

# Енергоефективність пневмосистем в рамках можливостей промислової революції 4.0

Ю.А. Лукашук<sup>1</sup> • І. Бем<sup>2</sup> • О.В. Левченко<sup>3</sup>

1 - Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна;

2 - Магдебурзький університет імені Отто-фон-Гьоріке, Магдебург, Німеччина;

3 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 07 June 2018 / Accepted: 18 September 2018

***Анотація.** Розглянуто існуючі засоби, які можуть бути використані для побудови і подальшого використання в інженерній практиці систем автоматичного визначення стану блоків підготовки стисненого повітря. Запропоновано концепцію автоматичного визначення стану блоку підготовки стисненого повітря із застосуванням можливостей промислової революції 4.0 шляхом застосування датчиків тиску і електронних манометрів і обробки їх сигналів за допомогою SCADA-системи. Запропоновано проводити автоматичне визначення технічного стану блоків підготовки стисненого повітря як компресорної станції, так і окремих споживачів на основі методу активного діагностування технічного стану блоків підготовки повітря, заснованого на визначенні перепаду тиску, як на всьому блоці та й на окремих його компонентах. Запропоновано новий інтелектуальний спосіб визначення технічного стану блоків підготовки повітря за допомогою спеціальних алгоритмів функціонування автоматизованих систем управління технологічними процесами.*

***Ключові слова:** пневматична система, енергетична ефективність, промислова революція 4.0.*

## Вступ

Стиснене повітря є одним з найважливіших компонентів, який використовується на багатьох виробництвах, таких як автоскладальні виробництва, складання дрібних деталей, хімічні та нафтохімічні підприємства, медичні та фармакологічні технології, кінцеві стадії упакування продукції, системи приготування води та інших середовищ, деревообробна промисловість та інші. Основні переваги використання – краща вибухо- та пожежобезпека компонентів пневматичних мереж (ПМ) у порівнянні з електричними мережами, можливість передачі енергії, яку має стиснене повітря, на великі відстані (на весь цех або ж підприємство), відносна простота конструкції, експлуатації та обслуговування, низька собівартість, можливість використання обладнання у різних умовах за температурою, вологістю, запиленістю тощо. На виробництво стисненого повітря у країнах Європи витрачається близько 10% електроенергії, що відповідає енергії 80 терават-годин на рік [1-4].

У зв'язку з тим, що ПМ є ключовим компонентом багатьох виробничих процесів, для таких виробництв, як наслідок, є надзвичайно важливим питання енергоефективності (ЕФ) мереж та ефективності самого виробництва. Ми можемо говорити про те, що, якщо є ефективне підприємство та результатами виробничих процесів є чистий прибуток, що дозволяє і надалі вести виробничу та комерційну діяльність, шукати нові ринки збуту, модернізувати виробництво, розробляти та виробляти нову продукцію, повинні бути і енергоефективні мережі. І навпаки, якщо мережі мають низький рівень енергоефективності, говорити про ефективне та конкурентне виробництво фактично неможливо [5-6].

На жаль, на сьогодні, маючи інструменти та програмно-апаратні комплекси оцінки енергоефективності Третьої промислової революції, немає економічно доцільної можливості отримати реальні дані у реальному часі щодо ПМ та виробничого процесу як цілісного комплексу. Теперішні оцінки побудовані на універсальних показниках, які не дозволяють врахувати багато чинників, тим більше у реальному часі. Основною формулою розрахунку є відношення кількості витраченої енергії на одиницю продукції. Можна мати низьке споживання енергії, але якщо постійно витрачати великі кошти на ремонт обладнання через неповну відповідність обладнання потребам виробництва, низьку якість повітря, наявності часток мастила, бруду у ПМ, низький рівень технічної освіти персоналу, неможливо сказати, що при досить високій енергоефективності, ми будемо мати ефективне виробництво.

### Викладення основного матеріалу

З технологічних розробок та програмного забезпечення, що зараз з'являються на ринку, як наслідок впровадження Промислової Революції 4.0 (ПР 4.0), можна зазначити, що одним з результатів впровадження ПР 4.0 буде отримання оцінки реальної ЕФ у реальному часі, починаючи зі стадій техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) доцільності виробництва та проектування.

Розглянемо можливості оцінки ЕФ на стадії проектування в середовищі програмного продукту SolidWorks (SW). SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS — технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-програмами та створення інтерактивної документації [7-9]. На наш погляд, основним результатом використання програми SW, як компоненту технологій ПР 4.0, повинно бути отримання математичної моделі ПМ, що допоможе нам отримати такі рішення:

1. Вибір найбільш енергоефективного рішення при проектуванні ПМ.
2. Моніторинг стану ПМ у реальному часі.
3. Візуалізація стану ПМ у реальному часі.
4. Централізоване керування роботою усієї системи, в т.ч. і дистанційне.
5. Реагування на аварійні ситуації у реальному часі.
6. Перерозподіл ресурсів у випадку аварійної ситуації.
7. Аналіз отриманих даних з метою попередження можливих аварійних ситуацій.
8. Архівація даних з метою отримання статистичної та технічної інформації стану ПМ.
9. Планування – можливість попереднього розрахунку ККД системи по кількості затрачених матеріальних та людських ресурсів та порівняння з реальним результатом.
10. Моніторинг та оперативне управління людськими ресурсами, які задіяні у обслуговуванні та ремонті ПМ.
11. Контроль за планово-попереджувальними та аварійно-відновлювальними роботами.
12. Планування та проведення вчасних планово-попереджувальних робіт згідно графіка обслуговування обладнання.
13. Підтримання постійного рівня необхідних матеріалів та запасних частин на складі.

Основними компонентами ПМ є: система виготовлення стисненого повітря за допомогою компресорів – компресорна станція (КС), система підготовки стиснутого повітря (СП) до якості, необхідної для використання в обладнанні підприємства, система транспортування та розподіл СП, та обладнання, що безпосередньо використовує СП.

Кожен з цих компонентів може бути модернізований з метою підвищення ефективності за допомогою технологій ПР 4.0.

Щодо КС – на виробництвах зазвичай використовують два і більше компресорів. Технології ПР 4.0 вже дозволяють оптимізувати роботу компресорів за допомогою системи «розумного керування», а саме:

- маючи зворотній зв'язок у реальному часі із ПМ, виробляти стільки стиснутого повітря, скільки потребує мережа. Організувати роботу компресорів у каскаді, за алгоритмом – спочатку працює один компресор, якщо його продуктивності бракує, вмикається наступний, далі наступний, поки не будуть повністю задоволені потреби у СП. Такий алгоритм дозволяє запрограмувати кількість робочих годин для компресора, який є головним (той, що вмикається першим) та при напрацюванні певної кількості годин, перемикає на наступний компресор, зробивши його головним, для того щоб усі компресори мали однаковий час напрацювання. Приклад такої системи керування запропоновано голландською компанією Ingersoll Rand Automation (рис. 1), результатом використання якої є мінімізація споживання електроенергії, продовження терміну експлуатації основного обладнання, робота КС у «комфортних» умовах при тому, що СП є більш якісним за витратою та тиском;
- основою роботи компресора є електродвигун. У випадку, коли мінімальна продуктивність двигуна є більшою від потреби у СП, доцільно застосовувати автоматичне регулювання частоти (АРЧ) шляхом використання

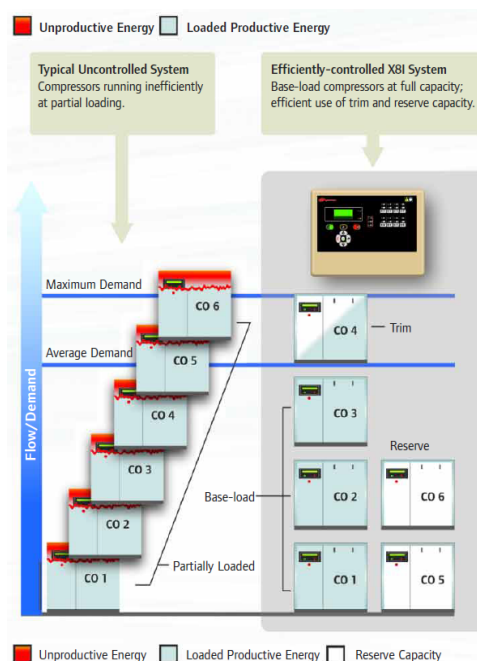


Рис. 1. Система керування КС від Ingersoll Rand Automation у порівнянні із загальноприйнятою схемою

- перетворювачів частоти, що дозволяє зменшити потужність двигуна без шкоди для нього та мінімізації режиму «тактування» або «старт-стопу», при якому питома витрата електроенергії є максимальною;
- рекуперация тепла, що утворюється при стисканні повітря, може бути використана для підігріву холодної води для господарських або побутових цілей;
  - за допомогою спеціальних датчиків контролю за певними параметрами, може бути визначений стан електродвигуна, потреба в ремонті або технічному обслуговуванні, що на практиці вже реалізовано компанією ABB [5];
  - програмне забезпечення таких КС інтегрується у загальну SCADA систему, що дозволяє оперативно оцінювати стан КС.

Таблиця 1

**Параметри автоматизації компресорної станції**

№ п/п	Параметр	Керування
1.	Вмикання-вимикання КС у автоматичному режимі	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС, протокол типу ModBus
2.	Дистанційне керування роботи КС	Мережа Ethernet
3.	Контроль за станом та управління системою автоматичних перетворювачів частоти (з метою мінімізації енергозатрат при зниженому споживанні СП)	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС за протоколом типу Profibus
4.	Контроль за станом системи захисту від перевантажень КС	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
5.	Виробництво СП відповідно до потреб споживачів шляхом інтеграції системи диспетчеризації та управлінням КС у загальновиробничу систему	Мережа Ethernet, через SCADA
6.	Каскадне керування компресорами	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
7.	Управління охолоджувальним контуром	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
8.	Управління системою осушування повітря	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
9.	Керування відсічною арматурою	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
10.	Керування системою вентиляції та кондиціонуванням КС	Центральний процесор КС, зв'язок з контролерами КС
11.	Контроль за станом пневморесивера (за тиском)	Центральний процесор КС
12.	Візуалізація та архівація параметрів стану КС	Центральний процесор КС
13.	Оцінка ефективності роботи КС за певними параметрами: - температура масла (у випадку масляних компресорів); - температура теплоносія контуру охолодження; - кількість виробленого СП; - кількість спожитої електроенергії; - час знаходження у вимкненому стані (ремонт, обслуговування, тощо).	Центральний процесор КС за протоколом типу Profibus

**Стабілізація тиску у пневмережах**

Стабілізація тиску стисненого повітря у пневмережах є дуже важливою для надійного та безаварійного режиму роботи споживачів СП. На виробництві з великою кількістю різних споживачів, які працюють в різних режимах, мають різні рівні споживання СП, знаходяться на різних відстанях від джерела повітря, тиск в пневматичних мережах постійно та хаотично змінюється, що може привести до небажаних наслідків. Щоб стабілізувати тиск та запобігти передчасному виходу з ладу обладнання, зупинки виробництва, або навіть аварійним ситуаціям, використовуються регулятори або редуктори тиску. Вони встановлюються як на КС так і безпосередньо перед споживачами або групами споживачів СП за технологічним показниками.

Розглянемо ситуацію (рис. 2), коли споживач має три окремі лінії споживання СП з різними параметрами та необхідністю стабілізувати роботу кожної лінії за індивідуальними параметрами безпосередньо на виході з КС. В таблиці 2 зазначені параметри споживання СП, при  $P_{роб}$  (надл) на виході з КС = 7,5 бар, температура стиснутого повітря +20°C.

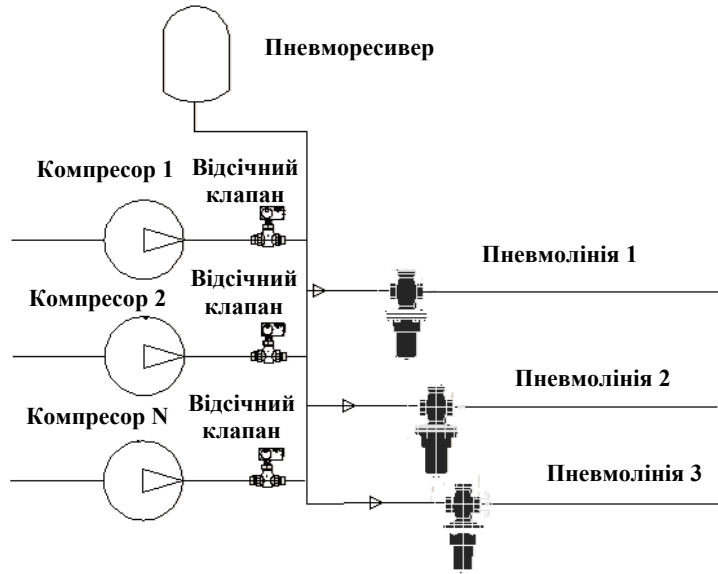


Рис. 2. Стабілізація тиску у пневмережах

Для розрахунку використовуємо методику Samson та програмне забезпечення Samson Valve Sizing.

Таблиця 2

**Параметри споживання стисненого повітря**

№ п/п	Назва споживача	Тиск в лінії, P <sub>надли</sub> , бар	Витрата мін, м <sup>3</sup> /год	Витрата роб, м <sup>3</sup> /год	Витрата макс, м <sup>3</sup> /год	Кв мін, м <sup>3</sup> /год	Кв роб, м <sup>3</sup> /год	Кв макс, м <sup>3</sup> /год	Ду клапана, мм
1	Пневмолінія 1	2	20	60	80	0,15	0,45	0,61	15
2	Пневмолінія 2	4	40	100	150	0,33	0,84	1,26	15
3	Пневмолінія 3	6,5	200	2000	3000	2,69	27,1	40,7	65

Header	Process data	Medium data	Valve 1	Valve 2	Pipe	Actuat.
Case	1	2	3			
Qn [m <sup>3</sup> /h(N)]	20	60	80	Series		
p1 [bar(g)]	7,5	7,5	7,5	Type		
p2 [bar(g)]	2	2	2	DN [mm]	15	
t1 [°C]	20	20	20	PN	16	
				Body mat.	EN-JL1040	
				Noise red.	without	
				Kvs	1	
				Character.	Equal perc.	
				Flow direct.	FTO	
				travel [mm]	15	
				Sb [mm]	6	
Result valve	Factors 1	Factors 2	Result act.			
Kv	0,149	0,449	0,605			
Req. DN [mm]	4,97	8,61	9,94			
w [Mac]	0,0329	0,0987	0,132			
SPL [dB(A)]	47	55	59			
Flow						

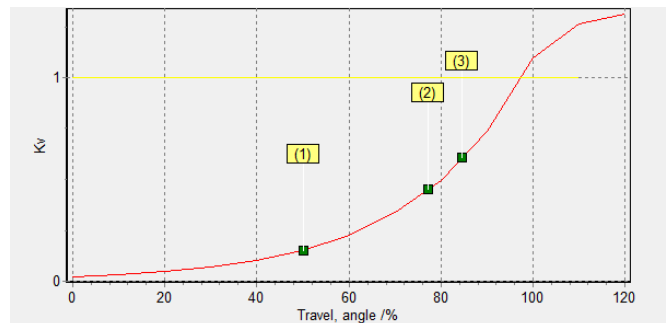


Рис. 3. Моделювання першої пневмолінії

Header	Process data	Medium data	Valve 1	Valve 2	Pipe	Actuat.
Case	1	2	3			
Qn [m <sup>3</sup> /h(N)]	40	100	150	Series		
p1 [bar(g)]	7,5	7,5	7,5	Type		
p2 [bar(g)]	4	4	4	DN [mm]	15	
t1 [°C]	20	20	20	PN	16	
				Body mat.	EN-JL1040	
				Noise red.	without	
				Kvs	1,6	
				Character.	Equal perc.	
				Flow direct.	FTO	
				travel [mm]	15	
				Sb [mm]	12	
Result valve	Factors 1	Factors 2	Result act.			
Kv	0,331	0,835	1,26			
Req. DN [mm]	5,45	8,61	10,5			
w [Mac]	0,0396	0,0989	0,148			
SPL [dB(A)]	48	54	60			
Flow						

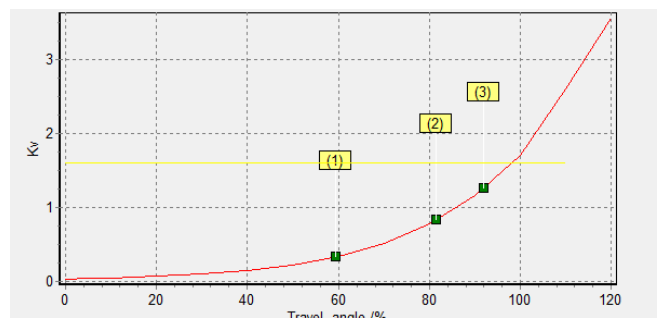


Рис. 4. Моделювання другої пневмолінії

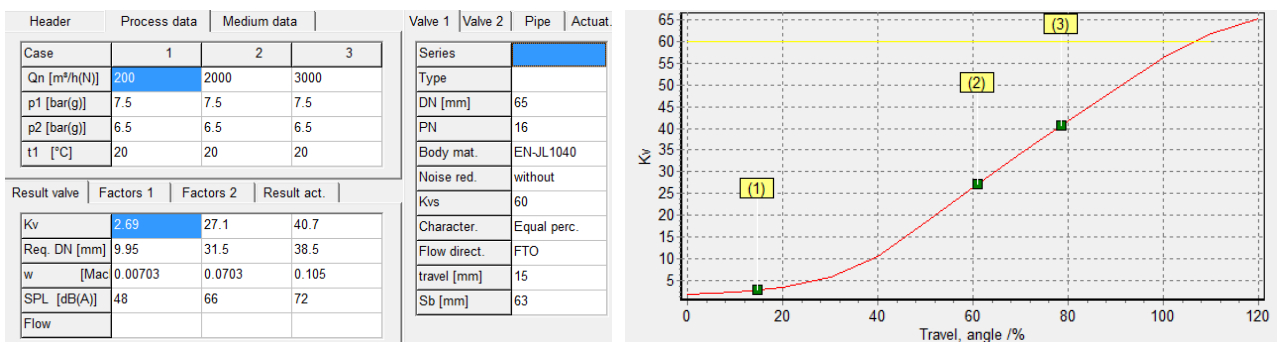


Рис. 5. Моделювання третьої пневмолінії

Цим розрахунком ми отримуємо вибір клапанів не тільки за витратою, але й за нормативними показниками швидкості потоку повітря у пневмережах (Mac або м/с) та рівнем шумів на клапані (dB), де кожній мінімальній, робочій та максимальній витраті на графіку відповідає певна робоча точка (відсоток відкриття робочого механізму клапана), поз. 1, 2 та 3 відповідно.

Згідно розрахунку, для забезпечення надійного регулювання тиску, ми можемо вибрати один з 3-х типів клапанів: регулятор прямої дії, клапан з електро- та пневматичним приводами. Стандартні регулятори прямої дії, клапани з пневмо- та електроприводами дозволяють нам тримати тиск з похибкою у деяких випадках до  $\pm 10\%$ . У випадках, коли треба тримати тиск з меншою похибкою, можна додатково використовувати приводні клапани з позиціонерами, що дозволяють тримати тиск з точністю до  $\pm 1,5\%$ . Позиціонери керуються за допомогою аналогових сигналів по напрузі 0...+10 В або по струму 4...20 мА. Використання позиціонерів дає можливість керувати потоками повітря в магістралях з часом реакції набагато меншим, ніж звичайною привідною технікою та отримати зворотній зв'язок про стан клапана (закритий, % відкриття, аварійна ситуація). Це відбувається за допомогою програмного забезпечення виробника клапанів, що інтегрується у SCADA систему. Використання позиціонерів дозволяє не тільки більш якісно стабілізувати потоки повітря, але й економити енергоресурси, не витрачаючи енергію на компенсацію стрибків тиску та дозволяє споживачам СП працювати в більш комфортних умовах, і, як наслідок, експлуатуватися більший термін.

Для забезпечення ефективного регулювання тиску повітря, треба також вказати на необхідність правильного вибору клапанів при експлуатації не тільки на робочому режимі, але й на мінімальних та максимальних режимах. Нормальна робота клапана, зазвичай, забезпечена виробником в межах 20...80% пропускної здатності або рівнем відкриття клапана. У випадках, якщо максимальна витрата повітря є вищою, ніж 95% пропускної здатності, ми можемо отримати ситуацію, коли клапан повністю відкритий, але тиск на виході відрізняється від заданого, так як клапан просто не може регулювати таку витрату, а у випадку, коли мінімальна витрата є меншою, ніж нижній рівень діапазону регулювання, ми отримуємо режим роботи клапану типу «старт-стоп» (тактування), що приведе до дуже швидкого виходу його з ладу.

### Система підготовки стисненого повітря

Якісна система підготовки повітря є основою для ефективної роботи пневмосистеми (ПС). Наявність у СП вологи, механічних домішок, мастила швидко призводить до виходу компонентів ПС з ладу. Волога, що знаходиться у СП, призводить до іржавіння металевих компонентів, при падінні температури нижче 0°C може перетворюватись на лід, при попаданні вологи на металеві компоненти, можливе утворення, через наявність статичного заряду, електричних потенціалів, що можуть зашкодити електронному обладнанню ПМ. Механічні домішки, що попадають на поверхні тертя, призводять до збільшення зносу та поступового виходу з ладу обладнання без можливості відновлення. Слід зазначити, що системи підготовки стиснутого повітря (СПСП) є різними за місцем встановлення – СПСП компресорної станції та СПСП безпосередньо споживача або групи споживачів. Якщо на підприємстві використовуються масляні компресори, це може призводити до потрапляння залишків компресорного мастила у ПС.

На СПСП компресорної станції в таких випадках мастило повинно відділятися на масловідділювачах та спеціальних фільтрах. В таких випадках використовується батарея фільтрів, з ступенем фільтрації до 0,01 мм включно. Водночас навіть ці заходи не завжди забезпечують повного відділення компресорного масла. Наявність масла у пневмомагістралях може призвести до того, що його поєднання з вологою та механічними домішками призводить до скупчення і, як наслідок, до передчасного виходу з ладу компонентів мереж. В кінцевому результаті, через неякісне повітря, вся пневмосистема підприємства може вийти з ладу та викликати повну зупинку виробництва.

Сучасні компоненти пневмосистем, як правило, покриваються шаром змазки, яка розрахована на весь термін експлуатації пневмоапаратури (пневмоциліндри, редуктори, пневморозподільники тощо), але ця змазка є несумісною з компресорним маслом, так як деякі ущільнення (наприклад, зроблені з певних полімерів) через контакт з компресорним маслом втрачають свої механічні та хімічні властивості. Тобто при проектуванні та

виборі обладнання компресорної станції слід враховувати можливість спільного використання масел пневмоапаратури та компресорного масла.

SOLID PARTICLES / DUST			
Class	Max. particle count per m <sup>3</sup> of a particle size with d* (µm)		
	0.1 < d ≤ 0.5	0.5 < d ≤ 1.0	1.0 < d ≤ 5.0
0	Consult Kaeser		
1	≤ 20,000	≤ 400	≤ 10
2	≤ 400,000	≤ 6,000	≤ 100
3	not specified	≤ 90,000	≤ 1,000
4	not specified	not specified	≤ 10,000
5	not specified	not specified	≤ 100,000
Class	Particle concentration* C <sub>p</sub> (mg/m <sup>3</sup> )		
6	0 < C <sub>p</sub> ≤ 5		
7	5 < C <sub>p</sub> ≤ 10		
X	C <sub>p</sub> > 10		

HUMIDITY AND LIQUID WATER		
Class	Pressure dew point	
	0	Consult Kaeser
1	≤ -70°C	≤ -94°F
2	≤ -40°C	≤ -40°F
3	≤ -20°C	≤ -4°F
4	≤ 3°C	≤ 38°F
5	≤ 7°C	≤ 45°F
6	≤ 10°C	≤ 50°F
Class	Concentration of liquid water* C <sub>w</sub> (g/m <sup>3</sup> )	
7	C <sub>w</sub> ≤ 0.5	
8	0.5 < C <sub>w</sub> ≤ 5	
9	5 < C <sub>w</sub> ≤ 10	
X	C <sub>w</sub> > 10	

OIL		
Class	Total oil concentration* (liquid, aerosol, and vapor)	
	(mg/m <sup>3</sup> )	(ppm w/w)
0	Consult Kaeser	
1	≤ 0.01	≤ 0.008
2	≤ 0.1	≤ 0.08
3	≤ 1.0	≤ 0.8
4	≤ 5.0	≤ 4
X	> 5.0	> 4

Рис. 6. Вимоги до якості стисненого повітря у відповідності до стандарту ISO 8573-1 (2010) щодо наявності твердих частинок, пилу, води та масла (дані вказані при температурі +20°C, абсолютному тиску 1 бар, відносній вологості 0%)

З метою стандартизації обладнання, що використовується для підготовки повітря, та відповідній класифікації споживачів стисненого повітря, був прийнятий стандарт ISO 8573-1 (рис. 6), в якому зазначені вимоги до якості повітря за відносною кількістю механічних домішок, пилу, води та масла за різними класами.

Достатньо цікавим рішенням щодо систем підготовки повітря безпосередньо для окремого споживача або групи споживачів є система підготовки повітря німецької компанії Festo (рис. 7), яка дозволяє за допомогою інтелектуального блоку модульної конструкції отримати на виході стиснене повітря необхідної якості у відповідності до загальнопромислових та загальносвітових стандартів [10].

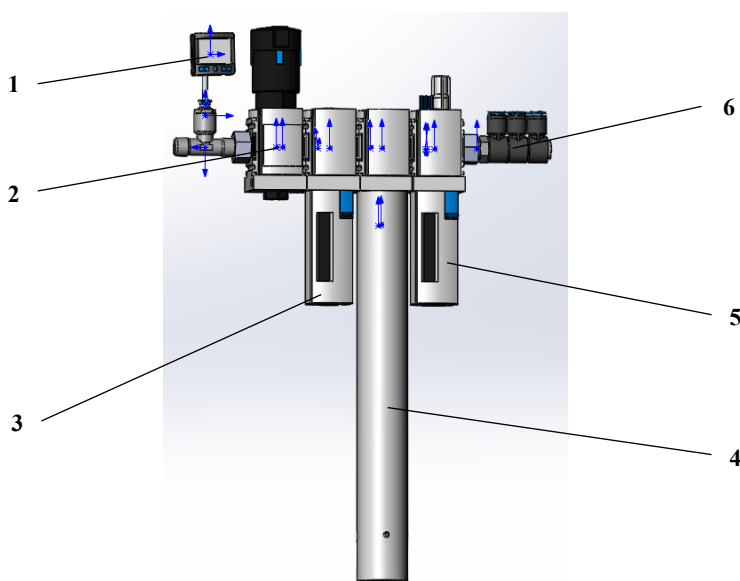


Рис. 7. Модульна система підготовки повітря компанії Фесто:  
1 – інтелектуальний електронний блок керування тиском повітря,  
2 – редукційний клапан, 3 – фільтр, 4 – вологовіддільувач,  
5 – маслорозпилювач, 6 – колектор

**Висновки.** За допомогою комбінації компонентів та модифікацій обладнання для підготовки стисненого повітря стало можливо отримати необхідну якість повітря, яка відповідає потребам підприємства та здатна забезпечити довгострокову безвідмовну роботу пневматичних систем. За допомогою інтелектуальних електронних блоків та датчиків тиску, які змонтовані на вході в блок підготовки повітря (тиск  $P_1$ ), та виході (тиск  $P_2$ ), може бути отримана інформація про стан блоку підготовки повітря. Це вдалось реалізувати за рахунок відомих норм втрат тиску по кожному з видів обладнання, в залежності від витрати повітря, яке проходить через блок підготовки. Шляхом внесення в проект математичних моделей кожної складової блоку підготовки повітря, то шляхом порівняння тисків  $P_1$  та  $P_2$ , отриманих в реальному часі протягом виробничого процесу, з проектними тисками, які були занесені в

математичну модель блоку підготовки повітря при проектуванні та з реальними даними при експлуатації, розроблено методу визначення актуального стану блоку підготовки повітря та передбачено час його можливого виходу з ладу. Використовуючи можливості Промислової Революції 4.0, шляхом передачі сигналів від датчиків тиску до SCADA-системи запропоновано автоматичне визначення стану блоку підготовки повітря та автоматизовану розробку плану проведення сервісних робіт або ж заміни всього блоку підготовки повітря чи його компонентів.

## Энергоэффективность пневмосистем в рамках возможностей промышленной революции 4.0

Ю.А. Лукашук, И. Бем, О.В. Левченко

*Аннотация.* Энергоэффективность пневмосистем в рамках возможностей промышленной революции 4.0.

*Проблематика.* Рассмотрены существующие средства, которые могут быть использованы для построения и дальнейшего использования в инженерной практике систем подготовки сжатого воздуха.

*Цель исследования.* Разработка концепции автоматического определения состояния блока подготовки сжатого воздуха с применением возможностей промышленной революции 4.0

*Методика реализации.* Путем применения датчиков давления и электронных манометров и обработки их сигналов с помощью SCADA-системы производить автоматическое определение технического состояния блоков подготовки сжатого воздуха, как компрессорной станции, так и отдельных потребителей.

*Результаты исследований.* Предложено новый способ определения технического состояния блоков подготовки воздуха с помощью электронных датчиков давления воздуха и автоматизированных систем управления технологическими процессами.

*Выводы.* Разработан метод активного диагностирования технического состояния блоков подготовки воздуха, основанный на определении перепада давления, как на всем блоке та и на отдельных его компонентах.

*Ключевые слова:* пневматическая система, энергетическая эффективность, промышленная революция 4.0

## Energy efficiency of pneumatic systems as part of the industrial revolution 4.0 features

Yurii Lukashchuk, Behm Ingolf, Oleg Levchenko

*Abstract.* Energy efficiency of pneumatic systems as part of the Industrial Revolution 4.0 features.

*Design/methodology/approach.* The existing tools that can be used to construct and further use in engineering practice compressed air systems are considered.

*Findings.* Development of the concept of automatic determination of the condition of the compressed air preparation unit using the possibilities of the industrial revolution 4.0.

*Originality/value.* By applying pressure sensors and electronic pressure gauges and processing their signals with the SCADA system, automatic determination of the technical condition of the compressed air preparation units of both the compressor station and individual consumers. A new method for determining the technical state of air conditioning units using electronic air pressure sensors and automated process control systems is proposed.

*Keywords:* pneumatic system, energy efficiency, industrial revolution 4.0.

### References

1. Parr Andrew. Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide, Publisher: Butterworth-Heinemann Ltd, 2011.
2. Hooper Jay F. Basic Pneumatics: An Introduction to Industrial Compressed Air Systems and Components, Revised Printing Edition, 2015.
3. Elliott Brian. Compressed Air Operations Manual, McGraw-Hill Education, 2006.
4. Krivits Igor Lazar, Krejnin German Vladimir. Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment: Structure and Design, CRC Press, 2006.
5. Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. (2014). "Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency". Journal of Water Resources Planning and Management, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493.
6. Miller, R., Liberi, T., Scioscia, J. Analyzing Pump Energy through Hydraulic Modeling / Pipelines 2015. pp. 869-877.
7. Peña, Oscar R., Leamy, Michael J. An efficient architecture for energy recovery in hydraulic elevators / International Journal of Fluid Power, Vol. 16, no. 2, 2015. pp. 83-98. <https://doi.org/10.1080/14399776.2015.1055991>
8. Lisa Guana. Guangnan Chenb. Pumping Systems: Design and Energy Efficiency / Encyclopedia of Energy Engineering and Technology, Second Edition, 2015.
9. Karvonena Matti, Heikkilä Mikko, Huova Mikko, Linjama Matti. Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System / International Journal of Fluid Power Vol. 15, no. 1, 2014, pp. 33-44. <https://doi.org/10.1080/14399776.2014.893710>
10. Festo.com [Электронный ресурс] : [Интернет-портал]. – Электронні дані. – [Festo Didactic SE Rechbergstr.3, DE-73770 Denkendorf] – Режим доступа:<http://www.festo-didactic.com/int-en/> (дата звернення 01.04.2016). – Назва з екрана.