

УДК661.333:681.518

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201552

## Розробка системи діагностики відділення абсорбції-дистиляції виробництва кальцинованої соди

А. М. Переверзева, А. О. Бобух, М. О. Подустов

*Виробництво кальцинованої соди аміачним способом відноситься до класу складних неперервних хіміко-технологічних систем та характеризується багатомірністю, інерційністю, наявністю циклів матеріальних потоків, складними залежностями між вхідними і вихідними параметрами технологічних режимів. Дослідження роботи цього виробництва та показників його роботи показали, що 24–26 % втрат за випуском кальцинованої соди відбулися із-за порушень технологічного режиму відділення абсорбції-дистиляції. При цьому багато з цих порушень можна попередити, а втрати значно зменшити за рахунок розробки системи діагностики стану технологічних процесів цього відділення. Основною задачею системи діагностики відділення абсорбції-дистиляції є визначення моменту переходу технологічного процесу в аварійний стан, відключення системи управління, повідомлення технологу-оператору про ймовірну причину аварійної ситуації та рекомендації по її усуненню. Після усунення причин відхилення технологічного процесу від нормального функціонування передбачені заходи по включенню системи управління. Система діагностики відділення абсорбції-дистиляції виробництва кальцинованої соди повинна бути реалізована на основі пасивних спостережень за ходом технологічного процесу. Це обумовлено безперервністю виробництва, з одного боку, та вимогою дотримання режиму нормального функціонування технологічного процесу, з другого боку. За результатами аналізу діагностики аварійних ситуацій підтверджується, що реалізація методу логічних таблиць рішень буде сприяти підвищенню швидкості процесу діагностики та покращанню його якості за рахунок попередження та своєчасної ліквідації аварійних ситуацій. Встановлено, якщо одному і тому вектору аналізу аварійних ситуацій відповідають різні причини аварійних ситуацій цієї системи необхідно використовувати характеристики статистичної теорії рішень*

*Ключові слова: кальцинована сода, система діагностики, логічні таблиці рішень, вектор аналізу*

### 1. Вступ

Виробництво кальцинованої соди аміачним способом (ВКС) є одним із важливих хімічної промисловості. ВКС відноситься до класу складних неперервних хіміко-технологічних систем та характеризується багатомірністю, інерційністю, наявністю циклів матеріальних потоків, складними залежностями між вхідними і вихідними параметрами технологічних режимів, тобто володіє всіма характерними рисами складних систем. Для отримання кальцинованої соди необхідно значна кількість енергоресурсів: електроенергії, пари, коксу, газу та води. Також технологічні процеси ВКС ускладнюються наявністю агресивних,

кристалізуючих та абразивних середовищ, що знижують ефективність роботи основних та допоміжних відділень [1, 2].

Дослідження показали [3], що одним із найголовніших відділень ВКС є відділення абсорбції-дистиляції, зокрема:

- аналіз загальної суми витрат на отримання 1 т кальцинованої соди підтверджує, що на реалізацію технологічних процесів цього відділення приходиться понад 60 % всіх витрат на ВКС;

- втрати ВКС багато в чому обумовлені порушенням технологічного режиму в відділенні абсорбції-дистиляції;

- відділення абсорбції-дистиляції виробляє значну частину рідких відходів ВКС ( $9,1 \text{ м}^3$  на 1 т соди) та при порушенні режиму його роботи значно збільшується забруднення навколишнього середовища.

Основна вимога до роботи ВКС – це отримання найвищого прибутку, що є результатом неперервної, безперебійної і чіткої роботи відділення абсорбції-дистиляції. Це можливо досягнути лише в разі відсутності простоїв і нескоординованої роботи технологічного процесу через помилку і її усунення, несвоєчасне виявлення відхилень вихідних змінних від заданих значень, незаплановану зміну режиму роботи [4].

Суттєве значення для ведення технологічних процесів відділення абсорбції-дистиляції ВКС мають методи узагальнення даних контролю роботи окремих апаратів та обладнання. Чим вище кваліфікація технолога-оператора, тим вище якісні показники виробництва та його стадій. Однак кількість обладнання, що входить в «сферу обслуговування», отже, і об'єм інформації, яку технолог-оператор отримує та повинен переробити, настільки великий, що для прийняття правильного рішення залишається мало часу. Рішення навіть досвідчених технологів-операторів не завжди гарантують нормальний хід технологічного процесу та ведуть до матеріальних втрат. Це пов'язано з тим, що процес знаходження причини порушення технологічного режиму є, як правило, процедурою послідовного аналізу «складної події» та в цілому лягає на оператора-технолога. При цьому час виявлення причини та усунення порушення занадто великий, що також веде до матеріальних втрат.

Аналіз показників роботи ВКС [3] показав, що 24–26 % втрат за випуском кальцинованої соди відбуваються із-за порушень технологічного режиму відділення абсорбції-дистиляції. Основною групою аварійних ситуацій у відділенні абсорбції-дистиляції ВКС є порушення матеріального та теплового балансів в апаратурі. Окрім того ситуації, які характеризуються таким рівнем збурень, діючих на технологічний процес, що можливостей управління недостатньо для проведення нормального технологічного режиму.

Для підвищення ефективності роботи відділення абсорбції-дистиляції ВКС доцільно доповнити автоматизоване управління ним системою діагностики аварійних ситуацій цього відділення. Це дасть можливість передбачити та уникнути можливих відхилень від заданих режимів роботи.

Характерною особливістю діагностики аварійних ситуацій у відділенні абсорбції-дистиляції ВКС при оптимізації режиму роботи відділення є підвищення вимог до оперативності та точності діагностики. Останнє обумовлено тим,

що оптимальний режим ведення процесу часто знаходиться поблизу граничних регламентних значень та підвищується ймовірність виходу за них у порівнянні з веденням процесу на основі середніх значень параметрів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

У роботі [5] були проведені результати дослідження функціональних особливостей системи автоматизованого управління ВКС, з метою допомогти виробництву вирішити питання в області управління. Проте, системи автоматизованого управління технологічними процесами розпочинають процес управління після появи суттєвого неузгодження. Для підвищення ефективності такої системи доцільно традиційні методи управління доповнити системою діагностики. Це дозволить на ранніх стадіях виявити можливі неполадки в проходженні технологічного процесу, чим значно зменшити час управління і, як наслідок, підвищити якість автоматизованого управління.

Для розробки системи діагностики необхідно провести аналіз параметрів технологічного процесу [6] які є індикаторами діагностики технічних об'єктів. Проте аналіз цих параметрів системи часто проводиться в умовах експлуатації, при яких отримання інформації вкрай ускладнено, тому часто не представляються можливості за наявною інформацією зробити однозначний висновок. Рішення діагностичних задач завжди пов'язані з ризиком помилкової тривоги або пропуску цілі. Для прийняття обґрунтованого рішення в такому випадку використовуються методи статистичної теорії рішень [7].

У роботі [8] розглядаються питання вибору методу діагностики. Зазначенні у цій роботі методи не встановлюють зв'язок між технічним станом системи та причинами, що викликають цей стан.

Приклади побудови різних діагностичних моделей в табличній та графічній формі наведені в роботі [9]. Представлення можливих станів діагностуючих об'єктів та обробка їх в інформаційній моделі дозволяє автоматизувати процес діагностики.

У роботі [10] система діагностики реалізується за допомогою штучної нейронної мережі. Безперервність ВКС, з одного боку, та вимоги дотримання режиму нормального функціонування технологічного процесу, з другого боку, підвищує вимоги до оперативності та точності діагностики. Останнє обумовлено тим, що раціональний режим ведення процесу часто знаходиться поблизу граничних регламентних значень та підвищується ймовірність виходу за них у порівнянні з веденням процесу на основі середніх значень параметрів. В існуючих на сьогодні публікаціях в області автоматизованого управління ВКС дається тільки загальна інформація технічного характеру та відсутні дані про застосування системи діагностики. Отже, існує велика потреба в розробці системи діагностики аномальних ситуацій відділення абсорбції-дистиляції ВКС.

## **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою дослідження є розробка системи діагностики аварійних ситуацій відділення абсорбції-дистиляції ВКС. Це дасть можливість передбачити, а отже, і уникнути можливих відхилень від заданих режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначити задачу діагностики відділення абсорбції-дистиляції ВКС;
- розробити інформаційну модель вирішення задачі діагностики відділення абсорбції-дистиляції ВКС;
- визначити процедуру перетворення логічної таблиці вирішення діагностики аварійних ситуацій для її програмування.

#### **4. Призначення та особливості відділення абсорбції-дистиляції виробництва кальцинованої соди**

Основним призначення відділення абсорбції-дистиляції ВКС є практично повна регенерація аміаку та двооксиду вуглецю із фільтрової рідини як ведучого потоку цього відділення. А також формування безперервного матеріального потоку пара-газової суміші, що направляєється на отримання регламентної кількості амонізованого розсолу у вигляді неперервного матеріального потоку. Відділення абсорбції-дистиляції складається з апаратів двох об'єктів.

Перший – об'єкт абсорбції у складі: промивач повітря фільтрів (ППФЛ), промивач газу абсорбції (ПГАБ), другий промивач газу колон (ПГКЛ-2), абсорбер (АБ). Апарати ППФЛ, ПГАБ, ПГКЛ-2 та АБ представляють собою одну абсорбційну колону чи один елемент. А також у склад об'єкту абсорбції входять пластинчатий холодильник та збірник амонізованого розсолу (ЗАР).

Другий – об'єкт дистиляції у складі: конденсатор-холодильник газу дистиляції (КХДС), теплообмінник дистиляції (ТДС), дистилер (ДС). Апарати КХДС, ТДС, ДС представляють собою одну дистиляційну колону чи один елемент. А також у склад об'єкту дистиляції входять змішувач (ЗМ), випарники (ВП), конденсатор-холодильник слабкої рідини (КХДСР), дистилер слабкої рідини (ДСР) та збірник дегазованої рідини (СДР).

#### **5. Розробка системи діагностики аномальних ситуації відділення абсорбції-дистиляції ВКС**

##### **5.1. Визначення функції діагностики аномальних ситуації відділення абсорбції-дистиляції ВКС**

Для постановки задачі діагностики ведені визначення:

- 1) множина  $N_{ri}$ ,  $r = \overline{1, l}$  відмов для технологічного процесу відділення абсорбції-дистиляції ( $i = \overline{1, 4}$  номери елементів відділення);
- 2) множина  $P_{\beta i}$ ,  $\beta = \overline{1, n}$  причин відмов для технологічного процесу відділення абсорбції-дистиляції;
- 3) множина  $S_{\gamma i}$ ,  $\gamma = \overline{1, m}$  симптомів відмов, де під симптомом розуміється відхилення параметрів процесу від деяких заздалегідь визначених верхніх або нижніх границь в сторону збільшення чи зменшення відповідно. Це визначення дозволяє елементи множини симптомів  $S_{\gamma i}$  описати логічними функціями, які мають два значення «так», «ні» (тобто 1, 0) [11–13].

Методом експертних оцінок було визначено перелік параметрів технологічного процесу  $X_{ji}$  (вхідні),  $Y_{ki}$  (вихідні) та  $Z_{qi}$  (контролюючі, які застосовуються

для корекції вихідних параметрів). Перелік вказаних параметрів приведений в табл. 1, 2 відповідно.

Таблиця 1

Вхідні  $X_{ji}$  та вихідні  $Y_{ki}$  параметри технологічного режиму та їх обмеження для  $i$ -го елемента відділення абсорбції-дистиляції

| № п/п | Ідентифікатор | Назва змінної                               | Значення  |            | Одиниці виміру       |
|-------|---------------|---|-----------|------------|----------------------|
|       |               |   | Нижнє (н) | Верхнє (в) |                      |
| 1     | $X_{1i}$      | Витрата фільтрової рідини                   | 80        | 160        | м <sup>3</sup> /ГОД  |
| 2     | $X_{2i}$      | Витрата пара                                | 20        | 50         | т/ГОД                |
| 3     | $X_{3i}$      | Витрата очищеного розсолу                   | 70        | 140        | м <sup>3</sup> /ГОД  |
| 4     | $X_{4i}$      | Витрата вапняної суспензії                  | 34        | 52         | м <sup>3</sup> /ГОД  |
| 5     | $X_{5i}$      | Витрата охолоджуючої води на холодильники   | 440       | 510        | м <sup>3</sup> /ГОД  |
| 6     | $Y_{1i}$      | Концентрація аміаку в амонізованому розсолі | 4,6       | 5,4        | Кмоль/м <sup>3</sup> |
| 7     | $Y_{2i}$      | Концентрація хлору в амонізованому розсолі  | 4,1       | 4,8        | Кмоль/м <sup>3</sup> |
| 8     | $Y_{3i}$      | Температура пара-газової суміші після КХДС  | 57        | 63         | °С                   |
| 9     | $Y_{4i}$      | Концентрація аміаку в дистиленій рідині     | 0,1       | 5,1        | моль/м <sup>3</sup>  |
| 10    | $Y_{5i}$      | Концентрація хлору в дистиленій рідині      | 2,7       | 3,6        | Кмоль/м <sup>3</sup> |

Встановлення взаємозв'язку множини симптомів  $S_{\gamma i}$  з параметрами технологічного режиму:

$$S_{\gamma i} = \Psi(X_{ji}^*, Y_{ki}^*, Z_{qi}^*), \gamma = \overline{1, m};$$

$$j = \overline{1, 5}; i = \overline{1, 4}; k = \overline{1, 5}; q = \overline{1, 16}, \quad (1)$$

де  $X_{ji}^*$  – булеве значення параметру  $X_{ji}$  технологічного режиму, якщо чисельне значення цього параметру більше або менше заданого значення (табл. 1), то це «відхилення від норми» – булева 1, якщо ні – «норма» – булевий 0;  $Y_{ki}^*$  – булеве значення параметру  $Y_{ki}$  технологічного режиму, якщо чисельне значення цього параметру більше або менше заданого значення (табл. 1), то це «відхилення від норми» – булева 1, якщо ні – «норма» – булевий 0;  $Z_{qi}^*$  – булеве значення параметру  $Z_{qi}$  технологічного режиму, якщо чисельне значення цього параметру більше або менше заданого значення (табл. 1), то це «відхилення від норми» – булева 1, якщо ні – «норма» – булевий 0;  $\Psi(X_{ji}, Y_{ki}, Z_{qi})=1$ , якщо який-небудь із

параметрів технологічного режиму більше або менше заданого значення;  $\Psi(X_{ji}, Y_{ki}, Z_{qi})=0$ , якщо параметри технологічного режиму в нормі [12–14].

Таблиця 2

Контролюючі параметри  $Z_{qi}$  технологічного режиму та їх обмеження для  $i$ -го елемента відділення абсорбції-дистиляції

| № п/п | Ідентифікатор | Назва змінної                     | Значення  |            | Одиниці виміру |
|-------|---------------|-----------------------------------|-----------|------------|----------------|
|       |               |                                   | Нижнє (н) | Верхнє (в) |                |
| 1     | $Z_{1i}$      | Тиск пари внизу ДС                | 133,3     | 173,3      | кПа            |
| 2     | $Z_{2i}$      | Тиск пари верху ДС                | 121,6     | 150        | кПа            |
| 3     | $Z_{3i}$      | Тиск газу верху ТДС               | 112       | 131,7      | кПа            |
| 4     | $Z_{4i}$      | Тиск газу верху КХДС              | 103,4     | 114,6      | кПа            |
| 5     | $Z_{5i}$      | Тиск газу на вході АБ             | 96        | 100        | кПа            |
| 6     | $Z_{6i}$      | Тиск газу верху ПГАБ              | 75,3      | 77,3       | кПа            |
| 7     | $Z_{7i}$      | Тиск газу на вході ПГКЛ-2         | 108,6     | 114        | кПа            |
| 8     | $Z_{8i}$      | Тиск газу на вході ППФЛ           | 44,7      | 51,3       | кПа            |
| 9     | $Z_{9i}$      | Температура рідини на виході ПГАБ | 20        | 45         | °С             |
| 10    | $Z_{10i}$     | Температура рідини на виході АБ   | 40        | 70         | °С             |
| 11    | $Z_{11i}$     | Температура рідини на виході ТДС  | 85        | 97         | °С             |
| 12    | $Z_{12i}$     | Температура рідини на виході ЗМ   | 85        | 97         | °С             |
| 13    | $Z_{13i}$     | Температура газу на виході ДС     | 90        | 98         | °С             |
| 14    | $Z_{14i}$     | Температура газу на виході КХДС   | 63        | 66         | °С             |
| 15    | $Z_{15i}$     | Температура газу на виході АБ     | 40        | 65         | °С             |
| 16    | $Z_{16i}$     | Температура газу на виході ПГАБ   | 20        | 45         | °С             |

Методом експертних оцінок було визначено найбільш характерний перелік відмов  $N_{ri}$ , симптомів відмов  $S_{\gamma i}$  та причин відмов  $P_{\beta i}$  для відділення абсорбції-дистиляції. Перелік вказаних параметрів залежить від особливостей технологічних процесів виробництва та приведений в табл. 3–4, із аналізу яких видно, що

для відділення абсорбції-дистиляції ВКС кількість симптомів  $S_{\gamma i}$ ,  $\gamma = \overline{1,29}$ , кількість відмов  $N_{ri}$ ,  $l = \overline{1,29}$ , та кількість причин відмов  $P_{\beta i}$ ,  $\beta = \overline{1,12}$ .

Задані граничні значення в задачі діагностики відрізняються від граничних значень для параметрів автоматизованої системи управління технологічного процесу відділення абсорбції-дистиляції ВКС [15, 16]. Ці відмінності проявляються для  $Y_{ki}$ , оскільки обмеження на  $Y_{ki}$  при управлінні виконуються тільки в сенсі:

$$Y_{ki}^{\min} \leq M \{ Y_{ki} \} \leq Y_{ki}^{\max}, \quad (2)$$

де  $M\{ \}$  – символ математичного очікування.

Нерівності (2) для використання в задачі діагностики можна переписати в наступному вигляді:

$$Y_{ki}^{\min} - \delta Y_{ki} \leq Y_{ki} \leq Y_{ki}^{\max} + \delta Y_{ki}, \quad (3)$$

де  $\delta Y_{ki}$  – розмах вибірки величин  $Y_{ki}$ .

Оскільки система управління відділенням абсорбції-дистиляції ВКС вирішує, зокрема, і задачі стабілізації вихідних параметрів, то  $\delta Y_{ki}$  визначаються помилкою стабілізації при управлінні, або помилкою моделі, обраної для пошуку управління

$$Y_{ki}(t) = f_{ki}(X_{ji}) + \xi_{ki}, \quad (k = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}; j = \overline{1,5}). \quad (4)$$

На основі введених визначень та позначень формально задача діагностики відділенням абсорбції-дистиляції ВКС визначається наступним чином: отримати функцію  $\omega$ , яка зв'яже симптоми та причини відмов, тобто побудувати залежність:

$$P_{\beta i} = \omega(S_{\gamma i}) = \omega(\Psi(X_{ji}, Y_{ki}, Z_{qi})), \quad \beta = \overline{1,12}. \quad (5)$$

Додатково до (5) ставиться завдання отримання переліку відмов (пов'язаних з причинами відмов  $P_{\beta i}$ , які ще не проявилися), а, отже, і рекомендацій щодо усунення відмов:

$$N_{Li} = v(P_{\beta i}) = v(\omega(\Psi(X_{ji}, Y_{ki}, Z_{qi}))); \quad L = \overline{1,29}; \quad (6)$$

$$W_{\delta i} = \eta(N_{Li}) = \eta(v(\omega(\Psi(X_{ji}, Y_{ki}, Z_{qi}))))); \quad \delta = \overline{1,d}, \quad (7)$$

де  $\{W_{\delta i}\}$  – множина рекомендацій для усунення відмов, які ще не проявились.

Таблиця 3

Перелік відмов  $N_{ri}$  та симптомів відмов  $S_{\gamma i}$  технологічного процесу  $i$ -го елемента відділення абсорбції-дистиляції (для часу  $t$ )

| № п/п | Відмови $N_{ri}$  | Симптоми відмов $S_{\gamma i}$ |
|-------|---|--------------------------------|
| 1     | Порушення обмежень на витрату фільтрової рідини                 | $80 \leq X_{1i} \leq 160$      |
| 2     | Порушення обмежень на витрату пари                              | $20 \leq X_{2i} \leq 50$       |
| 3     | Порушення обмежень на витрату очищеного розсолу                 | $70 \leq X_{3i} \leq 140$      |
| 4     | Порушення обмежень на витрату вапняної суспензії                | $34 \leq X_{4i} \leq 52$       |
| 5     | Порушення обмежень на витрату охолоджуючої води на холодильнику | $440 \leq X_{5i} \leq 510$     |
| 6     | Підвищення температури газу після КХДС                          | $Y_{3i}^t - Y_{3i}^B > 1$      |
| 7     | Зниження температури газу після КХДС                            | $Y_{3i}^t - Y_{3i}^B < 1$      |
| 8     | Збільшення тиску пари перед ДС                                  | $Z_{1i}^t - Z_{1i}^B > 25$     |
| 9     | Збільшення тиску пари верху ДС                                  | $Z_{2i}^t - Z_{2i}^B > 20$     |
| 10    | Збільшення тиску газу верху ТДС                                 | $Z_{3i}^t - Z_{3i}^B > 5$      |
| 11    | Збільшення тиску газу верху КХДС                                | $Z_{4i}^t - Z_{4i}^B > 5$      |
| 12    | Збільшення опору ТДС  | $Z_{2i}^t - Z_{3i}^B > 20$     |
| 13    | Збільшення тиску газу на вході АБ                               | $Z_{5i}^t - Z_{5i}^B > 5$      |
| 14    | Збільшення тиску газу верху ПГАБ                                | $Z_{6i}^t - Z_{6i}^B > 5$      |
| 15    | Збільшення опору ПГАБ   | $Z_{5i}^t - Z_{6i}^t > 13$     |
| 16    | Збільшення тиску газу на вході ПГКЛ-2                           | $Z_{7i}^t - Z_{7i}^B > 8$      |
| 17    | Збільшення тиску газу на вході ППФЛ                             | $Z_{8i}^t - Z_{8i}^B > 5$      |
| 18    | Зменшення тиску газу верху ТДС                                  | $Z_{3i}^H - Z_{3i}^t < 3$      |
| 19    | Зменшення тиску газу верху КХДС                                 | $Z_{4i}^H - Z_{4i}^t < 3$      |
| 20    | Зменшення опору КХДС  | $Z_{3i}^t - Z_{4i}^t > 15$     |
| 21    | Підвищення температури рідини на виході із ПГАБ                 | $Z_{9i}^t - Z_{9i}^B > 10$     |
| 22    | Підвищення температури рідини на виході АБ                      | $Z_{10i}^t - Z_{10i}^B > 5$    |
| 23    | Підвищення температури рідини на ТДС                            | $Z_{11i}^t - Z_{11i}^B > 3$    |
| 24    | Підвищення температури рідини на виході ЗМ                      | $Z_{12i}^t - Z_{12i}^B > 5$    |
| 25    | Підвищення температури на виході ДС                             | $Z_{13i}^t - Z_{13i}^B > 5$    |
| 26    | Підвищення температури газу на виході КХДС                      | $Z_{14i}^t - Z_{14i}^B > 3$    |
| 27    | Підвищення температури газу на виході АБ                        | $Z_{15i}^t - Z_{15i}^B > 5$    |
| 28    | Підвищення температури газу на виході ПГАБ                      | $Z_{16i}^t - Z_{16i}^B > 5$    |
| 29    | Зниження температури газу на виході КХДС                        | $Z_{14i}^H - Z_{14i}^t < 3$    |

Таблиця 4

Перелік найбільш характерних причин відмов  $P_{\beta i}$  технологічного процесу  $i$ -го елемента відділення абсорбції-дистиляції

| № п/п | Причина відмови  |
|-------|--|
| 1     | Переповнення нижньої бочки АБ                                      |
| 2     | Переповнення нижньої бочки ПГКЛ-2                                  |
| 3     | Забруднення сифону рідини із ППФЛ в ПГАБ                           |
| 4     | Забруднення трубопроводу із ПГАБ в АБ                              |
| 5     | Переповнення флегмової бочки КХДС                                  |
| 6     | Забруднення колектору газу із АБ в ПГАБ                            |
| 7     | Переповнення нижньої бочки ДС                                      |
| 8     | Забивання одного із переливів ДС                                   |
| 9     | Переповнення нижньої бочки ТДС із-за перенавантаження ТДС          |
| 10    | «Зависання» ТДС  |
| 11    | Переповнення нижньої бочки ТДС із-за забивання виходу із ЗМ        |
| 12    | Різде підвищення температури газу абсорбції – «розігрів» абсорбції |

Таким чином, незважаючи на те, що технологічні процеси відділення абсорбції-дистиляції безперервні, значення  $N_{ri}$ ,  $P_{\beta i}$ ,  $S_{\gamma i}$ ,  $W_{\delta}$  можуть бути визначені як кінцеві значення (це кількість дій оператора на певну відмову). Зручною формою для реалізації запропонованої задачі аналізу аварійних ситуацій, зокрема функції  $\omega$  (5), може бути процедура на основі інформаційної моделі у вигляді логічної таблиці рішення.

## 5. 2. Розробка інформаційної моделі вирішення задачі діагностики відділення абсорбції-дистиляції ВКС

Найбільш зручною формою представлення інформаційної моделі вирішення задачі діагностики відділення абсорбції-дистиляції ВКС є модель у вигляді логічної таблиці вирішення із застосуванням логічного методу діагностики [11, 17].

Основою застосування логічного методу діагностики аварійних ситуацій систем автоматизації технологічних процесів є логічний вираз «якщо ..., тоді ...», який є передумовою для вирішення завдання діагностики надійності роботи таких систем. Цей метод базується на апріорних знаннях про аварійні виробничі ситуації та деяких статистичних даних при створенні математичної моделі у вигляді логічних таблиць вирішення (ЛТВ) діагностики аномальних ситуацій.

ЛТВ є формальним методом опису в загальному випадку множини симптомів, що характеризують певну виробничу ситуацію, результатів діагнозу або необхідних дій для усунення можливих відмов. ЛТВ розділена двійними лініями на 4 квадранта. Умовна нумерація квадрантів проводиться проти часової стрілки, при цьому верхній правий квадрант – перший (табл. 5).

Перший квадрант ЛТВ заключає в собі вектор аналізу аварійних ситуацій, другий – складається із переліку симптомів. Третій квадрант складається із результатів аналізу (переліку відмов та дій по їх усуненню), четвертий – факт наявності чи відсутності векторів аналізу аварійних ситуацій симптомів у першому

квадранті. Пояснимо детальніше правила побудови першого та четвертого квадрантів ЛТВ. Наприклад, кількість рядків, першого квадранту визначається кількістю симптомів  $S_{yi}$ , а кількість стовбців – кількістю відмов  $N_{ri}$ . Аналогічно, кількість рядків та стовбців четвертого квадранту дорівнюють кількості відмов. Перший квадрант заповнюється наступним чином: на перетині  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовбцю ставиться «1», якщо  $i$ -ий симптом має місце для  $j$ -ої відмови; «0», якщо симптом відсутній; «–», якщо симптом може бути присутнім або відсутнім. Порядок заповнення четвертого квадранту наступний: на перетині  $i$ -го рядку та  $j$ -го стовбцю ставиться «1», якщо  $j$ -ий стовбець вектору аналізу аварійних ситуацій має місце для  $i$ -ої відмови. При дослідженні реальних об’єктів управління кожний вектор аналізу аварійних ситуацій отримують послідовною перевіркою умов усієї чисельності симптомів другого квадранту ЛТВ. Ці симптоми характеризуються як значеннями технологічних та конструктивних параметрів об’єкту управління, так і значеннями основних параметрів технологічного процесу.

Таблиця 5  
Загальний вигляд логічної таблиці вирішення

| Назва симптомів          | Вектор аналізу аварійних ситуацій |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | 1                                 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | ... | $L$ |
| Симптом 1                | 1                                 | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   |     | –   |
| Симптом 2                | 1                                 | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   |     | –   |
| Симптом 3                | 1                                 | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   |     | –   |
| ...                      | ...                               | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Симптом $K$              | –                                 | 0   | 1   | 0   | –   | –   |     | –   |
| Результат аналізу (РА)1  | 1                                 | 1   | –   | –   | –   | –   |     | –   |
| – “ – РА2                | –                                 | –   | 1   | –   | –   | –   |     | –   |
| – “ – РА3                | –                                 | –   | –   | 1   | –   | –   |     | –   |
| ...                      | ...                               | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Результат аналізу РА $m$ | –                                 | –   | –   | –   | 1   | 1   |     | –   |

Розглянемо фрагмент реального варіанту ЛТВ стану технологічного процесу першого елемента відділення абсорбції-дистиляції, представлений в табл. 6 з урахуванням даних табл. 3, 4. Допустимі величини відхилень кожного конкретного параметру ( $Z_{qi}$ ) уточнюються на кожному етапі реалізації ЛТВ.

Із-за простоти аналізу ЛТВ інших пояснень не потрібно. ЛТВ однаково доступна оператору, програмісту та можуть служити ефективною мовою зв’язку між ними при вирішуванні загальної задачі.

Таблиця 6  
Фрагмент логічної таблиці вирішення і-го елемента відділення  
абсорбції-дистиляції ВКС

| Назва симптомів |  | Вектор аналізу аварійних ситуацій |   |   |   |   |   |     |   |
|-----------------|--|-----------------------------------|---|---|---|---|---|-----|---|
|                 |  | 1                                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | ... | L |
| 1               | $80 \leq X_{1i} \leq 160$  | 0                                 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |     | – |
| 8               | $Z_{1i}^t - Z_{1i}^B > 25$   | 1                                 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |     | – |
| 9               | $Z_{2i}^t - Z_{2i}^B > 20$   | 1                                 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |     | – |
| 10              | $Z_{3i}^t - Z_{3i}^B > 5$  | 1                                 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |     | – |
| 12              | $Z_{2i}^t - Z_{3i}^t > 20$   | 0                                 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |     | – |
| 18              | $Z_{3i}^H - Z_{3i}^t < 3$  | 0                                 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |     | – |
| 19              | $Z_{4i}^H - Z_{4i}^t < 3$  | 0                                 | 0 | – | 0 | 0 | 1 |     | – |
| 20              | $Z_{3i}^t - Z_{4i}^t > 15$   | 0                                 | – | 0 | 0 | 0 | 1 |     | – |
| 24              | $Z_{12i}^t - Z_{12i}^B > 5$  | –                                 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |     | – |
| 29              | $Z_{14i}^H - Z_{14i}^t < 3$  | 0                                 | – | 0 | 0 | 0 | 1 |     | – |
| 7               | Переповнення нижньої бочки ДС                                      | 1                                 |   | – | – | – | – |     |   |
| 8               | Забивання одного із переливів ДС                                   | –                                 | 1 | – | – | – | – |     |   |
| 9               | Переповнення нижньої бочки ТДС із-за перенавантаження ТДС          | –                                 | – | 1 | – | – | – |     |   |
| 10              | «Зависання» ТДС  | –                                 | – | – | 1 |   | – |     |   |
| 11              | Переповнення нижньої бочки ТДС із-за забивання виходу із ЗМ        | –                                 | – | – |   | 1 | – |     |   |
|                 | ...  |                                   |   |   |   |   |   |     |   |
| 12              | Різке підвищення температури газу абсорбції – «розігрів» абсорбції | –                                 | – | – | – | – |   |     | – |

### 5.3. Визначення процедури перетворення логічної таблиці вирішення діагностики аномальних ситуацій для її програмування

Реалізацію ЛТВ виконують на базі сучасних МПК в декілька етапів.

На першому етапі ЛТВ використовують для своєчасного та правильного визначення причини аварійної ситуації об'єкту управління та усунення причини цих аварійних ситуацій в автоматичному режимі або вручну.

На другому етапі при умові інтерактивних процедур навчання МПК та уточнення ЛТВ з'являється можливість прогнозувати настання відмов об'єкту управління та усунути їх достовірні причини.

На третьому етапі при умові реалізації основних задач автоматизованої системи управління технологічними процесами конкретного об'єкту управління ЛТВ адаптується в алгоритми управління цим об'єктом за критерієм управління.

Для перетворення ЛТВ в програми для МПК необхідно застосовувати найбільш ефективний (з точки зору обсягу пам'яті та часу перетворення) метод трафаретного правила, який полягає в безпосередньому програмуванні ЛТВ [13].

Для перетворення ЛТВ (табл. 6) в програми для МПК використовують перший (верхній правий) квадрант ЛТВ, на основі якого складають дві матриці.

Першу матрицю називають «трафаретною» і позначають «Т»; її отримують шляхом заміни всіх істотних входів умов, тобто («1» і «0» ) одиницями –«1», а неістотних умов, тобто («–») нулями – «0».

Другу матрицю називають «вирішальною» і позначають «В»; її отримують шляхом позначення всіх стверджувальних входів умов, тобто («1») одиницями – «1», а усіх інших входів умов, тобто («0» та тире «–») нулями – «0».

$$\text{матриця "Т"} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

$$\text{матриця "В"} \begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix}$$

Обидві матриці, які зображують собою набір «двійчастих» нулів та одиниць, послідовно записують в пам'ять МПК стовпцями. Числа записують в комірки, адреси яких розташовують за зростанням, що відповідає послідовному запису стовпців кожної матриці («Т» та «В»).

Для отримання результату, який відповідає будь-якому «вектору вирішення» ЛТВ, виконують за наступною процедурою. Виконують логічне множення цього «вектора вирішення» на перший стовпець матриці «Т». При цьому отримують «проміжний вектор», який порівнюють шляхом складання за «модулем 2» із першим стовпцем матриці «В». Якщо «вектор результату порівняння» виявиться рівним «нульовому вектору-стовпцю», тоді отримують діагноз, який відповідає першому стовпцю матриці «В», тобто будь-якому «вектору вирішення» ЛТВ. Якщо «вектор результату порівняння» не дорівнює «нульовому

вектору-стовпцю», тоді послідовно повторюють наведені кроки та дії алгоритму для других стовпців матриць «Т» та «В» і так далі.

Отримані матриці за вище приведеною процедурою записують в пам'ять МПК. Наприклад, для отримання результату аналізу «вектору вирішення» другого стовпця ЛТВ (табл. 6), виконаємо всі необхідні кроки та дії вищенаведеної процедури за першими стовпцями матриць «Т» та «В», які занесемо до табл. 7.

Перший стовпець (табл. 7) відповідає «вектору вирішення» другого стовпця ЛТВ (табл. 6); у другому стовпці записано знак логічного множення; у третьому – вектор першого стовпця матриці «Т». У четвертому – знак рівності логічного множення; у п'ятому – «проміжний вектор», тобто результат логічного множення; у шостому – знак логічного складання «за модулем 2»; у сьомому – вектор першого стовпця матриці «В»; у восьмому – знак рівності «за модулем 2»; у дев'ятому – вектор результату порівняння «за модулем 2» п'ятого і сьомого стовпців табл. 7.

Таблиця 7

Результати аналізу другого «вектору аналізу» аварійних ситуацій за першими стовпцями матриць «Т» та «В»

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ∧ | 1 | = | 0 | ⊕ | 1 | = | 1 |
| 1 |   | 1 |   | 1 |   | 0 |   | 1 |
| 0 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 1 |   | 1 |   | 1 |   | 1 |   | 0 |

Аналіз отриманого результату за табл. 7 говорить про те, що «вектор результату порівняння» (9 стовпець) не дорівнює «нульовому вектору стовпцю», тобто треба послідовно повторити наведені дії для другого стовпця матриць «Т» і «В», а результат занести до табл. 8.

Таблиця 8

Результати аналізу другого «вектору аналізу» аварійних ситуацій за другими стовпцями матриць «Т» та «В»

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ∧ | 1 | = | 0 | ⊕ | 0 | = | 0 |
| 1 |   | 1 |   | 1 |   | 1 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 0 |   | 1 |   | 0 |   | 0 |   | 0 |
| 1 |   | 1 |   | 1 |   | 1 |   | 1 |

В табл. 8 записи в 1, 2, 4, 6, 8 стовпцях такі ж, як у відповідних стовпцях табл. 7, а в третьому стовпці записано вектор другого стовпця матриці «Т», в сьомому – другий вектор матриці «В», в дев'ятому – результат порівняння – «нульовий вектор-стовпець».

Тобто, вибраний «вектор вирішення» другого стовпця першого квадранта ЛТВ (табл. 7), який отримано із урахуванням симптомів другого квадранта цієї ж ЛТВ, відповідає результату аналізу (четвертий квадрант) – «1», назва якого «переповнення нижньої бочки ДС» (третій квадрант). Такі ж правильні результати були отримані і для інших стовпців цієї ЛТВ.

Отримані результати табл. 7, 8 підтвердили правильність застосування методу трафаретного правила для діагностики аварійних ситуацій, який полягає в безпосередньому програмуванні ЛТВ та реалізації за допомогою МПК.

## **6. Обговорення результатів дослідження з розробки системи діагностики аварійних ситуацій відділення абсорбції-дистиляції ВКС**

Для розробки системи діагностики та виявлення аварійних ситуацій відділення абсорбції-дистиляції ВКС за приведеними симптомами табл.3 визначено задачу (5) діагностики. Задача полягає в отриманні функції, яка зв'яже симптоми відмов та причини відмов. Додатковою задачею є отримання переліку відмов (6) (пов'язаних з причинами, які ще не проявилися), а, отже, і рекомендацій (7) щодо їх усунення.

Вирішення задачі діагностики аварійних ситуацій потребує розробки інформаційної моделі. Зручною формою представлення інформаційної моделі вирішення задачі діагностики є логічна таблиця вирішення (ЛТВ) – табл. 5. Ця модель є формальним описанням в загальному випадку схеми отримання множини симптомів, що характеризують певну технологічну ситуацію, а також результатів аналізу або необхідних дій для усунення можливих відмов. Основою розробки ЛТВ діагностики аварійних ситуацій є логічний вираз «якщо ..., тоді ...».

Було розглянуто фрагмент реального варіанту ЛТВ стану технологічного процесу *i*-го елемента відділення абсорбції-дистиляції, представлений в табл. 6 з урахуванням даних табл. 3, 4. Допустимі величини відхилень кожного конкретного параметру уточнюються на кожному етапі реалізації ЛТВ. Головною перевагою ЛТВ є простота реалізації та може бути ефективною мовою розуміння між технологом-оператором і програмістом для вирішення задачі діагностики.

Реалізацію ЛТВ для діагностики аварійних ситуацій виконують на базі сучасних МПК в декілька етапів, при цьому підвищується надійність функціонування технологічного процесу відділення абсорбції-дистиляції ВКС на кожному із них. Для реалізації процедури перетворення ЛТВ для МПК застосовується найбільш ефективний з точки зору обсягу пам'яті та часу перетворення метод трафаретного правила. Для перетворення ЛТВ (табл. 6) в програми для МПК використовують перший (верхній правий) квадрант ЛТВ, на основі якого складають дві матриці. Першу матрицю називають «трафаретною» її отримують шляхом заміни всіх істотних входів умов, тобто («1» і «0») одиницями –«1», а неістотних умов, тобто («–») нулями – «0». Другу матрицю називають «вирішальною» її отримують шляхом позначення всіх стверджувальних входів умов, тобто («1») одиницями –

«1», а усіх інших входів умов, тобто («0» та тире «-») нулями – «0». Обидві матриці, які зображують собою набір «двійчастих» нулів та одиниць, послідовно записують в пам'ять МПК стовпцями. Числа записують в комірки, адреси яких розташовують за зростанням, що відповідає послідовному запису стовпців кожної матриці («Т» та «В»). Для отримання результату, який відповідає будь-якому «вектору вирішення» ЛТВ, виконують за процедурою табл. 7, 8.

Недоліком дослідження є те, що в умовах ВКС неможливо реалізувати систематичний активний експеримент з метою знаходження або попередження аварійних ситуацій. Це пов'язане з тим, що ВКС безперервне та існують вимоги дотримання режиму нормального функціонування технологічного процесу. Отже, процедура та система діагностики аварійних ситуацій повинні бути реалізовані на основі пасивних спостережень за ходом технологічного процесу.

Суттєве значення для ведення технологічних процесів ВКС мають інтуїтивні методи діагностики даних контролю роботи окремих апаратів та обладнання. Чим вище кваліфікація технолога-оператора, тим вище якісні показники виробництва та його стадій. Однак кількість обладнання, що входить в «сферу обслуговування», отже і об'єм інформації, яку технолог-оператор отримує та повинен переробити, настільки великий, що для прийняття правильного рішення залишається дуже мало часу. Отже, інтуїтивні методи рішення задачі діагностики навіть досвідчених технологів-операторів не завжди гарантують нормальний хід технологічного процесу та можуть привести до матеріальних втрат.

Більшість систем автоматизованого управління ВКС, наприклад у роботі [5], розпочинають процес управління після появи суттєвого розузгодження, що робить процес управління відносно інерційним. Також ці системи не усувають саму причину відмови, які викликають розузгодження системи, а впливають лише на симптоми відмов. Розроблена система діагностики сприяє вирішенню цього питання. А також дозволить на ранніх стадіях виявити можливі неполадки в проходженні технологічного процесу, чим значно зменшити час управління і, як наслідок, підвищити якість автоматизованого управління.

Існуючі на сьогодні публікації в області діагностики аварійних ситуацій ВКС майже відсутні, або приведена тільки вельми загальна інформація технічного характеру та відсутні дані про розробку та застосування системи діагностики аварійних ситуацій. Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності автоматизованих систем управління відділення абсорбції-дистиляції ВКС та ВКС в цілому.

## **7. Висновки**

1. Визначено задачу діагностики відділення абсорбції-дистиляції ВКС. Особливість задачі полягає у визначенні причини переходу технологічного процесу в аварійний стан та в отриманні функції, яка зв'яже симптоми відмов та їх причини. Формулювання задачі діагностики дозволяє перейти до визначення процедури її вирішення.

2. В зазначеному дослідженні проведено розробку інформаційної моделі вирішення задачі діагностики аномальних ситуацій відділення абсорбції-

дистиляції ВКС. Особливістю інформаційної моделі є представлення її у вигляді логічної таблиці вирішення, що дає можливість простого встановлення взаємозв'язку між відмовами, симптомами і причинами відмов та реалізації процедури перетворення логічної таблиці вирішення для програмування на МПК.

3. Для реалізації процедури перетворення логічної таблиці вирішення діагностики аномальних ситуацій відділення абсорбції-дистиляції ВКС для програмування на МПК було визначено зручний та ефективний з точки зору об'єму пам'яті та часу перетворення метод трафаретного правила. Сутність даного методу полягає в складанні двох матриць (трафаретної та вирішальної) на основі першого (верхнього правого) квадранту логічної таблиці вирішення. З точки зору практичної реалізації запропонована процедура перетворення відкриває можливість підвищення надійності експлуатації та якості функціонування відділення абсорбції-дистиляції ВКС.

### Література

1. Steinhauser, G. (2008). Cleaner production in the Solvay Process: general strategies and recent developments. *Journal of Cleaner Production*, 16 (7), 833–841. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.04.005>
2. Бобух, А. А., Дзевочко, А. М., Подустов, М. А., Переверзева, А. Н., Романенко, Р. С. (2015). Выбор и оптимизация критерия управления объектом абсорбции-десорбции производства кальцинированной соды. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 4, 72–81.
3. Зайцев, И. Д., Ткач, Г. А., Стоев, Н. Д. (1984). *Производство соды*. М.: Химия, 312.
4. Ладанюк, А. П., Заєць, Н. А., Власенко, Л. О. (2016). *Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування)*. Київ: Видавництво Ліра-К, 312.
5. Cheng, S. E. (2011). Manufacturing Execution System Based on the Soda Ash Industry. *Advanced Materials Research*, 383-390, 780–784. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.383-390.780>
6. Czichos, H. (2014). Technical diagnostics: principles, method, and application. *The journal of measurement science*, 9, 32–40.
7. Власенко, Л. О., Ладанюк, А. П., Сич, М. А. (2014). Статистическая диагностика процесса функционирования выпарной станции сахарного завода. *Автоматизація технологічних та бізнес процесів*, 2, 50–60.
8. Панкин, А. М. (2010). Некоторые вопросы методологии диагностирования непрерывных технических объектов. *Труды международного симпозиума «надежность и качество»*, 1, 42–48.
9. Меккель, А. М. (2017). Диагностическая модель возможных состояний объекта. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 11 (7), 31–37.
10. Duer, S., Duer, R. (2010). Diagnostic system with an artificial neural network which determines a diagnostic information for the servicing of a reparable technical object. *Neural Computing and Applications*, 19 (5), 755–766. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-009-0333-4>

11. Бобух, А. А., Ковалёв Харк, Д. А. (2013). Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением. Харьков: ХНАГХ, 226.
12. Бигус, Г. А., Даниев, Ю. Ф., Быстрова, Н. А., Галкин, Д. И. (2014). Диагностика технических устройств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 615.
13. Махутов, Н. А., Пермяков, В. Н., Ахметханов, Р. С. и др. (2017). Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем. Тюмень: ТИУ, 632.
14. Глущенко, П. В. (2004). Техническая диагностика: Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов. М.: Вузовская книга, 248.
15. Dorf, R. C., Bishop, R. H. (2014). Modern Control Systems. Pearson India, 1048.
16. Ramachandran, K. M., Tsokos, C. P. (2014). Mathematical Statistics with Applications. Elsevier, 848.
17. Fogel, D. B., Liu, D., Keller, J. M. (2016). Fundamentals of Computational Intelligence. Wiley. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119214403>
18. Moshkov, M., Zielosko, B. (2011). Combinatorial Machine Learning. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20995-6>