

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ КІНЦЕВИХ АВТОМАТІВ ДЛЯ НАГЛЯДУ ЗА РОБОТОЮ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ

*Мета публікації – розробити методологію представлення агрегату «компресор-синхронний електродвигун напругою 6 кВ» у вигляді кінцевого автомата.*

*Висунуто гіпотезу, що поведінка компресорної установки може бути асоційована з поведінкою абстрактного детермінованого кінцевого автомата.*

*Застосована теорія кінцевих автоматів та графів для аналізу роботи компресорної установки на прикладі компресора великотоннажного цеху з виробництва аміаку. Показано, що теорія кінцевих автоматів дозволяє звести воедино усі можливі режими роботи та відключення компресорних установок. Запропоновано кодування причин відключення компресора внаслідок проблем в електричній або механічній частинах компресорної установки. Розроблена діаграма переходів станів для неї. Така діаграма може бути корисна для складання стислого опису та розуміння роботи компресорної установки, підвищення кваліфікації технологічного персоналу при виробничому навчанні, для проведення протиаварійних тренувань тощо.*

*Проведений графовий аналіз одержаної діаграми. Визначено оптимальний (найбільш сприйнятливий по енергоефективності) маршрут графа.*

*Запропонована форма скороченого запису циклу роботи компресору та електронного журналу пробігу, що дозволяє розрахувати залишковий ресурс компресорної установки та час роботи компресора до виведення його в ремонт.*

*Впроваджені методи дозволяють виявити вузькі місця в складному електро- та технологічному устаткуванні промислових підприємств.*

**Ключові слова:** кінцевий автомат, граф, компресорна установка.

### Вступ.

В роботі [1] доведено, що модель системи електропостачання (СЕП) промислового підприємства можна представити у вигляді кінцевого автомата

$$M_c = (X, Y, Q, r, s),$$

де  $X$  – множина вхідних величин;  $Y$  – множина вихідних величин;  $Q$  – множина станів;  $r$  – перехідна функція;  $s$  – вихідна функція.

Кінцевий автомат (КА) в теорії алгоритмів – модель дискретного пристрою, що має один вхід, один вихід і в кожен момент часу знаходиться в одному стані з безлічі можливих [2]. Кінцевий автомат – абстрактна система, яка може перебувати в одному з багатьох певних станів, що належать кінцевій множині. Наступний стан залежить від поточного стану або поточного значення на його входах. Кінцевий автомат завжди повинен мати початковий стан та кінцевий стан. Інші стани повинні завжди мати як мінімум один вихід. Поведінка кінцевого автомата може бути представлена діаграмою станів переходів.

Для опису роботи технологічного агрегату «компресор-електродвигун» може бути застосована теорія кінцевих автоматів.

**Мета та задачі.** Метою даної роботи є дослідження доцільності представлення агрегату «компресор-електродвигун» у вигляді кінцевого автомата.

### Матеріал та результати досліджень.

Одним із головних агрегатів великотоннажного цеху із виробництва аміаку є компресор з стискування синтез-газу, циркуляційного газу і газоподібного аміаку.

В компресорі здійснюється трьохступінчасте стиснення синтез-газу до робочого тиску не більш 32 МПа (320 кгс/см<sup>2</sup>), а також інших газових середовищ (рисунок 1).

Компресор поз. КМ5+КМ5 представляє собою багатоцільовий, горизонтальний поршневий, циліндровий компресор, на одному валу якого розташовані циліндри синтез-газу першої та другої ступені стискування, а на другому – циліндри третьої ступені стискування синтез-газу, циркуляційного газу і газоподібного аміаку, які працюють від одного двигуна.

Приводом компресора служить синхронний електродвигун напругою 6 кВ потужністю 6780 кВт.

Для захисту компресора від аварійного режиму роботи і забезпечення безпечної експлуатації передбачене блокування, яке відключає головний двигун компресора при пониженні тиску на

всмоктуванні компресорів поз. КМ5+КМ5 до значення 2,0 МПа. Для захисту синхронного двигуна потужністю 6780 кВт від ненормальних і аварійних режимів передбачені наступні види захистів з дією на відключення електродвигуна компресора:

- 1.1 Диференціальний захист електродвигуна (код ANSI 87M).
- 1.2 МТЗ (2 ступені) (код ANSI 51).
- 1.3 Захист від замикань на «землю» (код ANSI 51N).
- 1.4 Захист мінімальної напруги (2 ступені) (код ANSI 27).
- 1.5 Захист від дугових замикань з пуском по напрузі код несправності приймається за Д.
- 1.6 Втрата збудження (код ANSI 40).
- 1.7 Зниження щільності елегазу вимикача з дією на сигнал – SF<sub>6</sub> (код несправності позначається як Е).
- 1.8 Технологічний захист (коди несправності прийняті для зручності за Т1÷Т7).

Є ряд дефектів компресорного агрегату, що призводять до його зупинки при експлуатації та виявляються контрольно-вимірними приладами та автоматикою (зліва вказаний код дефекту):

- |   |                        |
|---|------------------------|
| Т1. Зниження тиску синтез-газу на висмоктуванні, менше                                    | 20 кгс/см <sup>2</sup> |
| Т2. Підвищення температури корінних підшипників колінчатих валів компресора, понад 80 °С. |                        |
| Т3. Пониження тиску мастила, менше  | 0,9 кг/см <sup>2</sup> |
| Т4. Пониження тиску (напору) води на охолодження, менше                                   | 1,0 кг/см <sup>2</sup> |
| Т5. Зупинка електродвигунів масляних насосів змащування циліндрів та сальників            |                        |
| Т6. Підвищення рівня рідкого аміаку в сепараторах, понад                                  | 80%.                   |
| Т7. Зниження температури газоподібного аміаку на нагнітання служби аміаку менше           | 70 °С.                 |

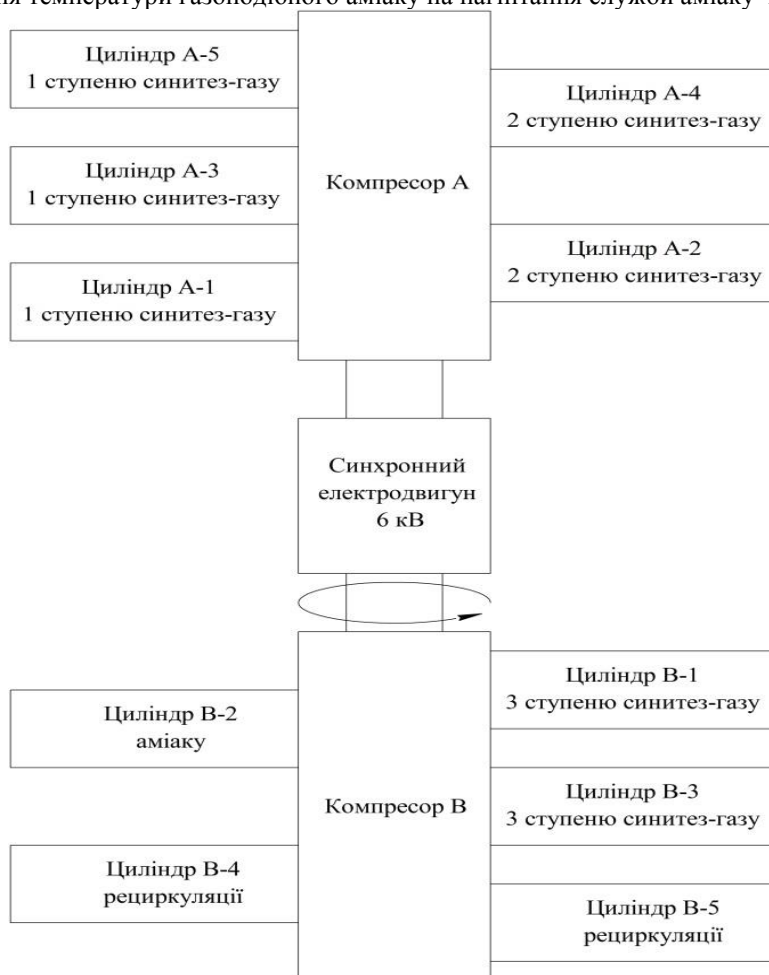


Рисунок 1. Загальне розміщення компресорної установки

Вихід на режим компресора здійснюється в такій послідовності:

1. Перевірка роботи компресора на неробочому ході.
2. Навантаження компресора проводиться шляхом прикриття вентилів, розташованих на байпасних трубопроводах, до повного закриття, а також за допомогою дистанційних динамічних віджимів та камер

постійного та змінного об'єму по всіх трьох службах: синтез-газу; циркуляційному газу; газоподібному аміаку.

3. Регулювання тиску мастила змащування в межах норми.

Випадки, коли компресор вимикають вручну (ключом управління) технологічним персоналом, наведені нижче.

1. Розгерметизація трубопроводів, апаратів, циліндрів компресора (код дефекту 11).
2. Поява диму із сапунів картерів компресора (код дефекту 12).
3. Стукіт в циліндрах компресора (код дефекту 13).
4. Стукіт в клапанах компресора (код дефекту 14).
5. Стукіт у механізмі руху компресора (код дефекту 15).
6. Загорання або задимлення електродвигуна компресора(код дефекту 16).
7. Планове відключення (код ПВ).

Умови нормального пуску компресора наведені на рисунку 2.



Рисунок 2. Умови готовності до пуску компресора

Поведінка компресорної установки може бути асоційована з поведінкою абстрактного детермінованого кінцевого автомата (ДКА).

Для пошуку суворого опису функціонування агрегату «компресор-двигун» визначають дві множини: безліч його допустимих станів і безліч допустимих управляючих впливів, які можуть змінювати стани агрегату. При вивченні властивостей абстрактних автоматів широко використовується теорія графів, оскільки кожному ДКА може бути поставлений у відповідність кінцевий орієнтований зв'язний граф, вершинами якого є стани ДКА, а дуги графа з відповідними назвами представляють команди, що реалізують перехід з початкової вершин у її кінцеву вершину.

Формально поняття ДКА та його графа не вимагають залучення геометричних образів. Проте, як наочним, а й цілком змістовним описом ДКА є діаграма переходів станів, що зображує граф, вершинами якого є стани, а дуги – сприйнятні впливи.

Зазвичай перелік станів (вершин) графу зводиться до наступного списку:

1. Початковий стан - Компресор вимкнений.
2. Компресор відключений та готовий до включення.
3. Запуск компресора в роботу.

4. Вихід на режим.
  5. Кінцевий стан – Компресор працює в нормальному режимі.
- Дугами направлено графу є такі процеси або події:
- 1-2. Підготовчі операції.
  - 2-3. Вмикання електродвигуна в роботу.
  - 3-4. Збільшення навантаження на електродвигун.
  - 4-5. Зростання продуктивності компресора.
  - 4-а-1. Відключення компресора технологічним захистом.
  - 4-б-1. Відключення компресора електричним захистом.
  - 4-в-1. Відключення компресора технологічним персоналом.
  - 5-а-1. Відключення компресора технологічним захистом.
  - 5-б-1. Відключення компресора електричним захистом.
  - 5-в-1. Відключення компресора технологічним персоналом.

Діаграмне представлення у вигляді графа ДКА дозволяє легко встановити можливість тієї чи іншої допустимої послідовності дій оператора та/або сигналів дистанційного керування. Крім того, на діаграмі, якщо вона досить повно відображає всі можливі стани, можна виявити взагалі всі можливі послідовності команд та перевірити факт неприпустимості тієї чи іншої послідовності команд.

Діаграма переходів станів є структурою, що включає зображення станів, що з'єднуються дугами, що показують події для переходу у новий стан (допустимі переходи). На рисунку 3 показано діаграма переходів станів для системи, що складається з одного автоматичного вимикача напругою до 1000 В, що має два стани: On (Увімкнено) – зображено вверху та Off (Вимкнено) зображено внизу та вказує події для переходу до нового стану. Діаграма переходів станів містить: зображення станів, які подаються у вигляді кіл; дуги, що з'єднують стани (допустимі переходи) та позначення, нанесені поруч із дугою, які описують події, настання яких викликає перехід (позначення переходу). Switch up – включити та Switch down – вимкнути.

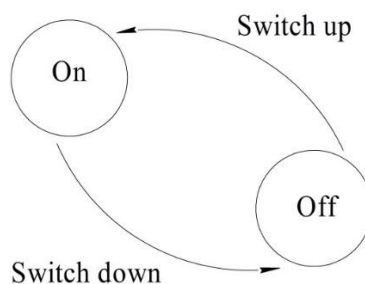


Рисунок 3. Діаграма переходу станів автоматичного вимикача

Більш складну діаграму переходів станів компресорної установки представлено на рисунку 4.

Компресорна установка, що нормально функціонує, не змінює свій стан невизначено. Це означає, що певний вплив або сигнал переводить її із заданого стану в один певний (інший або той самий) стан, але не може перевести в два або більше різних стани. Число станів установки обмежено. Перехід може відбуватися як при певному впливі, так і спонтанно без зовнішнього впливу при потраплянні в деякі певні стани.

Така діаграма може бути корисна для складання стислого опису та розуміння роботи компресорної установки, підвищення кваліфікації технологічного персоналу при виробничому навчанні, для проведення протиаварійних тренувань.

Використання теорії КА дозволяє провести кодування циклів роботи компресорних установок та ввести скорочений запис, який дозволяє контролювати надійність та економічність їх роботи.

Нормальна робота установки продемонстрована в таблиці 1

**Таблиця 1** Види короткого запису нормальної роботи компресорної установки

Час, що займає операція	10 хв.	<1 сек	5 сек	5 хв	1 сек
Дуги графу	1-2	2-3	3-4	4-5	5-в-1
Назва процесу або події	Підготовчі операції	Включення електродвигуна в роботу	Збільшення навантаження на електродвигун	Зростання продуктивності компресора	Планове відключення
Код причини зупинки					ПВ



Рисунок 4. Діаграма переходів станів компресорної установки

Приклад короткого запису ненормальної роботи установки продемонстрований в табл. 2.

Таблиця 2. Приклад короткого запису ненормальної роботи компресора

Час, що займає операція	10 хв.	<1 сек	5 сек	5 хв.	<1 сек
Дуги графу	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6-1
Назва процесу або події	Підготовчі операції	Включення електродвигуна в роботу	Збільшення навантаження на електродвигун	Зростання продуктивності компресора	Відключення електричним захистом
Код зупинки					87М

Часом, що займають пускові операції, можна знехтувати для визначення мотогодин компресора. Доцільно для кожного агрегату вести електронний журнал, наприклад, у такому вигляді (табл. 3):

Таблиця 3. Форма електронного журналу пробігу компресорів

Час включення $T_1$ (дата, година)	Час відключення $T_2$ (дата, година)	Причина відключення	Загальний час роботи компресора $T$ в циклі, годин	Примітка
1	3	2	4	5
01.08.2017 9 <sup>00</sup>	25.08.2017 17 <sup>00</sup>	ПВ	608	25x24+8=608
01.09.2017 9 <sup>00</sup>	02.09.2017 12 <sup>00</sup>	87М	27	24+3=27

Якщо  $T_2$  та  $T_1$  були в одну й ту ж саму добу, то  $T = T_2 - T_1$ . Якщо включення компресора та відключення були в різні доби, то  $T = 24 - T_1 + T_2 + 24n$ , де  $n$  – кількість діб між добою, коли був включений компресор та добою, коли був вимкнений [3].

Таким чином, можливо використати скорочений запис станів компресора та теорію кінцевих автоматів для визначення залишкового ресурсу компресора до ремонту та визначення дати поточного ремонту.

Теорія кінцевих автоматів дозволяє з мінімальним об'ємом інформації звести воедино усі можливі режими роботи та відключення компресорних установок. Якщо в процесі беруть участь декілька однакових за типом компресорних установок, то є можливість порівнювати їх ефективність за допомогою короткого запису та електронного журналу пробігу.

Проведем графовий аналіз [4] графа, зображеного на діаграмі переходів станів на рис. 4. За допомогою такого аналізу досліджується структура графа та виявляються неочевидні залежності, складається оптимальний маршрут обходу графа з урахуванням енергоефективності роботи установки, по якій складено діаграму станів переходів.

Згідно теорії графів на рисунку 4 зображений орієнтований, циклічний граф з кратними дугами без петель. Аналіз роботи як компресорних, так і насосних установок доводить, що графічне зображення діаграми переходів їх станів є мультиграфом.

Округа (околиця) вершин по входам та виходам:

$$\Gamma_1^- = \{2\}, \Gamma_1^+ = \{4, 5\}, \Gamma_2^- = \{3\}, \Gamma_2^+ = \{1\}, \Gamma_3^- = \{4\}, \Gamma_3^+ = \{2\}, \Gamma_4^- = \{1, 5\}, \Gamma_4^+ = \{3\},$$

$$\Gamma_5^- = \{1\}, \Gamma_5^+ = \{4\}. \text{ Вершини 2 та 3 є регульованими.}$$

Визначаються ступені вершин графу  $\rho$ , напівступені виходу  $\rho^-$  та знаходження  $\rho^+$ .

$$\rho_1^- = 1, \rho_1^+ = 6, \rho_1 = 7; \rho_2^- = 1, \rho_2^+ = 1, \rho_2 = 2; \rho_3^- = 1, \rho_3^+ = 1, \rho_3 = 2; \rho_4^- = 4, \rho_4^+ = 1, \rho_4 = 5; \\ \rho_5^- = 3, \rho_5^+ = 1, \rho_5 = 4.$$

Матриця суміжності графа має вигляд:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Матриця інцидентності має такий вигляд:

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

Стовпчики 5, 6, 7 та 8, 9, 10 є кратними. Це свідчить, що вершини 2 та 3 є регульованими.

Список дуг має вигляд:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 4 & 4 & 5 & 5 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Оптимальний маршрут графу з точки зору енергоефективності є такий, коли компресор виходить на режим, потім нормально працює в штатному режимі та вимикається ключом керування технологічним персоналом після тривалої роботи. Це маршрут графа, який з'єднає вершини 1-2-3-4-5-в-1. При цьому час роботи компресора повинен бути якнайдовшим.

### Висновки

1. Вперше розроблена модель компресорної установки у вигляді абстрактного детермінованого кінцевого автомату.

2. Представлено схему роботи компресорних установок великотоннажного цеху аміаку у вигляді діаграми переходів стану, що дає можливість стисло, з мінімальним об'ємом інформації звести воедино усі можливі режими роботи та можливі причини аварійних зупинок компресорних установок, порівнювати ефективність декількох однакових за типом та потужністю компресорних установок, використовувати ці діаграми для навчання та підвищення кваліфікації технологічного персоналу хімічних виробництв.

3. З метою підвищення надійності та економічності роботи компресорних установок запропоновано провести кодування циклів їх роботи та ввести скорочений запис про їх пробіг, що дозволяє контролювати

залишковий ресурс кожного компресора та визначити термін проведення його ремонту. Такий захід доцільно поширити на інші технологічні агрегати.

4. Проведений графовий аналіз діаграми переходів станів компресорних установок, який дозволяє дослідити структуру графа у вигляді діаграми переходів стану, скласти оптимальний маршрут обходу графа з урахуванням енергоефективності роботи компресорної установки.

#### **Список літератури**

1. Винославский В. Н., Тарадай В. И., У. Бутц, Д. Хайнце Автоматизация проектирования систем электроснабжения. – К.: Высшая школа, Главное изд-во, 1988. – 208 с.
2. Kai Wang, Wanqing Li, Application of Electrical Automation Technology in Power System. Journal of Power and Energy Engineering – Vol.7, No.5, May 21, 2019. – P. 8-13.
3. Войтов Д. В. Створення систем моніторингу компресорних установок / Д.В. Войтов, А.В. Панов // Промелектро. – 2009. – № 5. – С. 41 – 44.
4. F. Harary, Graph Theory, Addison-Wesley Publishing Company, Boston, 1969. – P. 288.

**A. Voloshko<sup>1</sup>**, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6857-2060

**Ya. Bederak<sup>2</sup>**, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-2669-0965

**V. MOROZ<sup>2</sup>**, engineer

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

<sup>2</sup>Private joint stock company “AZOT” Cherkasy city

### **USE OF THE THEORY OF FINITE AUTOMATA**

#### **FOR SUPERVISION OF THE OPERATION OF THE COMPRESSOR UNIT**

*The purpose of the publication is to develop a methodology for presenting the unit "6 kV compressor-synchronous electric motor" in the form of a finite state machine.*

*It is hypothesized that the behavior of the compressor unit can be associated with the behavior of an abstract deterministic finite state machine.*

*The theory of finite state machines and graphs is applied to analyze the operation of a compressor installation using the example of a compressor of a large-tonnage shop for the production of ammonia. It is shown that the theory of finite state machines allows combining all possible modes of operation and shutdown of compressor units. Coding of reasons for compressor shutdown due to problems in the electrical or mechanical parts of the compressor unit is proposed. A diagram of state transitions has been developed for it. Such a diagram can be useful for compiling a concise description and understanding of the operation of a compressor unit, advanced training of technological personnel during industrial training, for emergency training, etc.*

*A graphical analysis of the obtained diagram was carried out. The optimal (most perceived in terms of energy efficiency) route of the graph is determined.*

*The proposed form of abbreviated recording of the compressor operation cycle and the electronic mileage log, which allows you to calculate the remaining resource of the compressor installation and the compressor operation time.*

*The implemented methods make it possible to identify bottlenecks in the complex electrical and technological equipment of industrial enterprises.*

**Keywords:** finite state machine, graph, compressor unit.

#### **References**

1. Vinoslavskii V.N., Taraday V.I., U. Butz, D. Xajnze. Avtovatuzaziya proektirovaniya system elektrosnajemiya. – K. Visshaya shkola, Glavnoe izd-vo. – 1988. – 208 s.
2. Kai Wang, Wanqing Li, Application of Electrical Automation Technology in Power System. Journal of Power and Energy Engineering – Vol.7, No.5, May 21, 2019. – P. 8-13.
3. Voytov D.V. Stvoreniya system monitoringu kompresornih ustanovok/D.V. Voytov, A.V. Panov//Promelektro. – 2009. -# 5. – S. 41 – 44.4. F. Harary, Graph Theory, Addison-Wesley Publishing Company, Boston, 1969. – P. 288.
4. F. Harary, Graph Theory, Addison-Wesley Publishing Company, Boston, 1969. – P. 288.

Надійшла 18.11.2022

Received 18.11.2022