатки.	03.12.2023	5%
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	04.12.2023	-
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	18.12.-31.12.2023	-

Студент



(підпис)

Вадим ГРЕЧУХА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи



(підпис)

доц. Дмитро УСТИМЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кільк. арк.	№ екз.	Прим
1			<u>Документація загальна</u>			
2			Заново розроблена			
3	A4	7.141.220220.ПЗ	Пояснювальна записка	66		
4			Запозичена			
5			<u>Графічна частина</u>			
6			Заново розроблена			
7	A4	7.141.220220.01	Особливості промислових	1		
8			систем стисненого повітря,			
9			основні типи компресорів			
10			та області їх застосування			
11	A4	7.141.220220.02	Напрямки ефективного	1		
12			використання електроенергії			
13			ЕП загальнопромислових			
14			компресорних установок			
15	A4	7.141.220220.03-04	Порівняльна оцінка	2		
16			енергоєфективності			
17			різних способів			
18			регулювання продуктивності			
19			гвинтового компресора			
20						
21						
22			Запозичена			
23			<u>Електронна частина</u>			
24						

					7.141.220220.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної роботи	Стал.	Аркуш	Аркушів
Розробив		Гречуха В.М.		26.11			5	
Осн. керів.		Устименко Д.В.		08.11				
Консуьлт.								
Н. контр.		Карцова О.О.		11.12				
Зав. кафедр.		Муха А.М.		11.12				
						МОН України, УДУНТ Кафедра «БТЕМ» Група ББ2221		

РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Аналіз використання частотно-регульованого приводу в компресорних установках» складається з 4 розділів та містить: 66 сторінок основного тексту, 10 таблиць, 19 рисунків, 20 літературних джерел, додаток.

Мета роботи – визначення ступеня енергоефективності систем стисненого повітря та умов її досягнення при використанні частотно-регульованого приводу в компресорних установках.

В розділі 1 проаналізовано особливості промислових систем стисненого повітря, встановлені основні типи компресорів та області їх застосування, вивчений досвід експлуатації таких систем в Європейському Союзі.

Розділ 2 присвячений визначенню напрямків ефективного використання електричної енергії електроприводами загальнопромислових компресорних установок. Основними з яких є використання енергоефективних електродвигунів, регулювання швидкості компресора та побудова централізованих систем керування з підбором відповідної технологічному процесу стратегії керування.

В розділі 3 проведена порівняльна оцінка енергоефективності найбільш розповсюджених способів регулювання продуктивності гвинтового компресору: перепусканням з нагнітання на всмоктування; переведенням компресора на режим холостого ходу; зміною частоти обертання ведучого валу гвинтового компресора. Встановлено, що при зміні відносного споживання стисненого повітря в діапазоні від 0,31 до 1,0 перший спосіб не забезпечує зниження споживаної потужності, другий спосіб дозволяє знизити добове споживання електричної енергії на 18,21% в порівнянні з першим способом і третій спосіб здатен забезпечити найвищу енергетичну ефективність – добове споживання електричної енергії на 32,3% менше в порівнянні з першим способом та на 17,3% в порівнянні з другим способом.

Також показано, що значень відносного споживання стисненого повітря вище 0,9 енергоефективність методу регулювання зміною частоти обертання компресора найнижча з усіх трьох варіантів. Це пояснюється використанням у складі

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

регульованого електропривода додаткового електронного регулятора (перетворювача частоти) який має власний ККД, що і призводить до погіршення енергетичних показників при повній продуктивності компресора (або близькій до повної).

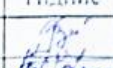
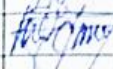
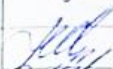

Розділ 4 містить інформацію про безпеку персоналу та обладнання систем під тиском та особливості європейського законодавства в цій сфері.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМПРЕСОР, БАЙПАС, РЕСИВЕР, СТИСНЕНЕ ПОВІТРЯ, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД, ХОЛОСТИЙ ХІД, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПОТУЖНІСТЬ

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	13
1.1 Загальна характеристика систем стисненого повітря	13
1.2 Класифікація компресорів, їх основні схеми та способи регулювання продуктивності.....	15
1.3 Енергоефективність в системах стисненого повітря.....	20
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК.....	23
2.1 Високоєфективні електродвигуни в приводі компресора	23
2.2 Привод компресора із змінною швидкістю обертання	23
2.3 Централізована система керування системою стисненого повітря	25
2.4 Шляхи економії електроенергії в компресорній установці не пов'язані з її електроприводом	28
РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГВИНТОВИХ КОМПРЕСОРІВ.....	31
3.1 Опис технологічного процесу та характеристика об'єкту дослідження	31
3.2 Регулювання продуктивності компресора перепусканням з нагнітання на всмоктування (байпас)	34
3.3 Регулювання продуктивності переведенням компресора на режим холостого ходу.....	34

Пояснювальна записка									
Змі.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз використання частотно-регульованого приводу в компресорних установках	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив		Гречуха В.М.		09.11					1:1
Перевірив		Устименко Д.В.		06.11					
Т. контр.						Арк. 8	Аркушів 66		
Реценз.					7.141.220220.ПЗ	Український державний університет науки і технологій, група EE2221			
Н. контр.		Карцова О.О.		01.12					
Затвердив		Муха А.М.		01.12					

3.4 Регулювання продуктивності компресора зміною частоти обертання валу приводного електродвигуна.....	39
3.5 Порівняння енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора SCR1000 APM-8	44
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ПЕРСОНАЛУ ТА ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ПІД ТИСКОМ.....	49
4.1 Визначення та області застосування пристроїв безпеки.....	49
4.2 Європейське законодавство в сфері безпеки	52
4.3 Безпека при обслуговуванні компресорних установок.....	60
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	65
СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ.....	67
ДОДАТОК А.....	68

ВСТУП

Узагальнюючими показниками ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів країни є питомі витрати первинної енергії на одиницю валового внутрішнього продукту країни (енергоємність ВВП). Цей показник в Україні в кілька разів вищий ніж у провідних європейських країнах (Німеччина, Франція, Нідерланди), враховуючи світову тенденцію до підвищення вартості енергоносіїв необхідно змінювати ставлення до питань оптимізації споживання енергоресурсів [1].

Курс на активізацію та інтенсифікацію політики заощадження електричної енергії знайшов відображення в Законах України «Про електроенергетику» та «Про енергозбереження», комплексній державній програмі енергозбереження, регіональних програмах, рекомендаціях Ради Європи тощо [2]. Очевидно, що підвищення рівня енергоефективності економіки потребує організаційного, практичного наукового та інформаційного забезпечення, спрямованого на раціоналізацію використання енергетичних ресурсів.

Основними споживачами електричної енергії в промисловості є електропривод, електричне освітлення та значна група електротехнологічних установок (електронагрівання, електроліз, електрозварювання тощо). Структуру споживання електричної енергії в промисловості наведено в табл. 1 [3].

Враховуючи той факт, що система електропостачання утворює єдиний комплекс з технологічною системою виробництва, то підвищувати рівень ефективності використання електричної енергії можна двома шляхами:

- зменшенням питомих витрат електричної енергії на одиницю продукції за рахунок вдосконалення технології виробництва та раціоналізації режимів роботи електроустаткування;
- зменшенням втрат електричної енергії під час її транспортування та перетворення.

Найбільш високим потенціалом енергозбереження, з урахуванням тривалості режиму роботи і масового застосування, мають виробничі механізми і агрегати, що працюють в тривалому режимі із змінною продуктивністю [4].

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1 – Структура споживання електроенергії галузями промисловості (%)

Галузь промисловості	Електропривод	Вентиляція та кондиціонування	Отримання стисненого повітря	Водопостачання	Освітлення	Технологічні установки	
						Електротермія	Електроліз
Нафтохімічна	52,5	5,6	6,2	32,7	3,0	-	-
Чорної металургії	59,2	3,3	4,7	8,7	2,2	21,9	-
Кольорової металургії	30,8	2,1	3,8	2,9	1,1	11,3	48
Хімічна	65,4	4,6	1,6	2,3	4,6	10,6	13,9
Важкого машинобудування	52,5	3,4	15,9	2,6	6,5	19,1	-
Електротехнічна	27,9	10,2	13,5	4,1	6,6	36,4	1,3
Автомобілебудування	46	6	16	2	5	19	6
Сільськогосподарського машинобудування	32,5	3,5	18,6	-	4,9	40,5	-
Целюлозно-паперова	80,1	3,3	3,5	8,9	2,3	1	0,9
Легка	81,4	3	-	-	11,3	4,3	-
Харчова	80,7	3,7	3,3	4,2	5,9	1,3	0,9
Верстатобудування	29,5	4,6	10,2	-	4,8	50,9	-
Приладобудування	50	0,5	10	2,5	9,4	27,3	0,3

Більшість секторів економіки (табл. 1) використовують насосні, вентиляційні та компресорні установки. Традиційні способи керування витратою чи тиском зводяться до зміни ефективного поперечного перетину трубопроводу чи повітряного тракту, по якому відбувається переміщення робочого середовища. Найбільш часто для цього використовують клапани, засувки і вентилі.

Однак найбільша економія енергії в порівнянні з традиційними засобами може бути отримана при використанні частотно-регульованого привода. Розвиток сучасної напівпровідникової техніки доводить доцільність їх широкого впровадження в таких системах.

Перехід до регульованого електропривода змінного струму окремих механізмів дозволить заощадити до 50 % енергоресурсів. Недавній прогрес у

									Лист
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.220220.ПЗ				

напівпровідниковій індустрії, особливо в силовій електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання більш практичними і значно дешевшими.

На даному етапі розвитку промисловості в Україні особливого значення набувають питання розробки та широкого впровадження методів і способів керування енергоефективністю (енергозбереженням) засобами промислового електропривода, оскільки з однієї сторони гостро постала проблема економії електроенергії, а з іншого боку, – з'явилася реальна можливість її ефективного використання стосовно головного її споживача – електропривода.

Енергозбереження в електроприводі є частиною загального процесу ефективного використання електроенергії і визначається трьома процесами:

- енергоспоживанням;
- енерговикористанням споживаної енергії;
- енергоуправлінням процесу енергоспоживання.

Аналіз ринку України показує, що незважаючи на існування низки імпортерів частотних перетворювачів, наявності методики по впровадженню і підтримки з боку розробників, проблема застосування такого обладнання все ж існує.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Загальна характеристика систем стисненого повітря

Стиснене повітря представляє собою повітря, яке зберігається і використовується під тиском, що перевищує атмосферний. Системи стисненого повітря приймають певну масу атмосферного повітря, що займає деякий об'єм, і стискають її до меншого об'єму.

Стисне повітря використовується двома основними способами:

- як компонент технологічного процесу (виробництво азоту, кисню, організація чистих промислових приміщень, захист від забруднень, перемішування в умовах високих температур, лиття пластмас, пневматичного сортування і інше);
- в якості енергоносія (приведення в рух інструментів, приведення в рух пневматичних виконавчих пристроїв).

В багатьох випадках системи постачання стисненим повітрям представляють собою невідривну частину промислового підприємства і повинні аналізуватись паралельно з загальними потребами виробництва в стисненому повітрі. Від 5% до 25% від загального енергоспоживання підприємством приходиться на системи стисненого повітря.

На сьогодні важливим фактором інвестиційних рішень, особливо, при впровадженні нової системи стисненого повітря, є аналіз затрат на протязі життєвого циклу системи. Енергоефективність розглядається в якості важливого критерія при проектуванні нових систем стисненого повітря, і існує значний потенціал для оптимізації систем, що вже експлуатуються.

Системи постачання стисненим повітрям промислових підприємств є складними інженерними системами різних конфігурацій. У стандартному виконанні система передбачає наявність центральної компресорної станції (КС) та мережі повітропроводів, що виконується за схемою центральний колектор – цехові колектори – місцеві розгалуження («деревоподібна схема», рис. 1, а) [5].

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

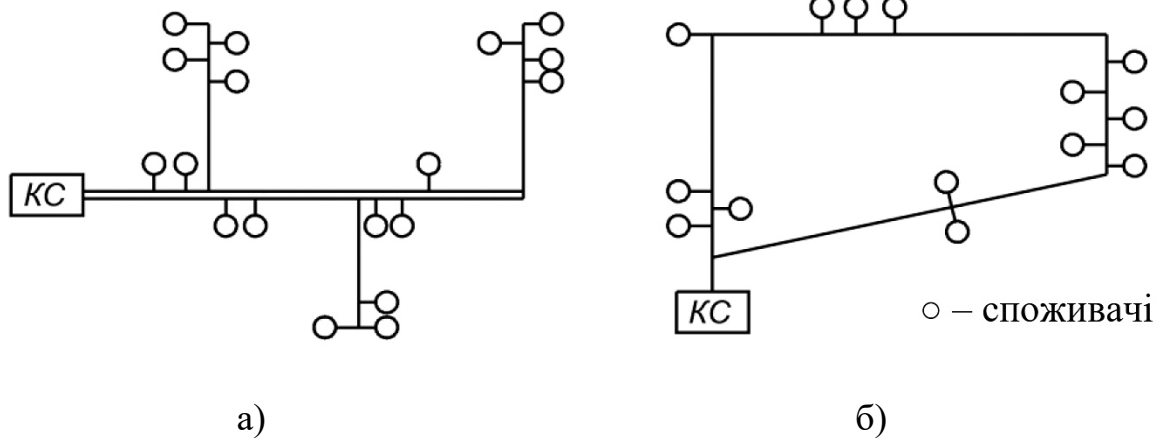


Рис. 1 – Схеми систем постачання стисненого повітря: деревоподібна (а); кільцева (б)

Недоліками таких схем є велика протяжність магістральних і розподільних повітропроводів, підвищенні капітальні витрати і вартість ремонту та експлуатації. Для усунення зазначених недоліків установлюють додаткові (кущові) компресорні станції і (або) за кільцюють центральний колектор. Кільцева схема повітропостачання (рис. 1, б) забезпечує більш рівномірну подачу стисненого повітря до усіх споживачів.

Особливістю схеми централізованого постачання стисненим повітрям є необхідність групувати потужні компресори в одному місці, що зумовлює необхідність обладнання окремого цеху компресії з окремим машинним залом. Упровадження енергозберігаючих технологій показало, що центральні компресорні станції з розвиненими зовнішніми системами повітропроводів є економічно не вигідними.

Сучасний підхід полягає в застосуванні локальних компресорних станцій і пневмосистем.

Локальні компресорні станції максимально наближені до споживача або групи споживачів стисненого повітря. Локальна система стисненого повітря – система постачання стисненого повітря промислового підприємства, що складається зі сукупності локальних компресорних станцій. В таких системах повітропроводи відсутні або їх довжина мінімальна, а значить майже відсутні витоки повітря та мінімальні гідравлічні втрати в мережі. В реальних випадках перехід від централізованих до локальних систем може давати економію енергії до 30% [5]. Особливо економічним є використання локальних станцій для систем, що мають

Об'ємний компресор – це машина, в якій процес стиснення відбувається у робочих камерах, що змінюють свій об'єм періодично, навперемінно сполучаючись із входом і виходом компресора. Такі машини за геометричною формою робочих органів та способом зміни об'єму робочих камер класифікують на поршневі й роторні компресори.

У поршковому компресорі газ стискується переміщення поршня, який рухається зворотно-поступально (рис. 4).

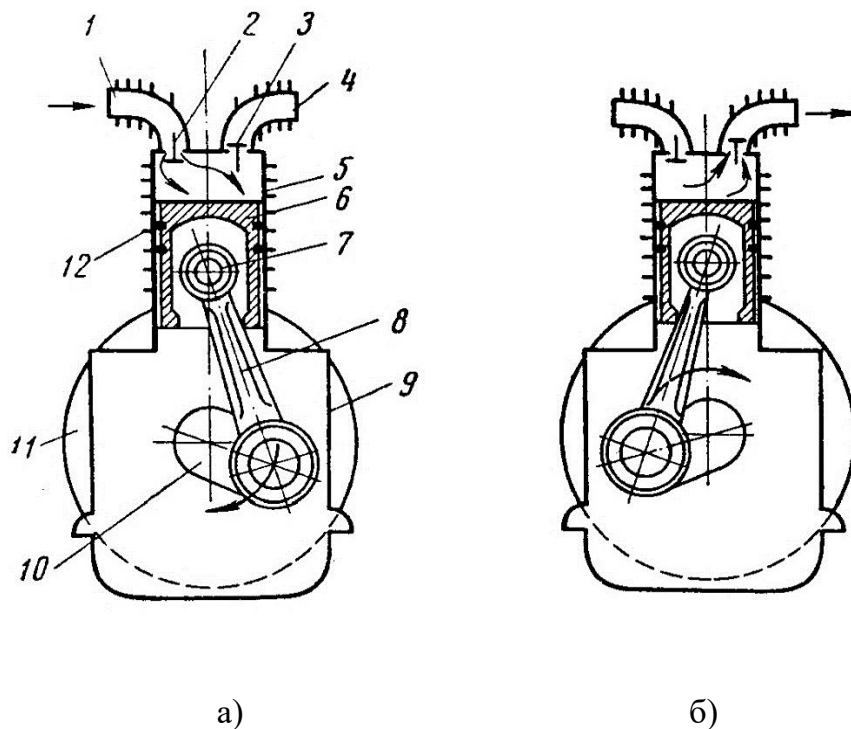


Рис. 4 – Схема влаштування та дії одноступеневого поршневого компресора:
 а – всмоктування; б – нагнітання; 1 – впускний патрубок; 2 – впускний клапан; 3 – випускний клапан; 4 – випускний патрубок; 5 – циліндр; 6 – поршень; 7 – поршковий палець; 8 – шатун;
 9 – блок-картер; 10 – колінчатий вал; 11 – маховик; 12 – поршкові кільця

Подачу компресорів регулюють лише в бік зменшення. Збільшення подачі досягають за рахунок зростання кількості працюючих агрегатів.

Подачу поршневого компресора можна змінити за рахунок зменшення об'єму, що описують поршні за один хід у робочих камерах, за рахунок зниження частоти обертання валу або при зменшенні коефіцієнта подачі компресора. Причому, регулювання частоти вимагає застосування регульованого електроприводу і цей підхід має сталу тенденцію до поширення.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

9000...12000 об/хв. Регулювання подачі турбокомпресорів здійснюють дроселюванням всмоктуваного повітря.

Стаціонарні й транспортні компресорні машини продуктивністю більше 1000 м³/хв і відносно великим підвищенням тиску (10...15 та більше) – є осевими компресорами. Здебільшого це багатоступінчаті машини, що використовуються в авіаційній, криогенній техніці, в машинобудівній, газовій, хімічній, металургійній галузях промисловості. Осеві компресори мають перевагу над відцентровими – більш високий ККД [7].

1.3 Енергоефективність в системах стисненого повітря

В більшості суттєвих застосувань стисненого повітря в промисловості цей ресурс є невід’ємним компонентом технологічного процесу. При цьому в багатьох випадках використання стисненого повітря чи конкретний метод його застосування не можуть бути замінені іншою технологією без суттєвої реорганізації процесу в цілому. В таких умовах енергоефективність системи стисненого повітря повністю чи в більшій мірі визначається енергоефективністю виробництва, підготовки і розподілу стисненого повітря.

В свою чергу, енергоефективність виробництва, підготовки і транспортування стисненого повітря визначається якістю проектування, реалізації, експлуатації і технічного обслуговування відповідної системи. До реалізації мір по оптимізації енергоефективності системи стисненого повітря необхідно проаналізувати технологічні процеси, що споживають стиснене повітря, і потреби цих процесів.

В 2000 році в рамках європейської програми SAVE виконувалось дослідження по аналізу потенціалу енергоефективності систем стисненого повітря. Хоча дослідження включало усі можливі використання без урахування специфіки підприємств, його результати дають гарне уявлення про можливі методи підвищення енергоефективності таких систем і їх потенціал. Результати дослідження наведені в табл. 2 [8]. Аналіз показує, що удосконалення приводів компресорів, використання удосконаленої системи керування та застосування високоефективних електродвигунів здатні суттєво покращити енергоефективність таких систем.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Таблиця 2 – Методи підвищення енергоефективності систем стисненого повітря

Метод підвищення енергоефективності	% застосування ¹	% енергозбереження ²	% потенційного вкладу ³	Примітка
Встановлення нової або реконструкція існуючої системи				
Удосконалення приводів компресорів (застосування високоефективних двигунів)	25	2	0,5	Найбільш ефективно в невеликих системах (<10 кВт)
Удосконалення приводів компресорів (регулювання швидкості)	25	15	3,8	Використовується в системах із змінним навантаженням. В системах з декількома приводами доцільно обладнати пристроєм регулювання швидкості тільки один з них. Оцінка потенціалу енергозбереження відноситься до системи в цілому, незалежно від кількості приводів.
Модернізація компресора	30	7	2,1	
Використання удосконаленої системи керування	20	12	2,4	
Утилізація тепла, що відходить для інших цілей	20	20...80	4,0	Даний метод приводить до збільшення загальної кількості доступної енергії, але не до зменшення її споживання.
Покращення процесів охолодження, сушки і фільтрації стисненого повітря	10	5	0,5	
Оптимізація загального улаштування системи, включаючи системи з декількома рівнями тиску	50	9	4,5	
Зменшення фрикційних втрат	50	3	1,5	
Оптимізація деяких пристроїв, що споживають стиснене повітря	5	40	2,0	
Експлуатація і технічне обслуговування системи				
Зменшення витоків повітря	80	20	16,0	
Частіша заміна фільтрів	40	2	0,8	
Разом			32,9	

Зауваження до заголовка таблиці:

- (1) застосування – доля систем, де даний метод є економічно ефективним;
- (2) енергозбереження – зменшення річного енергоспоживання через застосування методу;
- (3) потенційний вклад – добуток застосування і енергозбереження.

Враховуючи, що для регулювання асинхронного приводу використовують частотні перетворювачі, то впровадження високорівневих систем керування не є складною технічною задачею.

Основною метою методів представлених в табл. 2 є проектування чи модифікація системи стисненого повітря таким чином, аби підвищити її енергоефективність. Додатковими позитивними ефектами підвищення енергоефективності можуть бути:

- зниження рівня шуму;
- зменшення витрати води для охолодження.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2
ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ
ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК

2.1 Високоефективні електродвигуни в приводі компресора

Офіційного визначення високоефективного електродвигуна не існує але під цим терміном, зазвичай, розуміють електродвигуни в яких втрати зведені до мінімально можливого рівня. Пріоритетом при проектуванні високоефективних електродвигунів є мінімізація електричних, механічних втрат з метою зменшення енергоспоживання пристрою. У світі існує ряд класифікацій електродвигунів з точки зору енергоефективності. В рамках цих класифікацій високоефективні електродвигуни відносяться до найвищих категорій, наприклад EFF1, NEMA premium, IE3 IEC60034-30.

Оскільки знижений рівень втрат не накладає обмежень на можливе застосування електродвигуна, високоефективні електродвигуни можуть застосовуватись практично повсюди. Такі електродвигуни уже застосовуються в більшості крупних систем, більшу частину випадків де не використовуються високоефективні електродвигуни складають середні та невеликі системи [8].

Зменшення енергоспоживання електричною машиною навіть на незначну величину (1...2%) здатне привести до значної загальної економії за весь строк служби електродвигуна.

2.2 Привод компресора із змінною швидкістю обертання

Компресори обладнуються приводами з змінною швидкістю, в більшості випадків, в умовах, коли потреба в стисненому повітрі суттєво змінюється на протязі робочого циклу. Для керування роботою компресорів використовуються традиційні підходи: включення/відключення, модуляція, регулювання продуктивності і т. д.

Однак якщо використання подібних методів приводить до частих зупинок, а також тривалим періодам холостого ходу, результатом може бути зниження

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоефективності.

При використанні приводу з змінною швидкістю частота обертання електропривода плавно регулюється в залежності від зміни потреби в стисненому повітрі, забезпечуючи при цьому високий рівень енергоефективності.

За даними дослідження, більшість систем стисненого повітря характеризуються середніми чи значними варіаціями споживання. Тому існує значний потенціал енергозбереження за рахунок оснащення компресорів приводами змінної швидкості.

Компресори з приводом в якому регулюється швидкість можуть бути інтегровані в існуючу систему стисненого повітря. Більше того, регулятором швидкості (відповідним напівпровідниковим перетворювачем) може обладнуватись вже існуючий привод компресора, що розрахований на експлуатацію з постійною швидкістю. Однак при сумісній установці двигуна та регулятора обертів досягається найбільший ефект, оскільки ці пристрої спеціально підбираються для максимально ефективної роботи в певному діапазоні швидкостей.

На даному етапі багато систем стисненого повітря вже обладнано приводами з регулюванням швидкості, по попереднім оцінкам потенціал для впровадження цієї технології в промисловості складає близько 25% від існуючих систем (інформація для країн Єврозони). Об'єм енергозбереження може сягати 30%, хоча середній ефект, що досягається при додаванні в систему стисненого повітря одного компресора з приводом змінної швидкості, складає близько 15% [8].

Оцінка економічних аспектів впровадження регульованих приводів компресорів опирається на те, що на електричну енергію припадає 80% затрат за весь життєвий цикл компресора, тоді як залишок у 20% витрачається на капітальні витрати та технічне обслуговування. Підприємство, де (у відповідності до консервативної методики оцінювання) енергоспоживання компресора знижується на 15%, економить 12% затрат за його життєвий цикл, в той час як додаткові витрати на придбання компресора з приводом змінної швидкості (замість традиційного нерегульованого) збільшує затрати за життєвий цикл всього на 2...5% [8].

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На приклад, на підприємстві Norwegian Talc Ltd. в м. Хартлуп (Великобританія) було проведено дослідження продуктивності гвинтового компресора у відповідності зі стандартом BS1571 [9]. При роботі компресора на рівні 50% від номінальної продуктивності було досягнене зниження енергоспоживання на 9,4 кВт, що складає 9% потужності, яка споживається у разі повного навантаження. При меншому завантаженні чи при певних умовах економія енергії буде ще більшою. Однак при роботі в режимі повного завантаження енергоспоживання було на 4% вище за рахунок втрат енергії в перетворювачі (регулятор швидкості) [8]. Тому приводи із регулюванням швидкості не варто використовувати з компресорами, що працюють в умовах повного завантаження чи близько до нього, на протязі тривалих періодів.

2.3 Централізована система керування системою стисненого повітря

Як правило, на промислових підприємствах до складу системи стисненого повітря входить декілька компресорів. Загальну ефективність такої системи можна суттєво підвищити за рахунок впровадження центрального пристрою керування (системи керування), який здатен отримувати виробничу інформацію від компресорів і повністю або частково керувати їх режимами роботи. Можливості таких систем багатократно зростають при використанні сучасних частотно-регульованих приводів компресорів.

Ефективність такого пристрою керування також залежить від можливостей комунікаційних каналів між ним і виробничим обладнанням. Конкретна технічна реалізація цих каналів може варіюватись від простих реле з плаваючим контактом до мереж, що використовують протоколи систем автоматизації виробництва. Удосконалення каналів зв'язку відкриває додаткові можливості для отримання виробничої інформації від компресорів, керування роботою окремих компресорів, а також оптимізації загального енергоспоживання системи стисненого повітря.

Стратегія керування, що реалізується за допомогою пристрою керування, повинна враховувати характеристики окремих компресорів, в тому числі доступні для них режими керування.

Найбільш розповсюджені режими керування окремими компресорами є:

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перемикання між режимами навантаження (робочого ходу), холостого ходу (неробочого ходу) і зупинки;
- плавне регулювання частоти обертання валу.

Розвинена сучасна система керування системою стисненого повітря в поєднанні з системами керування окремими компресорами повинна мати наступні характеристики:

- комунікаційні можливості на основі мережевих протоколів автоматизації;
- повний доступ центрального пристрою керування до інформації про функціонування окремих компресорів з можливістю керуванням його режимів роботи;
- можливість оптимізації загальної стратегії керування на основі самонавчання;
- визначення станів системи (розподілення навантаження, холостого ходу і зупинки окремих компресорів), що характеризуються високою енергоефективністю, використання цих станів і перехід між ними з метою задоволення загальної потреби у стисненому повітрі;
- ефективне керування компресорами з приводами змінної швидкості, що дозволяє компенсувати короткотермінові коливання потреби в стисненому повітрі і уникати тривалої роботи компресорів в неефективних режимах (наприклад, з постійною низькою швидкістю);
- мінімізація кількості включень та тривалості періодів холостого ходу компресорів з постійною швидкістю (без можливості регулювання швидкості);
- використання складних моделей і методів прогнозування загального споживання стисненого повітря (виявлення циклів);
- додаткові функції (віддалений моніторинг, збирання інформації про виробництво, планування технічного обслуговування і інше);
- моніторинг стану і керування іншими компонентами системи стисненого повітря, окрім компресорів.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В системах з одним компресором: оптимальним є режим функціонування системи, коли компресор безперервно працює з постійним значенням швидкості і оптимальним ККД. Якщо споживання стисненого повітря не є постійними, зупинка компресора чи його перехід на холостий хід під час тривалої перерви в споживанні може виявитись більш ефективним рішенням.

Компресор без можливості регулювання швидкості працює з постійною швидкістю і може перемикатись між режимами навантаження, холостого ходу чи зупинки. Робота в режимі холостого ходу замість зупинки може знадобитись, якщо для забезпечення необхідної продуктивності і тиску в системі необхідні частіші перемикання між повним і нульовим рівнями завантаженості, ніж допустима частота умикань привода. Потужність компресора в режимі холостого ходу складає не більше 25% від повної потужності. Додаткові втрати пов'язані з продувкою компресора при зупинці, а також високими пусковими струмами електродвигуна.

В компресорах з регульованою швидкістю швидкість плавно змінюється в діапазоні між мінімальним і допустимим значеннями (як правило діапазон регулювання не перевищує 5:1), при цьому продуктивність об'ємних компресорів приблизно пропорційна їх робочій швидкості. Через невідворотні втрати в перетворювачі частоти і асинхронному двигуні, власний ККД привода з змінною швидкістю завжди нижчий, ніж ККД привода з постійною швидкістю (на 3...4% нижче при повному завантаженні). Крім того, ККД деяких типів об'ємних компресорів за умови низьких робочих швидкостей значно нижчий, ніж при номінальній продуктивності.

В системах з одним компресором ці негативні ефекти можна компенсувати за рахунок оптимального режиму регулювання швидкості і уникнення втрат, що пов'язані з роботою на холостому ході, зупинкою і запуском, які б мали місце при роботі тієї ж системи з постійною швидкістю.

Системи з декількома компресорами. Для таких систем попередні рекомендації були б занадто простими, оскільки центральний пристрій керування забезпечує задоволення потреб, що змінюються, за рахунок складного поєднання режимів роботи різних компресорів і перемикання між цими режимами. Стратегії керування такою системою включають також регулювання швидкості компресорів

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з метою мінімізації періоду роботи на холостому ході та кількості увімкнень компресорів без можливості регулювання швидкості.

Додавання регульованого за швидкістю компресора в систему з декількома компресорами доцільно, коли система стисненого повітря характеризується відносно невеликим об'ємом ресивера (ємності для зберігання стисненого повітря), сильно чи швидко змінним в часі споживанням, малою кількістю компресорів.

Як правило, різні компресори в системі з центральним пристроєм керування працюють в загальному діапазоні тисків, при цьому критерієм керування є підтримання необхідного мінімуму тиску в певній точці (контрольній точці). Така схема виявилась значно більш ефективною, ніж каскадні схеми.

Економічна ефективність оснащення нової системи стисненого повітря централізованою системою керування залежить від багатьох факторів. У відповідності з експертними оцінками, середній об'єм енергозбереження в результаті використання такої системи складає 12% [8].

2.4 Шляхи економії електроенергії в компресорній установці не пов'язані з її електроприводом

Шляхи економії електроенергії в компресорних установках [10]: періодичний контроль ККД компресорів; зниження наднормативних витоків стиснутого повітря і втрат тиску в пневматичних мережах; узгодження режимів роботи компресорної станції з режимом споживання стисненого повітря; заміна пневматичного обладнання (за можливості) на електроустаткування.

Щоб не відбувалося зниження ККД компресорів, необхідно здійснювати заходи щодо підвищення ефективності їх роботи, а саме:

- контроль опору пристрою забору повітря;
- регулярне очищення фільтрів;
- регулювання притискних пружин клапанів;
- застосування високоякісного мастила для частин тертя і суворо регламентована його подача в робочу область;
- підтримка в справному стані регуляторів продуктивності і забезпечення їх чіткої роботи;
- контроль інтенсивності охолодження компресора.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Температура стисненого повітря на виході з проміжного холодильника не повинна перевищувати температуру охолоджувальної рідини на вході більше ніж на 5...10°C.

Застосування резонансної довжини всмоктувальних трубопроводів поршневих компресорів скорочує питому витрату електроенергії на 3...5% при одночасному підвищенні продуктивності на 5...8%. Резонансна довжина визначається виразом:

$$L = \frac{5160}{n}, \quad (1)$$

де n – швидкість обертання колінчастого валу компресора, об/хв.

Витоки стисненого повітря не повинні перевищувати 20%. Для дотримання цієї вимоги необхідно:

- вести систематичний контроль за витоками стиснутого повітря;
- замінювати гумовотканинні повітропроводи на типові гнучкі з металоплівкою і уніфікованою пневматичною апаратурою;
- не допускати установки товстостінних труб замість тонкостінних, збільшувати діаметр труб на окремих ділянках;
- установлювати необхідну кількість пристроїв для відділення води;
- використовувати пересувні компресори для подачі невеликої кількості стиснутого повітря віддаленим споживачам;
- за можливостю використовувати теплоізоляцію трубопроводу;
- виключити нераціональну витрату стисненого повітря.

Потужність електродвигуна компресора визначається виразом, кВт:

$$P = \frac{1380}{\eta_{із} \cdot \eta_{д}} \cdot \frac{p_1 \cdot V_k \cdot \gamma_n}{\gamma_d} \cdot \lg \frac{p_2}{p_1}, \quad (2)$$

де $\eta_{із}$ – ізотермічний ККД компресора;

γ_n – густина повітря при 273°K і тиску 0,1 МПа, кг/м³;

γ_d – густина повітря в дійсних умовах, кг/м³;

p_1 – початковий тиск повітря, що подається на вхід, МПа;

									Лист
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

p_2 – тиск стисненого повітря, МПа;

V_k – об’ємна продуктивність компресора, м³/с.

Зниження тиску стисненого повітря на 1% зменшує витрату електроенергії приблизно на 0,5%. Графік роботи компресорної станції повинен бути погоджений із графіком споживання стиснутого повітря, що скорочує надлишкове продукування стисненого повітря і додаткові втрати [10].

При можливості заміни пневматичної енергії на електричну окремих споживачів має місце 7...10 кратна економія енергії.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГВИНТОВИХ КОМПРЕСОРІВ

Умовам застосування в системах повітропостачання переважної більшості промислових підприємств найбільше відповідають гвинтові компресори, тому питання енергоефективності компресорів буде розглянуто відносно вказаної конструкції.

Ефективність роботи гвинтових компресорів в режимах роботи, що характеризуються зміною об'єму споживання стисненого повітря напряму визначається економічністю прийнятого способу регулювання [5]. Завданням регулювання є забезпечення потрібних за умовами експлуатації режимів роботи компресора найбільш економічним шляхом з забезпеченням стійкої його роботи.

Гвинтовим компресорам принципово доступні декілька способів регулювання їх продуктивності:

- перепускання з нагнітання на всмоктування (байпас) або скидання частини стисненого повітря;
- дроселювання на всмоктуванні;
- зміна робочого об'єму (використовують спеціальні золотникові пристрої);
- періодична зупинка та пуск компресора;
- переведення компресора на режим холостого ходу;
- зміна частоти обертання ведучого ротору;

3.1 Опис технологічного процесу та характеристика об'єкту дослідження

Для забезпечення безперебійного транспортного процесу, а також для технологічних процесів, спрямованих на підтримку справного стану тягового парку (локомотиви), моторвагонного (електропоїзди, дизель-поїзди), нетягового (вантажні та пасажирські вагони) рухомого складу і залізничних колій важливу роль відіграє застосування стисненого повітря як джерела енергії (табл. 3) [11].

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Велика кількість компресорних станцій на залізниці обладнана фізично застарілими поршневыми компресорами, з водяним охолодженням, що мають низький коефіцієнт корисної дії та надійність. Переобладнання компресорних станцій входить до програм модернізації залізничного транспорту України [11].

Таблиця 3 – Застосування стисненого повітря в структурних підрозділах залізниці

Структурний підрозділ залізниці	Сфера застосування системи стисненого повітря
ЦВ Вагонне господарство	Пневмосистема вагонних депо
	Пристрої зарядки і випробування гальмівних систем
ЦТ Локомотивне господарство	Пневмосистема локомотивних депо
	Пристрої зарядки і випробування гальмівних систем
ЦЛ Пасажирське господарство	Пневмосистема моторвагонних депо
	Пристрої зарядки і випробування гальмівних систем
ЦП Шляхове господарство	Обдування стрілових переведень
	Вагонні сповільнювачі на сортувальних гірках
	Будівництво та ремонт шляху

Для реконструкції та модернізації успішно застосовуються компресорні станції на базі гвинтових блоків для стискання повітря, що обладнанні повітряним або масляним охолодженням і системою очищення повітря від мастила і вологи. Наприклад, гвинтовий компресор SCR1000 APM-8 (рис. 7) технічні характеристики якого представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Технічні характеристики гвинтового компресора SCR1000 APM-8

Параметр	Величина
Номінальна потужність приводного двигуна, кВт	75
Об'ємна продуктивність, м ³ /хв	12,9
Тиск, атм	8
Тип приводу	прямий
Маса, кг	1230
Габарити, мм	1800x1200x1550



Рис. 7 – Зовнішній вигляд компресора SCR1000 APM-8

Гвинтовий компресор SCR1000 APM-8 використовується в складі компресорної станції, що працює на пневмережу з місткістю $Q_M = 24 \text{ м}^3$ із графіком добового споживання повітря, наведеному на рис. 8. Компресор обладнаний системою холостого ходу з діапазоном налаштування 7...8 атм.

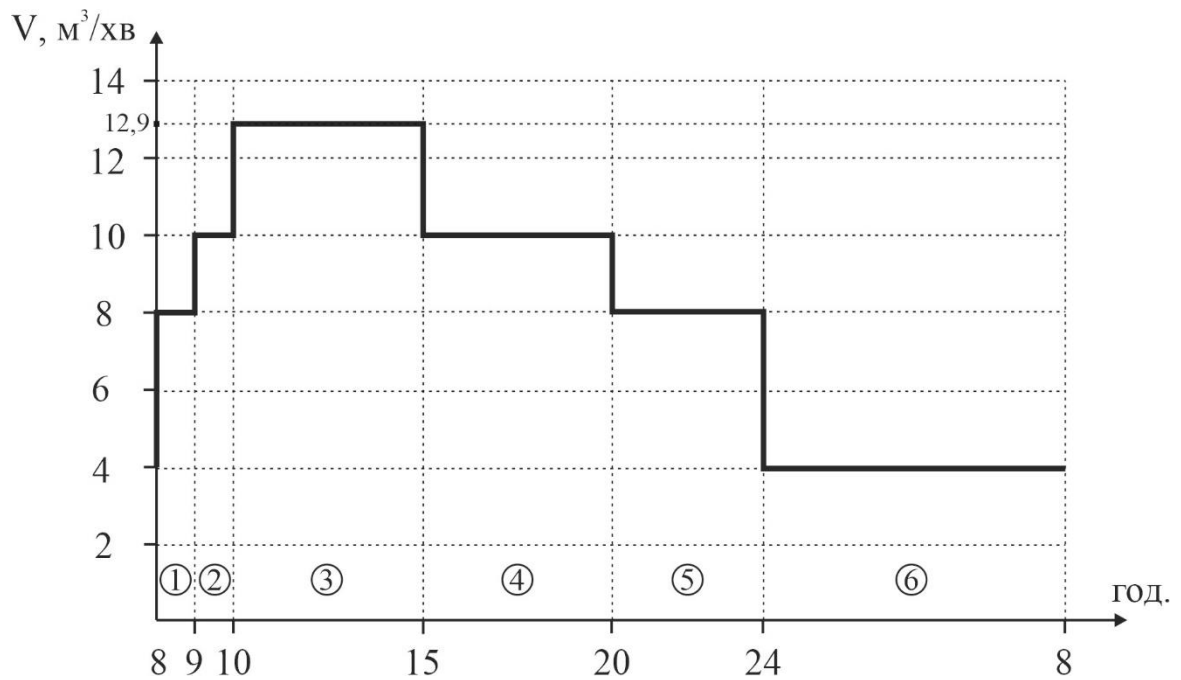


Рис. 8 – Розрахунковий графік добового споживання стисненого повітря

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.2 Регулювання продуктивності компресора перепусканням з нагнітання на всмоктування (байпас)

Таке регулювання здійснюється за допомогою регулювального органу (РО) та запірних вентилю В3, що встановлені на лінії між сторонами високого p_2 і низького тисків p_1 . Перепуск, як правило, організовується безпосередньо з нагнітального блоку 1.

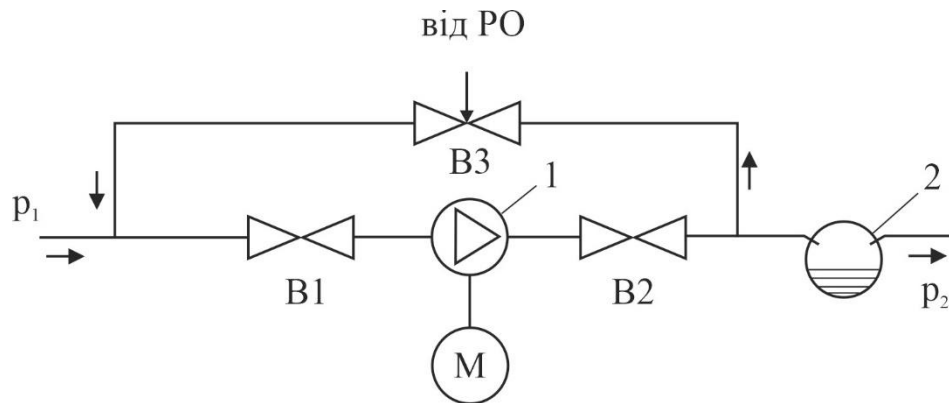


Рис. 9 – Схема увімкнення компресора з регулюванням його продуктивності перепусканням з нагнітання на всмоктування:

1 – нагнітальний блок; 2 – ресивер; РО – регулювальний орган; М – привідний електродвигун;
В1...В3 – запірні вентиля

В цілому метод перепускання з нагнітання на всмоктування (байпасування) є технічно простим, але з енергетичної точки зору є самим недосконалим, оскільки не призводить до зниження споживаної компресором потужності ($N = const$). Компресор SCR1000 АРМ-8 при такому способі регулювання продуктивності буде споживати з мережі $W_{байпас} = 24 \cdot N_{ном} = 24 \cdot 75 = 1800$ кВт·год за добу (у відповідності до графіку добового споживання на рис. 8).

3.3 Регулювання продуктивності переведенням компресора на режим холостого ходу

Гвинтові компресори в більшості випадків мають систему регулювання продуктивності шляхом автоматичного переведення на холостий хід. Працює система наступним чином: в режимі холостого ходу (дросельна засувка на вході перекрита) через деякий час t_{xx} тиск у мережі стисненого повітря падає до мінімального значення p_{min} (зона між точками 2 і 3 на рис. 10), в цей момент

регулятор продуктивності дає імпульс керування на виконавчий механізм, що відкриває дросельну засувку на вході. Тиск почне зростати, так як продуктивність самого компресора дещо більша від потреб мережі (зона між точками 1 та 2 на рис. 10).

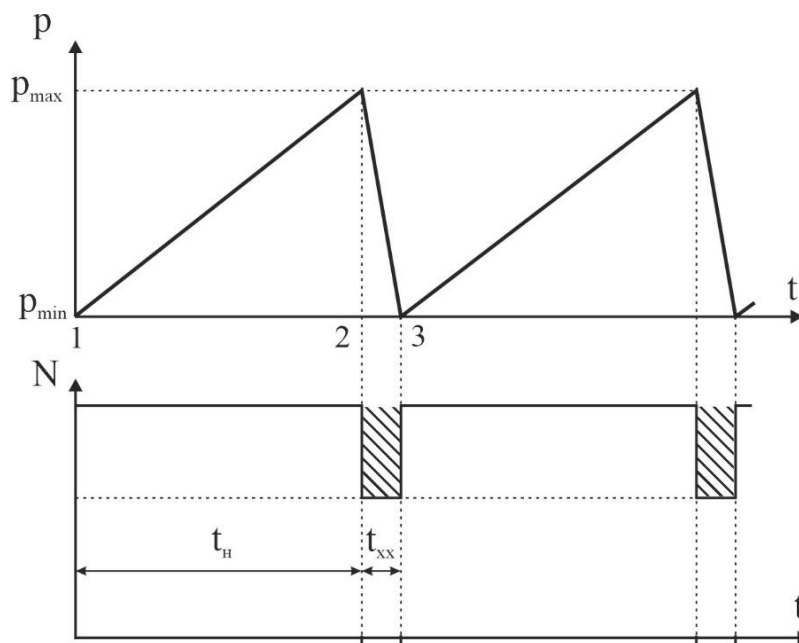


Рис. 10 – Графік роботи гвинтового компресора, регульованого переведенням на холостий хід

Час t_n потрібен системі аби підвищити тиск в напорній магістралі до максимального значення p_{max} , при досягненні якого система знову переходить в режим холостого ходу. Тривалості t_n , t_{xx} та їх частота залежать від співвідношення продуктивності компресора і витрати споживачами [5]:

$$t_n = \frac{Q}{V_k} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{1 - q_v}, \quad (3)$$

$$t_{xx} = \frac{Q}{V_k} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{q_v}, \quad (4)$$

де Q – місткість пневмережі, m^3 ;

$\varepsilon_1 = p_1/p_0$ – відносне перевищення початкового тиску в пневмережі над тиском насичених водних парі, що є в повітрі, при робочій температурі (p_0);

$\varepsilon_2 = p_2/p_0$ – відносне перевищення початкового тиску в пневмережі над тиском насичених водних парі, що є в повітрі, при робочій температурі (p_0);

Відносне споживання повітря:

$$q_v = \frac{V_c}{V_k}, \quad (5)$$

де V_c – поточне споживання стисненого повітря в системі, м³;

Тоді тривалість одного циклу «нагнітання – холостий хід» можна визначити за наступним виразом [5]:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{н}} + t_{\text{хх}} = \frac{Q}{V_k} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{q_v(1 - q_v)}. \quad (6)$$

Комплекс $\frac{Q}{V_k} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ є постійним для кожного конкретного випадку регулювання, і якщо обидві частини виразів (3), (4) та (5) поділити на цей комплекс, то можна перейти до часу у відносних одиницях [5]:

$$t_{\text{н}}^* = \frac{1}{1 - q_v}, \quad (7)$$

$$t_{\text{хх}}^* = \frac{1}{q_v}, \quad (8)$$

$$t_{\text{ц}}^* = \frac{1}{q_v(1 - q_v)}. \quad (9)$$

Вирази (7), (8) та (9) дозволяють побудувати у відносних координатах універсальні характеристики гвинтового компресора для даного способу регулювання (рис. 11), які можуть використовуватись для будь-яких поєднань продуктивності компресора, об'ємів споживання, місткості пневмережі та діапазону зміни тиску в мережі нагнітання. Усі криві $t_{\text{н}}^* = f(q_v)$, $t_{\text{хх}}^* = f(q_v)$, $t_{\text{ц}}^* = f(q_v)$ симетричні відносно ординати $q_v = 0,5$, тобто тривалість циклу $t_{\text{ц}}$

мінімальна при $q_v = 0,5$ (коли $V_c = 0,5V_k$). Причому для випадку $q_v > 0,5$ час холостого ходу буде меншим від часу нагнітання, а при $q_v < 0,5$ – навпаки.

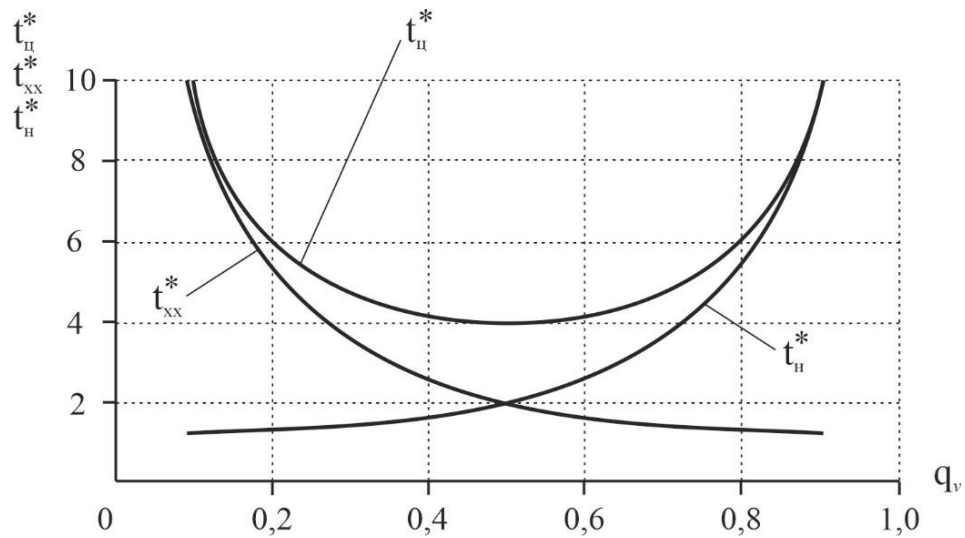


Рис. 11 – Тривалості циклу, інтервалів нагнітання та холостого ходу, віднесені до величини $Q(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/V_k$ в залежності від навантаження q_v

Скориставшись залежністю (6) можна визначити частоту спрацювання системи регулювання Z , цикл./год, залежно від режиму споживання q_v [5]:

$$Z = \frac{V_k}{Q} \cdot \frac{q_v(1 - q_v)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (10)$$

Ця величина напряму пов'язана з надійністю та ресурсом системи регулювання і тому має обмежуватись. Зазвичай кількість циклів обмежується на рівні 4...8 на годину.

Абсолютно логічно, що якщо об'єм споживаного повітря близький до номінальної продуктивності компресора, його перехід в режим холостого ходу короткочасний. Економія енергії в цьому випадку не значна, а от при середніх навантаженнях сумарна економія істотно збільшується.

Потужність гвинтового компресора за один цикл «нагнітання – холостий хід», дорівнює [5]:

$$N_{II} = N_H [q_v + k(1 - q_v)], \quad (11)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Добові витрати енергії на роботу компресора будуть визначатись, як сума витрат електричної потужності по усім ділянкам графіку добового споживання,

$$\text{тобто } W = \sum_{i=1}^6 W_i = 60,75 + 66,75 + 375 + 33,75 + 243 + 393 = 1472,25 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

3.4 Регулювання продуктивності компресора зміною частоти обертання валу приводного електродвигуна

Для регулювання швидкості обертання валу електродвигуна широко використовуються декілька типів пристроїв:

- механічні варіатори;
- гідравлічні чи електромагнітні муфти ковзання;
- системи «генератор – двигун»;
- електронні регулятори.

В перших трьох випадках маємо механічні рухомі системи, що зношуються та потребують періодичного огляду і обслуговування. Електронні ж регулятори такого недоліку не мають і з цієї причини є більш бажаними.

В самому загальному розумінні будь-який електропривод включає в себе електричну машину (постійного або змінного струму), перетворювач електричної енергії, систему керування, що ним управляє [12, 13].

Для електроприводів компресорів найпоширенішими є електричні двигуни змінного струму асинхронні (компресори малої та середньої потужності) або синхронні (компресори великої потужності). Швидкість ротора асинхронного електродвигуна можна регулювати зміною частоти напруги живлення, амплітуди напруги живлення, числа пар полюсів, схеми увімкнення обмотки статора та застосовуючи зміну параметрів обмоток статора чи/та ротора (параметричне регулювання). Але найефективнішим способом регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна є одночасна, за певним законом, зміна частоти і амплітуди напруги живлення. Для його реалізації використовуються напівпровідникові перетворювачі частоти. Існує два основних типи перетворювачів частоти: з безпосереднім зв'язком та з контуром постійного струму. В першому випадку вихідна напруга синусоїдальної форми формується з

									Лист
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

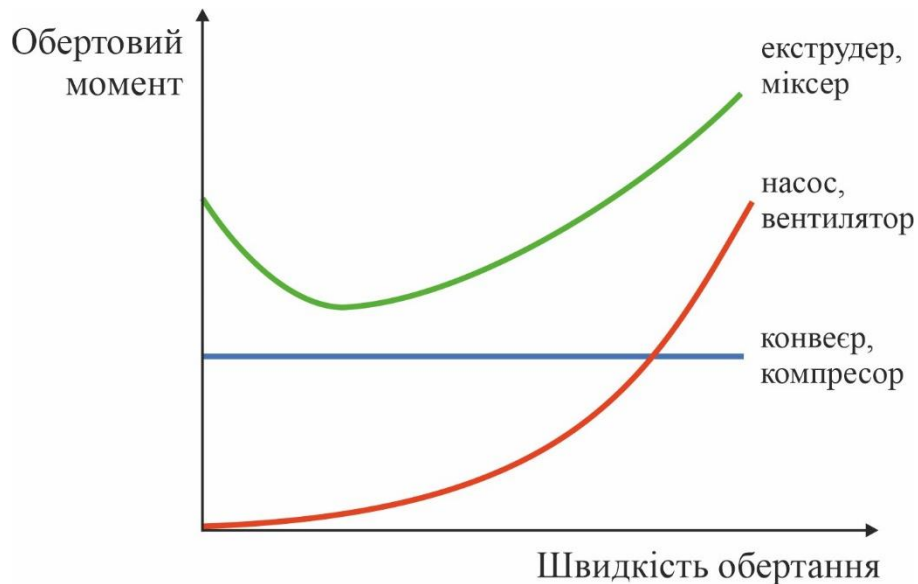


Рис. 13 – Механічні характеристики типових промислових механізмів

Режим з лінійною залежністю між напругою і частотою ($U/f = const$) реалізується найпростішими перетворювачами частоти з метою забезпечення постійності моменту на валу, і враховуючи механічну характеристику гвинтового компресора, може використовуватись для керування його приводним електродвигуном. Але при зменшенні частоти нижче певного рівня, максимальний момент електродвигуна та жорсткість характеристик зменшуються (рис. 14), і як наслідок, це призводить до зменшення перевантажувальної здатності та погіршення точності регулювання.

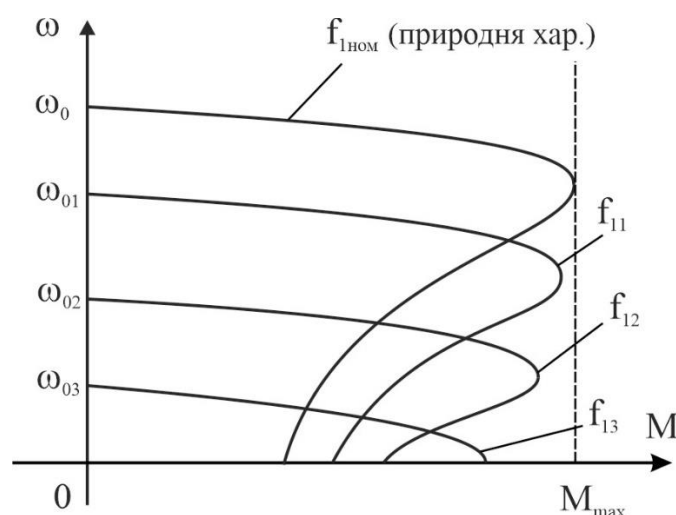


Рис. 14 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при живленні його від перетворювача частоти, що працює за законом $U/f = const$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для того, аби уникнути небажаного зниження моменту на низьких частотах в перетворювачах передбачається функція підвищення початкового значення вихідної напруги для компенсації спаду моменту.

Такого режиму керування достатньо для більшості застосувань в загальнопромислових електроприводах, в тому числі і для гвинтових компресорів. Разом з тим, якщо потребується підвищенні показники якості керування електроприводом, то застосовують інші більш досконалі методи (метод керування потокозчепленням, метод безсенсорного векторного керування).

Для того аби кількісно оцінити енергетичну сторону процесу регулювання продуктивності гвинтового компресора зміною частоти обертання його валу застосуємо вираз (2) в якому фігурує об'ємна продуктивність V_k в $\text{м}^3/\text{с}$, яка, як відомо, прямопропорційно залежить від частоти обертання ведучого гвинта компресорного блоку [5 – 7].

Розрахунок витрати потужності, що споживається гвинтовим компресором SCR1000 APM-8 при регулюванні його продуктивності зміною частоти обертання валу приводного електродвигуна, виконано для кожної з шести ділянок графіка добового споживання (рис. 8) на основі формул (2) та (12), а результати занесені до табл. 6.

Загальний ККД установки $\eta_{из} \cdot \eta_{д} = 0,475$ без урахування ККД перетворювача частоти, і з урахуванням – 0,447. Перше значення використовується для обчислення потужності без урахування втрат в перетворювачі частоти, а друге значення застосовується для обчислення витрати енергії на роботу компресорної установки з урахуванням цих втрат.

Параметри, що входять в формулу (2) для вказаного розрахунку отримали наступні значення:

- густина повітря при 273°K і тиску 0,1 МПа $\gamma_n = 1,293 \text{ кг/м}^3$;
- густина повітря в дійсних умовах $\gamma_d = 0,972 \text{ кг/м}^3$;
- початковий тиск повітря, що подається на вхід $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$;
- тиск стисненого повітря $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$;

3.5 Порівняння енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора SCR1000 APM-8

Зведені розрахункові витрати енергії компресором SCR1000 APM-8 з деталізацією по кожній ділянці графіку добового споживання за різних способів регулювання його продуктивності наведені на рис. 15.

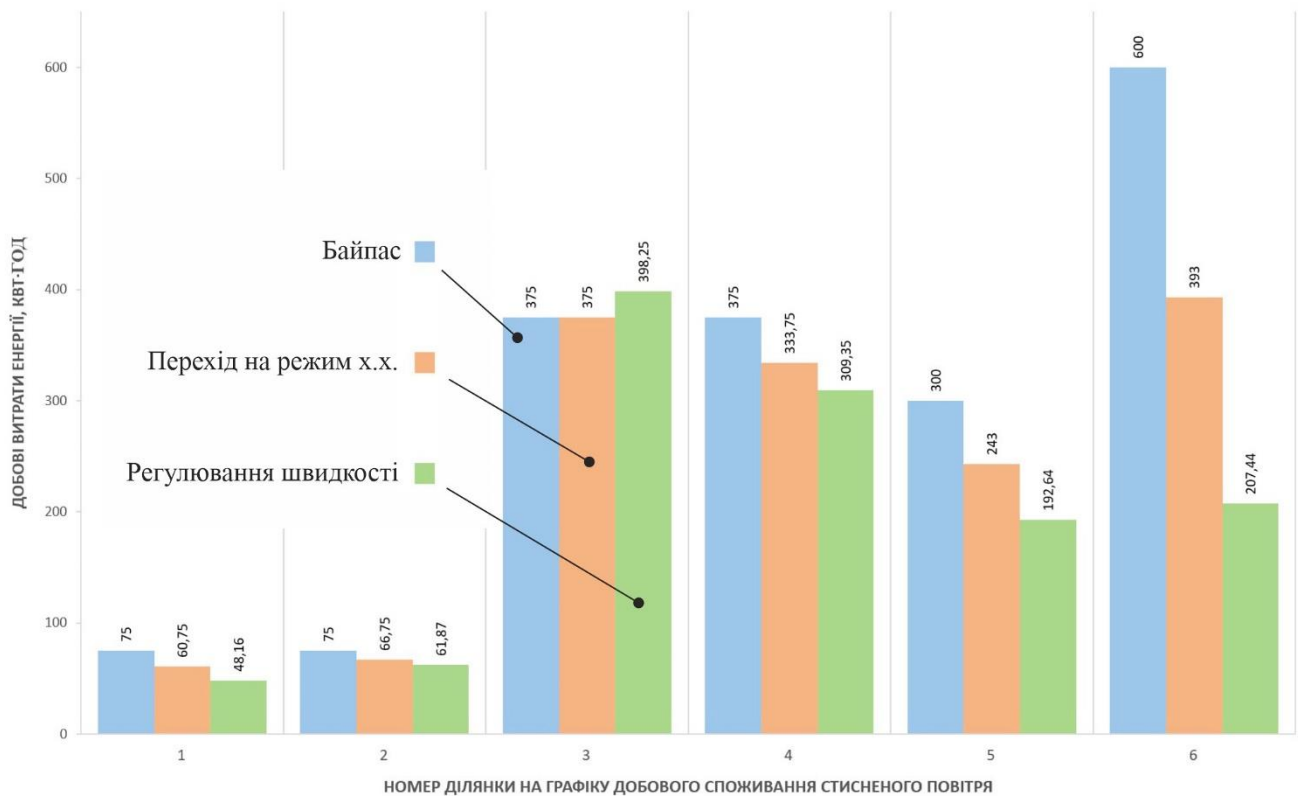


Рис. 15 – Діаграма витрат енергії компресором SCR1000 APM-8 по ділянкам графіку добового споживання за різних способів регулювання його продуктивності

Сумарні добові витрати енергії на роботу компресора за різних способів регулювання його продуктивності занесені до табл. 7.

Таблиця 7 – Добові витрати енергії на роботу компресора SCR1000 APM-8

Спосіб регулювання продуктивності	Добові витрати енергії W , кВт·год	%
Перепускання з нагнітання на всмоктування (байпас)	1800	100
Переведення компресора на режим холостого ходу	1472,25	81,79
Зміна частоти обертання валу приводного електродвигуна	1217,71	67,7

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Метод регулювання продуктивності компресора перепусканням з нагнітання на всмоктування (байпасування) здатен забезпечити безперервний процес регулювання але його необхідно відкинути, як такий, що не призводить до зниження споживаної потужності. Розрахункові добові витрати електричної енергії на роботу компресора SCR1000 АРМ-8 за графіком рис. 8 складають $W^{\text{байпас}} = 1800$ кВт·год, що є найбільшою величиною з усіх розглянутих способів, тому ця величина прийнята за 100 % (табл. 7) і надалі використовується для порівнянь з більш енергоефективними способами для обрахування кількісних показників їх енергоефективності.

Метод зміни продуктивності компресора шляхом автоматичного переведення на холостий хід є методом ступінчатого регулювання продуктивності. З діаграми рис. 15 видно, що коли компресор працює з 100 % продуктивністю (3-я ділянка на графіку добового споживання стисненого повітря) витрати енергії такі ж за величиною які при регулюванні перепусканням з нагнітання на всмоктування, що пояснюється відсутністю в системі додаткових перетворювачів. На всіх інших 5-ти ділянках графіку добового споживання (рис. 8) витрати є дещо меншими і в добовому обрахунку складають $W^{\text{xx}} = 1472,25$ кВт·год, що на $W^{\text{байпас}} - W^{\text{xx}} = 1800 - 1472,25 = 327,75$ кВт·год, менше ніж за попереднього способу. Тобто застосування методу регулювання продуктивності компресора шляхом переведення його на холостий хід дозволяє скоротити витрати електричної енергії на $\frac{W^{\text{байпас}} - W^{\text{xx}}}{W^{\text{байпас}}} \cdot 100\% = \frac{1800 - 1472,25}{1800} \cdot 100\% = 18,21\%$ в порівнянні з перепусканням з нагнітання на всмоктування. Завдяки відносній простоті реалізації вказаного способу і прийнятному рівні енергоефективності цей метод регулювання продуктивності отримав широке застосування в гвинтових компресорах.

Регулювання продуктивності гвинтового компресора зміною частоти обертання валу приводного електродвигуна є найбільш енергоощадним і технічно найбільш повно реалізується при використанні статичних напівпровідникових перетворювачів частоти (ПЧ) в структурі електропривода компресора. За такого способу регулювання продуктивності компресора SCR1000 АРМ-8 у відповідності з вище наведеним графіком добового споживання стисненого повітря (рис. 8)

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахункові витрати електричної енергії складуть $W^{ПЧ} = 1217,71$ кВт·год. Це є найменший показник з усіх розглянутих способів. Таким чином, використання даного способу регулювання продуктивності компресора дозволяє скоротити витрати електричної енергії на:

$$\frac{W^{\text{байпас}} - W^{ПЧ}}{W^{\text{байпас}}} \cdot 100\% = \frac{1800 - 1217,71}{1800} \cdot 100\% = 32,3\%$$

в порівнянні з перепусканням з нагнітання на всмоктування;

$$\frac{W^{xx} - W^{ПЧ}}{W^{xx}} \cdot 100\% = \frac{1472,25 - 1217,71}{1472,25} \cdot 100\% = 17,3\%$$

в порівнянні з переведенням його на холостий хід.

Крім того, використання в складі компресорної установки перетворювача частоти дозволяє отримати наступні переваги:

- плавний пуск (відсутність небезпечних кидків струму; зниження динамічних навантажень в механічній частині приводу);
- точне регулювання тиску (частота обертання компресора, а значить і продуктивність регулюються у відповідності з рівнем споживання стисненого повітря);
- робота електропривода з оптимальним ККД (робота без втрат напору в мережі призводить до зменшення втрат енергії).

Попередні розрахунки дозволяють отримати залежність величини споживаної потужності електроприводом компресора від величини відносного споживання стисненого повітря для різних способів регулювання його продуктивності. Ці кількісні дані для гвинтового компресора SCR1000 АРМ-8 зведено до табл. 8 і за ними побудовані графічні залежності $N = f(q_v)$ рис. 16.

Оскільки метод перепускання з нагнітання на всмоктування (байпас) не призводить до зниження споживаної компресором потужності, то його залежність $N = f(q_v)$ на рис. 16 представляє собою горизонтальну лінію і це є найменш ефективний метод регулювання.

Другим з точки зору ефективності є спосіб переведення компресора на холостий хід.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 8 – Потужність споживана електроприводом гвинтового компресора SCR1000 APM-8 за різних способів регулювання продуктивності

Величина відносного споживання стисненого повітря q_v	Потужність, що споживається електроприводом компресора за різних способів регулювання продуктивності N , кВт		
	Байпас	Перехід на режим х.х.	Регулювання швидкості (ПЧ)
0,31	75	49,125	25,93
0,62		60,75	48,16
0,78		66,75	61,87
1		75	79,65

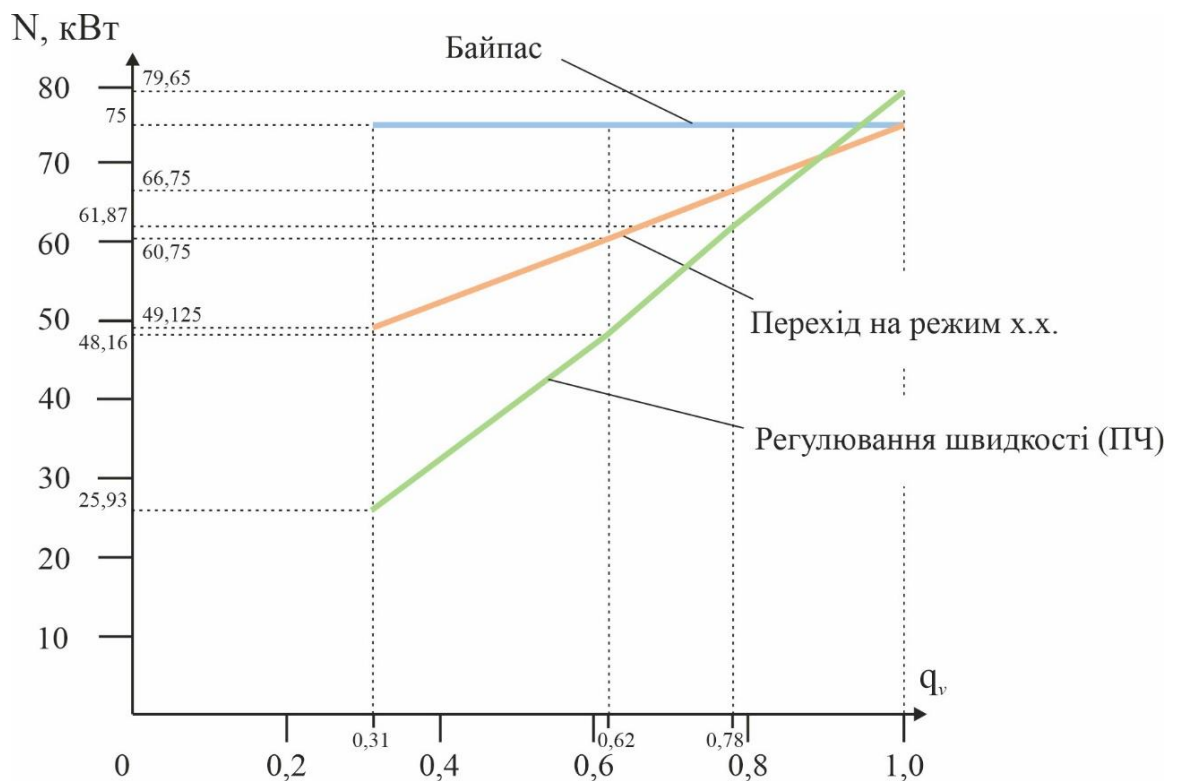


Рис. 16 – Залежність потужності від величини відносного споживання стисненого повітря за різних способів регулювання продуктивності

З приводу третього способу – зміною частоти обертання валу приводного електродвигуна, можна констатувати його високу енергоефективність для значень $q_v < 0,9$. Коли $0,9 < q_v \leq 1$ енергоефективність даного методу регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

найнижча з усіх трьох варіантів. Це пояснюється використанням у складі регульованого електропривода додаткового електронного регулятора (перетворювача частоти) який має власний ККД, що і призводить до погіршення енергетичних показників при повній продуктивності компресора (або близькій до повної).

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

БЕЗПЕКА ПЕРСОНАЛУ ТА ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ПІД ТИСКОМ

Стиснене повітря отримують за допомогою компресорних установок. Стиснене повітря доставляється або зберігається під тиском. Ємності або/та мережі, що працюють під тиском, і компресорні установки в процесі експлуатації становлять для персоналу небезпеку.

Значною мірою безпека виробничих процесів залежить від організації та раціональності планування цехів, дільниць, від рівня облаштуваності робочих місць, виконання вимог безпеки до виробничих приміщень, зберігання, транспортування, складання вихідних матеріалів, заготовок та готової продукції, а також від видалення відходів, їхньої утилізації, для дотримання вимог безпеки, що пред'являються до виробничого персоналу [16].

На сьогодні безпека є ключовим питанням. Підвищення рівня автоматизації технологічних процесів призводить до нових обмежень. Розповсюдження електроніки та програмного забезпечення потребує іншого підходу під час прийняття рішень, емпіричних правил виявляється не достатньо. Вибір в сучасних системах заснований на обрахуванні надійності та забезпечення її передбачуваної поведінки. В цьому контексті фаза проектування є принципово важливою. Дослідження показують, що причина більше 2/3 нещасних випадків має основою неякісне проектування. Тому на етапі проектування необхідно провести оцінку потенціальних ризиків і вибрати найбільш значимі для зменшення їх наслідків. Ці ризики класифіковані в законодавчих актах, там же визначений і процес їх оцінювання.

4.1 Визначення та області застосування пристроїв безпеки

Законодавство вимагає аби приймались профілактичні міри для захисту навколишнього середовища і здоров'я людини. Для досягнення цих цілей прийняті державні, галузеві стандарти, а в ЄС – Директиви.

Безпека робіт заснована на двох принципах: безпека і надійність роботи обладнання:

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- безпека – це здатність пристрою підтримувати ризик шкоди, що причиняється людині, в прийнятних межах;
- надійність роботи – це здатність системи чи пристрою зберігати і виконувати свої функції в часі в заданих умовах.

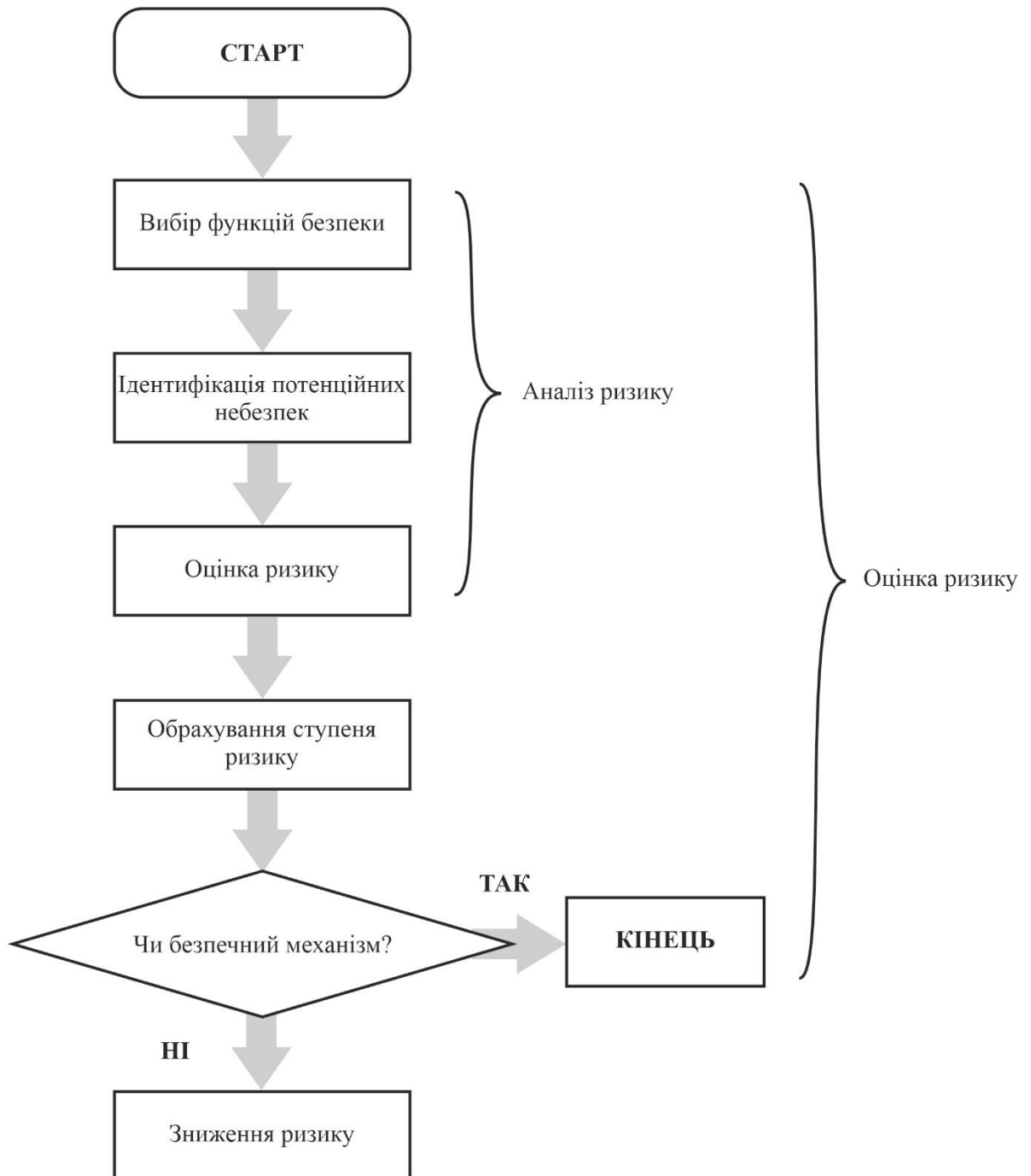


Рис. 17 – Процес зменшення ризиків

Механізми і виробничі приміщення є джерелами потенційного ризику, і промислові інструкції безпеки вимагають, щоб була проведена оцінка ризиків для

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

усього підприємства аби гарантувати, що будь-який потенційний ризик менший від прийнятного.

Стандарт ДСТУ EN/ISO 12100:2016 [17] дає наступне визначення ризику: ризик – це серйозність, помножена на вірогідність виникнення. Він описує ітеративний процес досягнення безпеки механізму чи системи, який дозволяє визначити ризик для кожної потенційної небезпеки і складається з чотирьох етапів. Цей метод забезпечує базу для необхідного зменшення ризику. На рис. 17 представлено даний ітеративний процес.

Нещасний випадок на виробництві може статись під час роботи чи на робочому місці і може нанести як легку, так і важку шкоду здоров'ю персоналу, що керує чи обслуговує механізм.

Причини нещасних випадків на робочому місці:

1. Людський фактор:

- недостатнє розуміння принципів роботи системи чи механізму;
- недооцінка небезпеки або ігнорування небезпечних ситуацій;
- недостатня увага до контрольованих задач (втома);
- неточне виконання усіх процедур;
- стрес, що наростає (шум, вібрація, темп роботи і інше);
- невпевненість в працевлаштуванні, що може призвести до неадекватному навчанню;
- неякісне чи погане обслуговування, що може призвести до непередбачених небезпек.

2. Фактори, пов'язані з механізмами:

- запобіжні пристрої, що не відповідають вимогам;
- надто складні системи керування та візуалізації;
- невіддільні небезпеки, що притаманні механізмам (зворотний рух, неочікуваний старт чи зупинка, неочікуване скидання тиску і інше);
- механізми, що не підходять для даного використання.

3. Виробничі фактори:

- переміщення персоналу;
- використання різних технологій в одному приміщенні;

									Лист
									51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.220220.ПЗ				

- переміщення матеріалів чи продукції між механізмами.

Наслідками нещасних випадків на робочому місці можуть бути:

- різного ступеня фізичні небезпеки для користувачів (персоналу);
- зупинка механізмів, що працюють;
- зупинка подібних механізмів для проведення інспекцій;
- внесення необхідних змін чи модернізація механізмів/установок для забезпечення відповідності вимогам інструкцій безпеки;
- заміна персоналу і навчання нового персоналу;
- шкода авторитету компанії.

Потенціальні небезпеки механізмів ділять на три основні групи:

- механічні небезпеки (порізи, переломи, ампутація, удари, стискання);
- електричні небезпеки (ураження електричним струмом);
- фізичні та хімічні небезпеки (викиди небезпечних речовин, опіки).

4.2 Європейське законодавство в сфері безпеки

Головна мета Європейських Директив з охорони праці 98/37/ЕС полягає у тому аби гарантувати мінімальний рівень безпеки для машин і обладнання, що експлуатується на європейському просторі. Таким чином, для того аби мати можливість вільно продавати машинне обладнання на території Європейського союзу воно має бути промарковане ЕС, а покупцю передана декларація ЕС про відповідність вимогам європейського законодавства.

Споживачу надаються гарантії у відповідності до директив безпеки 89/655/ЕСС, які засновані на усіх діючих стандартах. Даний комплекс стандартів є досить складним їх умовно можна поділити на три групи:

- стандарти типу **A**. Основні стандарти безпеки, які визначають фундаментальні поняття, принципи проектування і загальні аспекти, що застосовуються для усіх типів механізмів: EN ISO 12100;
- стандарти типу **B**. Стандарти безпеки, що визначають специфічні аспекти безпеки і окремі пристрої безпеки, що використовуються в обладнанні машин. Стандарти **B1** – визначають специфічні аспекти безпеки

										Лист
										52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	7.141.220220.ПЗ					

з ним. В залежності від можливих ризиків, щоби досягнути мети, достатньо застосувати ефективні безпекові рішення.

У відповідності до стандарту EN/ISO 13849-1 [18] процес повинен бути таким:

- аналіз небезпечних ситуацій і оцінка ризиків;
- вибір напрямків зменшення ризиків, що відносяться до кіл керування;
- визначення вимог до компонентів безпеки систем керування;
- проектування компонентів безпеки систем;
- визначення остаточного ризику.

Глобальний підхід: в складних системах вимог безпеки, що накладаються на окремі компоненти, недостатньо, аби гарантувати захист. Відмова будь-якої підсистеми може призвести до катастрофічних наслідків, як для людей, так і для навколишнього середовища. Виходячи з цього підхід до безпеки повинен носити глобальний характер.

Використання більш складних систем керування на базі електронного обладнання і програмного забезпечення виявило деякі суттєві недоліки стандарту EN 954-1:

- надійність компонентів не прийнята до уваги;
- відсутні вимоги до програмованих пристроїв;
- при об'єднанні компонентів, наявності сертифікату на окремі компоненти достатньо, аби «гарантувати» необхідний рівень ризику.

Враховуючи отриманий досвід проектування та експлуатації таких систем керування була проведена модернізація стандарту EN 62061, який включає також поняття функціональної безпеки. Даний стандарт пропонує дві важливі переваги:

- включені нові електронні та електронно-програмовані технології для забезпечення функцій безпеки;
- сумісний зі стандартом на системи, тому може використовуватись для механізмів.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Таблиця 9 – Класифікація компонентів по поведінці при виникненні несправності

Категорія	Поведінка системи	Принципи досягнення безпеки
B	Несправність може призвести до відмови функцій безпеки	Вибір відповідних компонент
1	Аналогічно категорії B, але потрібна більш висока надійність функцій безпеки	Вибір відповідних компонент
2	Несправність може призвести до відмови функцій безпеки між двома періодичними перевірками, і дана відмова виявляється при черговій перевірці	Самодіагностування
3	Для одиничної несправності функція безпеки гарантовано виконується. Поява декількох невиявлених несправностей може призвести до відмови функцій безпеки	Резервування
4	При виникненні несправностей функція безпеки гарантовано виконується. Несправності виявляються вчасно, що унеможливорює відмову функції безпеки	Резервування + самодіагностика

Параметр MTTFd – середнє напрацювання компонента до небезпечної відмови. Значення MTTFd менше ніж три роки є неприйнятним, оскільки означає, що після одного року роботи 30% компонент системи потребуватимуть заміни. Максимальне значення обмежено періодом в 100 років, оскільки надійність потенційно небезпечних пристроїв не повинна залежати від надійності окремих компонент.

Таблиця 10 – Категорії діагностичних можливостей

Індекс	Діапазон
Відсутність	DC<60%
Низький	60%<DC<90%
Середній	90%<DC<99%
Високий	99%<DC

Діагностичні можливості (DC) виражаються у відсотках і описують здатність діагностувати небезпечну несправність. Категорії діагностичних можливостей компонентів наведені в табл. 10.

4. Обрахування рівня якості (PL) кожного компонента.
5. Перевірка того, що досягнутий рівень якості (PL) більший або рівний необхідному рівню (PLr).
6. Підтвердження виконання усіх вимог.

Рішення повинно пройти тестування для того аби підтвердити, що комбінація виконує кожну функцію безпеки і задовольняє усім вимогам стандарту EN/ISO 13849.

Стандарт EN 62061 [19]. Визначає функціональну безпеку електричних, електронних і електронно-програмованих систем керування, що забезпечують безпеку. Стандарт застосовують для механізмів в складі складних структур, в ньому сформульовані правила інтеграції підсистем, що розроблені по стандарту EN/ISO 13849. Він не визначає вимоги до неелектричних компонент систем керування в механізмах. Він не охоплює небезпечні електричні явища, причиною яких може бути електричне обладнання керування.

У відповідності до стандарту EN/ISO 13849-1, необхідно проводити аналіз ризиків, в процесі якого формулюють вимоги по безпеці. Особливість даного стандарту в тому, що необхідно зробити функціональний аналіз архітектури, потім розкласти її на підфункції і проаналізувати їх взаємодію перед вибором апаратних засобів для їх реалізації. Таким чином в комплект проектної документації повинна бути включена схема функціональної безпеки. До її складу повинні входити:

- специфікація вимог безпеки для функцій безпеки, яка складається з двох частин:
 - опис функцій, інтерфейсів, режимів роботи, пріоритетів функцій, частоти пусків та інше;
 - специфікація комплексних вимог безпеки для кожної функції, що виражено в термінах SIL (рівень сукупної безпеки).
- структурований і документований процес розробки для електричних систем керування;

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

На основі аналізу ризику, виконується оцінка кожної небезпечної події і визначаються параметри (рис. 19), що наведені нижче:

- Серйозність можливої шкоди (Se), оцінюється виходячи з наслідків: повне відновлення здоров'я, невідворотність травми, летальний випадок;
- Вірогідність нанесення шкоди. Кожний з трьох параметрів Fr , Pr , Av оцінюється окремо за несприятливими факторами. Рекомендується використовувати моделювання аби гарантувати коректність оцінки вірогідності нанесення шкоди.

2. Кожна функція представляється у вигляді структури функціональних блоків (FB).

Функціональний блок (FB) є результатом детального розділення функції безпеки, за якого збій будь-якого з функціональних блоків викликає відмову функції безпеки. Вимоги безпеки до кожного блоку визначаються із специфікації вимог безпеки до функцій системи. Елементи, що виконують кожну функцію, повинні мати той же рівень SIL, що і система.

3. Формується список вимог безпеки до кожного функціонального блоку і призначаються функціональні блоки для підсистем в складі архітектури.

4. Вибір компонентів для кожної підсистеми.

5. Розробка діагностичних функцій і перевірка того, що описаний рівень сукупної безпеки (SIL) досягнуто.

Рівень (SIL) підсистеми залежить не тільки від вибраних компонентів, а від вибраної архітектури. Стандарт визначає 4 типи архітектури (Тип А, В, С та D).

Сертифікація та маркування СЕ.

Процес сертифікації і привласнення маркування СЕ механізмам складається з 6 етапів:

1. застосування усіх директив і стандартів, що відносяться до даного питання;
2. відповідність важливим вимогам з безпеки і охорони здоров'я;
3. складання технічної документації;
4. проведення експертизи відповідності;
5. складання декларації відповідності;

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

б. нанесення маркування CE.

В результаті маркування CE повинно бути нанесеним на механізм виробником або його офіційним представником в Європейському Союзі. Таке маркування є обов'язковим з 1 січня 1995 року і наноситься тільки у випадку, якщо механізм відповідає усім наступним стандартам:

- директива по охороні праці в машинобудуванні 98/37/ЕС;
- директива по електромагнітній сумісності 2004/108/ЕС;
- директива для обладнання низької напруги 2006/95/ЕС.

Маркування CE є паспортом механізму в Європейському Союзі, дозволяє вільний оборот даного продукту на ринках ЄС незалежно від законодавства окремих країн ЄС.

4.3 Безпека при обслуговуванні компресорних установок

Відповідно до правил та інших нормативних документів з техніки безпеки, адміністрація підприємства де експлуатуються компресорні установки розробляє інструкцію з безпечного обслуговування, а також забезпечує доведення її змісту до причетних осіб.

До обслуговування компресорних установок допускаються особи віком не менше 18 років, що придатні для цієї роботи за станом здоров'я, які пройшли відповідне навчання та отримали допуск [20]. Знання обслуговуючого персоналу з питань технічної та протипожежної безпеки обов'язкові при роботі на компресорній установці і мають перевірятись не рідше одного разу на рік.

Перед запуском компресора в роботу машиніст має обов'язково оглянути установку, впевнитись в її справності, перевірити сервісні системи (змащування, охолодження, сепарації та інше) і здійснити запуск у відповідності до інструкції.

Контроль витрати мастильних матеріалів (якщо такі використовуються в компресорі) ведуть кожну зміну з занесенням показника до спеціального журналу. Витрата мастильних матеріалів не повинна перевищувати вказану величину в заводській документації.

Запобіжні клапани компресорної установки, що працює під тиском до 12 кгс/см², щодобово перевіряються примусовим відкриттям під тиском [20]. Після

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закриття клапан має зберігати повну герметичність. Термін перевірки запірної арматури встановлюється технічним регламентом, але не менше одного разу на 6 місяців. Під час перерви в роботі, а також при виявленні будь-яких несправностей в компресорній установці, її необхідно зупинити.

Компресор негайно зупиняють у наступних випадках [16, 20]:

- якщо манометри компресора показують тиск, вищий від допустимого;
- якщо манометр системи змащування механізму руху показує тиск, нижчий від мінімально допустимого;
- при раптовій зупинці системи охолодження;
- якщо відчутні стуки, удари в компресорі або двигуні чи виявлено інші несправності, що можуть призвести до аварії;
- при температурі стисненого повітря вище гранично допустимого значення, що встановлюється паспортом і правилами;
- при пожежі, наявності запахів горіння або диму з компресорного блоку чи електродвигуна;
- при помітному збільшенні рівня вібрації компресорного блоку або електродвигуна.

Якщо виявлена несправність хоча б в одному з блоків чи механізмів компресорної установки її забороняється допускати в роботу. Усувати несправності контрольно-вимірювальної апаратури дозволяється тільки в присутності особи, яка відповідає за безпечну експлуатацію компресорної установки.

Кожний запобіжний клапан компресорної установки регулюється і опломбовується, також кожний клапан повинен мати механізм для примусового його відкривання під час роботи; натяжні гайки пружинних запобіжних клапанів також повинні бути опломбованими. Вантаж важільних запобіжних клапанів після регулювання закріплюють, закривають металевими кожухами і опломбовують [20]. Після регулювання запобіжних клапанів в обов'язковому порядку складається акт.

Перед запуском компресора в роботу необхідно встановити крани для продувки холодильника і повітрязбірника, а також розподільний вентиль в положення «Відкрито». Увімкнувши живлення електродвигуна, перевірити роботу

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

компресора на холостому ході, закрити спочатку розподільний вентиль, а потім крани для продувки. Після цього за допомогою розподільного вентиля або кранів продувки відрегулювати робочий тиск повітря в ресивері [20].

Обслуговуючий персонал під час експлуатації компресорної установки має контролювати [20]:

- тиск і температуру повітря на кожній ступені стиснення та після холодильників;
- безперервність надходження в компресори і холодильники охолодженої води;
- тиск, температуру і рівень мастила в системі мащення.

У відповідному журналі має реєструватись час пуску і зупинки компресора, причина зупинки, проведені перевірки клапанів і манометрів, спуск конденсату і мастила і інше. Щодобово журнал перевіряється і підписується особою, яка відповідає за безпечну експлуатацію компресорної установки [20].

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За показником енергоємності ВВП Україна в декілька разів перевищує показники розвинених країн Західної і Східної Європи. Зниження енергоємності економіки є однією з пріоритетних цілей державної політики в області енергетики, що чітко відображено в енергетичній стратегії України на період до 2035 року.

Найбільш високим потенціалом енергозбереження, з урахуванням тривалості режиму роботи і масового застосування, мають виробничі механізми і агрегати, що працюють в тривалому режимі із змінною продуктивністю. До таких механізмів відносяться і системи стисненого повітря основою яких є компресорні установки.

Аналіз потенціалу енергоефективності систем стисненого повітря показав, що застосування регульованого приводу компресора здатне дати зменшення річного енергоспоживання установкою в середньому на 15%. Ще 2% економії дає використання енергоефективних двигунів для приводу компресорного блоку.

Оскільки, як правило, до складу системи стисненого повітря промислового підприємства входить декілька компресорних установок, то загальну ефективність такої системи суттєво підвищується за рахунок впровадження центральної системи керування. Можливості таких систем багатократно зростають при використанні сучасних частотно-регульованих приводів компресорів.

В системах з одним компресором: оптимальним є режим функціонування системи, коли компресор безперервно працює з постійним значенням швидкості і оптимальним ККД. Якщо споживання стисненого повітря не є постійними, зупинка компресора чи його перехід на холостий хід під час тривалої перерви в споживанні є більш ефективним рішенням.

Стратегії керування системою з декількома компресорами включають також регулювання швидкості компресорів з метою мінімізації періоду роботи на холостому ході та кількості увімкнень компресорів без можливості регулювання швидкості. Додавання регульованого за швидкістю компресора в систему з декількома компресорами доцільно, коли система стисненого повітря характеризується відносно невеликим об'ємом ресивера, сильно чи швидко змінним в часі споживанням, малою кількістю компресорів.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Автором проведена порівняльна оцінка енергоефективності найбільш розповсюджених способів регулювання продуктивності гвинтового компресору: перепусканням з нагнітання на всмоктування; переведенням компресора на режим холостого ходу; зміною частоти обертання ведучого валу гвинтового компресора. Встановлено, що при зміні відносного споживання стисненого повітря в діапазоні від 0,31 до 1,0 перший спосіб не забезпечує зниження споживаної потужності, другий спосіб дозволяє знизити добове споживання електричної енергії на 18,21% в порівнянні з першим способом і третій спосіб здатен забезпечити найвищу енергетичну ефективність – добове споживання електричної енергії на 32,3% менше в порівнянні з першим способом та на 17,3% в порівнянні з другим способом. Також показано, що значень відносного споживання стисненого повітря вище 0,9 енергоефективність методу регулювання зміною частоти обертання компресора найнижча з усіх трьох варіантів. Це пояснюється використанням у складі регульованого електропривода додаткового електронного регулятора (перетворювача частоти) який має власний ККД, що і призводить до погіршення енергетичних показників при повній продуктивності компресора (або близькій до повної).

Враховуючи отримані результати, для підвищення енергоефективності систем стисненого повітря, можна рекомендувати:

- застосовувати для приводу компресорних блоків енергоефективні електродвигуни;
- в системах, що характеризуються відносно невеликим об'ємом ресивера, сильно чи швидко змінним в часі споживанням, малою кількістю компресорів хоча б у одного компресора має регулюватись швидкість обертання.

Розглянуті питання безпеки персоналу та обладнання систем під тиском. Вивчені особливості європейського законодавства в сфері безпеки.

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Текст] / схвалено розпорядженням кабінету міністрів України від 18.08.17. №605-р / Кабінет Міністрів України. – К., 2017р. – 73 с.
2. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
3. ДП «НЕК «Укренерго» [Електронний ресурс] / М-во палива та енергетики України. – К.: Укренерго, 2015. – Режим доступу: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>
4. Федоськіна Л. А. Дослідження світових тенденцій підвищення енергоефективності діяльності організацій / Л. А. Федоськіна, Е. І. Абрамов // Журнал Національні інтереси: пріоритети і безпека. – 2013. №39(228). – С. 44-53.
5. Компресорні станції: підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – 385 с.
6. Холоменюк, М.В. Компресорні установки [Текст]: навч. посібник / М.В. Холоменюк – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 51 с.
7. Paul C. Halon Compressor Handbook / ISBN 0-07-026005-2 / Mc Grow-Hill/2001. – 754 p.
8. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. February 2009 (corrected version as of 09/2021). European IPPC Bureau. – 398 p.
9. BS 1571-2:1975 Specification for testing of positive displacement compressors and exhausters – Methods for simplified acceptance testing for air compressors and exhausters. – 22 p.
10. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.

										Лист
										65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

- 1) Особливості промислових систем стисненого повітря, основні типи компресорів та області їх застосування;
- 2) Напрямки ефективного використання електроенергії електроприводами загальнопромислових компресорних установок;
- 3) Порівняльна оцінка енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора;
- 4) Порівняльна оцінка енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора;

					7.141.220220.ПЗ	Лист
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

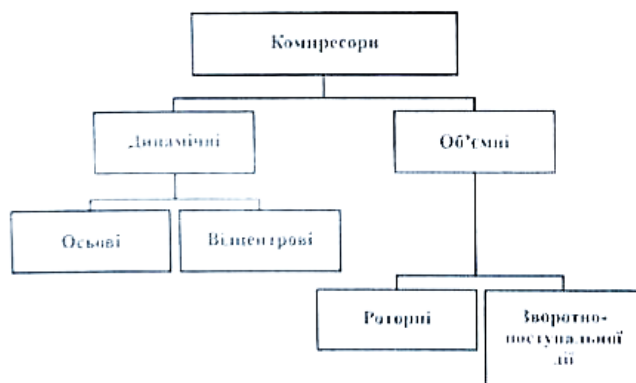
ДОДАТОК А
Графічні роботи

					7.141.220220.ПЗ	Лист
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

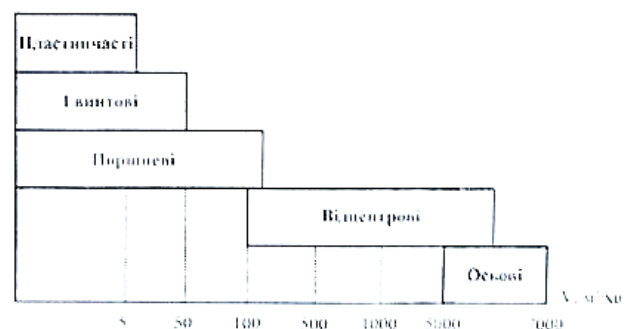
Структура споживання електроенергії галузями промисловості (%)

Галузь промисловості	Електропривод	Вентиляція та кондиціонування	Отримання стисненого повітря	Водопостачання	Освітлення	Технологічні установки	
						Електротермія	Електроліз
Нафтохімічна	52,5	5,6	6,2	32,7	3,0	-	-
Чорної металургії	59,2	3,3	4,7	8,7	2,2	21,9	-
Кольорової металургії	30,8	2,1	3,8	2,9	1,1	11,3	48
Хімічна	65,4	4,6	1,6	2,3	4,6	10,6	13,9
Важкого машинобудування	52,5	3,4	15,9	2,6	6,5	19,1	-
Електротехнічна	27,9	10,2	13,5	4,1	6,6	36,4	1,3
Автомобілебудування	46	6	16	2	5	19	6
Сільськогосподарського машинобудування	32,5	3,5	18,6	-	4,9	40,5	-
Целюлозно-паперова	80,1	3,3	3,5	8,9	2,3	1	0,9
Легка	81,4	3	-	-	11,3	4,3	-
Харчова	80,7	3,7	3,3	4,2	5,9	1,3	0,9
Верстатобудування	29,5	4,6	10,2	-	4,8	50,9	-
Приладобудування	50	0,5	10	2,5	9,4	27,3	0,3

Класифікація загальнопромислових компресорів



Класифікація компресорів



Сфери застосування повітряних компресорів

Особливості промислових систем стисненого повітря, основні типи компресорів та області їх застосування				
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафед.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>	2012
Н. контр.	Карцова О.О.		<i>[Signature]</i>	2012
Осн. верв.	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	06.11
Розробив	Гречуха В.М.		<i>[Signature]</i>	06.11
Додаток А 7.141.220220.01				
		Стад.	Аркуш	Аркушів
			69	72
Український державний університет науки і технологій, група EE2221				

Методи підвищення енергоефективності систем стисненого повітря

Метод підвищення енергоефективності	% застосування ¹	% енергозбереження ²	% потенційного вкладу ³	Примітка
Встановлення нової або реконструкція існуючої системи				
Удосконалення приводів компресорів (застосування високоефективних двигунів)	25	2	0,5	Найбільш ефективно в невеликих системах (<10 кВт)
Удосконалення приводів компресорів (регулювання швидкості)	25	15	3,8	Використовується в системах із змінним навантаженням. В системах з декількома приводами доцільно обладнати пристроєм регулювання швидкості тільки один з них. Оцінка потенціалу енергозбереження відноситься до системи в цілому, незалежно від кількості приводів.
Використання удосконаленої системи керування	20	12	2,4	
Утилізація тепла, що відходить для інших цілей	20	20...80	4,0	Даний метод приводить до збільшення загальної кількості доступної енергії, але не до зменшення її споживання.
Покращення процесів охолодження, сушки і фільтрації стисненого повітря	10	5	0,5	
Оптимізація загального улаштування системи, включаючи системи з декількома рівнями тиску	50	9	4,5	
Зменшення фрикційних втрат	50	3	1,5	
Оптимізація деяких пристроїв, що споживають стиснене повітря	5	40	2,0	
Експлуатація і технічне обслуговування системи				
Зменшення витоків повітря	80	20	16,0	
Частинна заміна фільтрів	40	2	0,8	
Разом			32,9	

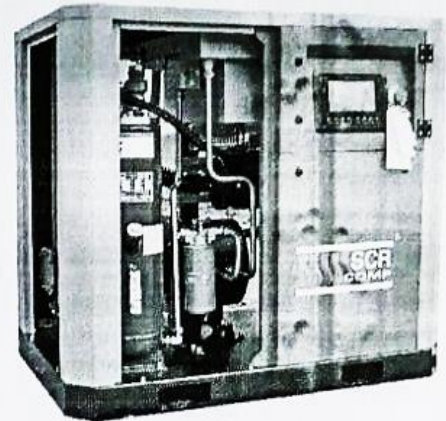
Зауваження до заголовка таблиці:

- (1) застосування – доля систем, де даний метод є економічно ефективним;
- (2) енергозбереження – зменшення річного енергоспоживання через застосування методу;
- (3) потенційний вклад – добуток застосування і енергозбереження.

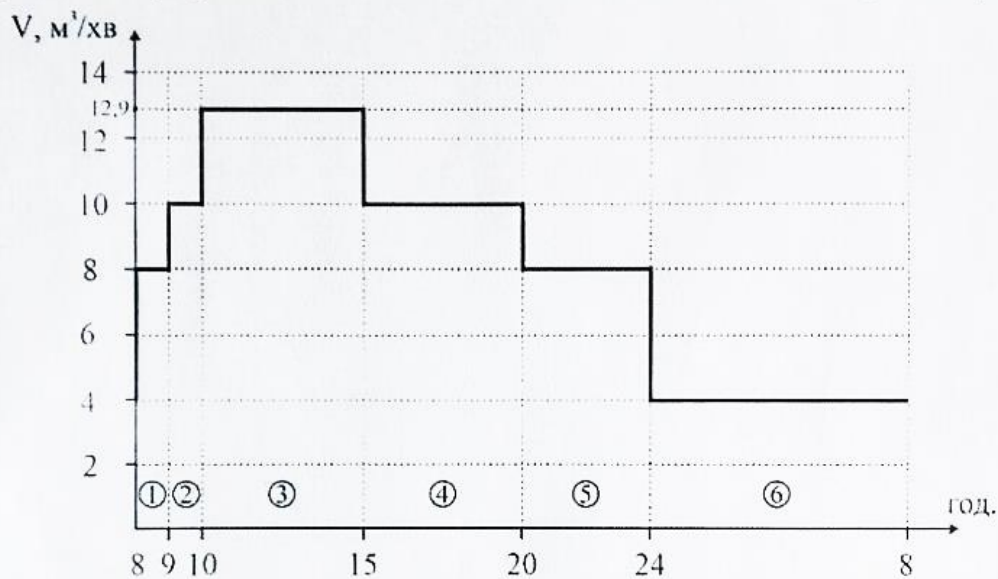
Напрямки ефективного використання електроенергії електроприводами загальнопромислових компресорних установок				
Зміг.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.		Муха А.М.		20.12
Н. контр.		Карзова О.О.		20.12
Осн. керів.		Устименко Д.В.		06.11.
Розробив		Гречуха В.М.		06.11
Додаток А 7.141.220220.02				
		Стад.	Аркуш	Аркушів
			70	72
Український державний університет науки і технологій, група ЕЕ2221				

Технічні характеристики та зовнішній вигляд гвинтового компресора SCR1000 APM-8

Параметр	Величина
Номінальна потужність приводного двигуна, кВт	75
Об'ємна продуктивність, м ³ /хв	12,9
Тиск, атм	8
Тип приводу	прямий
Маса, кг	1230
Габарити, мм	1800x1200x1550



Розрахунковий графік добового споживання стисненого повітря підприємства



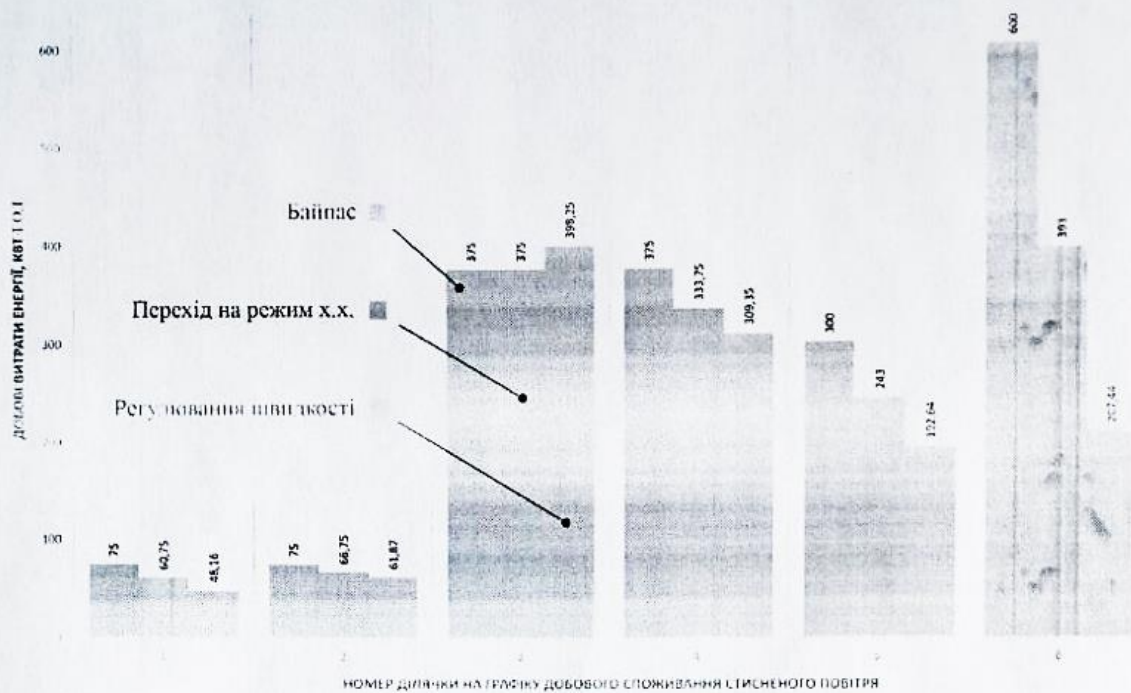
Добові витрати енергії на роботу компресора SCR1000 APM-8 за різних способів регулювання його продуктивності

Спосіб регулювання продуктивності	Добові витрати енергії <i>W</i> , кВт·год	%
Перепускання з нагнітання на всмоктування (байпас)	1800	100
Переведення компресора на режим холостого ходу	1472,25	81,79
Зміна частоти обертання валу приводного електродвигуна	1217,71	67,7

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Порівняльна оцінка енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора		
Зав. кафедр.		Муха А.М.	<i>[Signature]</i>	2012	Стад.	Аркуш	Аркушів
Н. контр.		Карлова О.О.	<i>[Signature]</i>	2012		71	72
Осн. керів.		Устименко Д.В.	<i>[Signature]</i>	06.11.	Український державний університет науки і технологій, група EE2221		
Розробив		Гречуха В.М.	<i>[Signature]</i>				

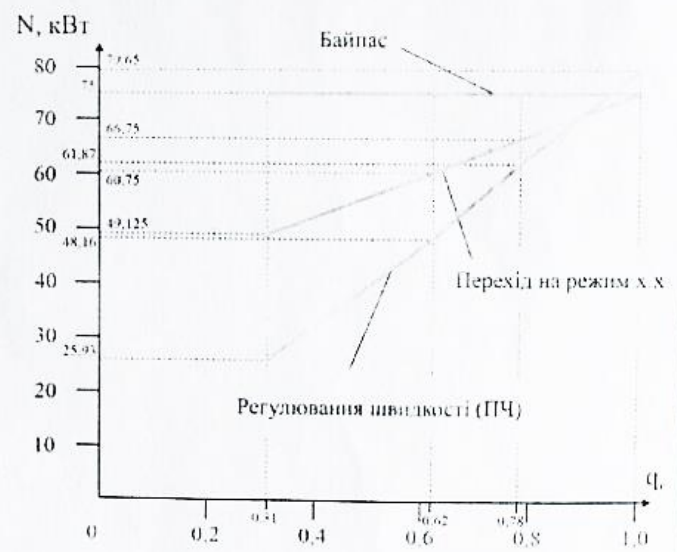
Додаток А
7.141.220220.03

Діаграма витрат енергії компресором SCR1000 АРМ-8 по ділянкам графіку добового споживання за різних способів регулювання його продуктивності



Потужність споживана електроприводом гвинтового компресора SCR1000 АРМ-8

q_v	Потужність, що споживається електроприводом компресора N , кВт		
	Байпас	Перехід на режим х.х.	Регулювання швидкості
0,31		49,125	25,93
0,62	75	60,75	48,16
0,78		66,75	61,87
1		75	79,65



Залежність потужності від величини відносного споживання стисненого повітря

Порівняльна оцінка енергоефективності різних способів регулювання продуктивності гвинтового компресора				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Зав. кафедр.	Муха А.М.		<i>[Signature]</i>	06.11
Н. контр.	Карцова О.О.		<i>[Signature]</i>	06.11
Осн. керів	Устименко Д.В.		<i>[Signature]</i>	06.11
Розробив	Гречуха В.М.		<i>[Signature]</i>	06.11

Додаток А
7.141.220220.04

Стад.	Аркуш	Аркуши
	72	72

Український державний університет науки і технологій, група EE2221