

UDC 614.8

В.В. СМАЛІЙ*

ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І HAZOP-ДОСЛІДЖЕННЯ З МЕТОЮ КВАНТИФІКАЦІЇ НАСЛІДКІВ ВПЛИВУ ВІДХИЛЕНЬ НА ПАРАМЕТРИ СТАНУ ДЖЕРЕЛ НЕБЕЗПЕКИ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Процедура HAZOP є поширеним методом мозкового штурму, який застосовується з метою виявлення відхилень у роботі потенційно-небезпечного обладнання, їх причин і наслідків. У результаті HAZOP-сесії може бути встановлена можливість настання аварійної розгерметизації обладнання. Не дивлячись на ретельність і послідовність HAZOP-дослідження, усе ще поширеною є практика якісної оцінки впливу відхилень на подальші процеси в аварійному обладнанні. Такий підхід є основною причиною високої ймовірності помилки, особливо під час дослідження складних технологічних систем. Сучасні дослідження зосереджують увагу на тому, що саме комбінація кількісного підходу і HAZOP дає змогу підвищити точність експертного висновку і зумовити подальше застосування отриманої інформації для оцінки потенційних наслідків аварійної розгерметизації. Для HAZOP-дослідження складних хіміко-технологічних систем встановлено тенденцію до все більшого застосування динамічних моделей апаратів для виявлення числових показників впливу відхилень параметрів процесу на стан аварійного апарата. Однак, спостерігається брак загальної методичної бази застосування таких моделей у процесі сесії HAZOP, що зумовлено складністю організації сесії HAZOP і відсутністю впливу практичних аспектів реальної роботи експертної групи (учасників HAZOP) на інтеграцію моделювання у процес HAZOP. Ґрунтуючись на формалізованій моделі інформаційних потоків HAZOP-дослідження, було визначено оптимальне місце і порядок застосування математичної моделі аварійного апарата. Розроблена блок-схема алгоритму виконання HAZOP-дослідження з інтеграцією математичного моделювання впливу відхилень на параметри джерела небезпеки забезпечує як кількісний, так і якісний підхід HAZOP-дослідження в залежності від рішення експерта.

Ключові слова: HAZOP, моделювання, аналіз ризиків, модель інформаційних потоків, апарат, прогнозування наслідків, аварійна ситуація, граф, множина.

Abstract. The HAZOP procedure is a common brainstorming method used to identify deviations in the operation of potentially hazardous equipment, their causes and consequences. As a result of the HAZOP session, the possibility of an emergency depressurization of the equipment can be established. Despite the thoroughness and consistency of the HAZOP study, it is still a common practice to qualitatively assess the impact of deviations on subsequent processes in emergency equipment. This approach is the main reason for the high probability of errors, especially when studying complex technological systems. Modern research focuses on the fact that it is the combination of the quantitative approach and HAZOP that makes it possible to increase the accuracy of the expert opinion and to determine the further use of the information obtained to assess the potential consequences of emergency depressurization. For the HAZOP study of complex chemical and technological systems, there is a tendency to increasingly usage of dynamic modeling to identify numerical indicators of the impact of deviations in process parameters on the state of the emergency apparatus. However, there is a lack of a common methodological framework for the use of such models in the HAZOP session, which is due to the complexity of organizing the HAZOP session and the lack of influence of practical aspects of the real work of the expert group (HAZOP participants) on the integration of modeling into the HAZOP process. Based on the formalized model of information flows of a HAZOP study, the optimal place and procedure for applying the mathematical model of the emergency apparatus were determined. The developed block diagram of the HAZOP study algorithm with the integration of mathematical modeling of the impact of deviations on the parameters of the hazard source provides both a quantitative and qualitative approach to HAZOP study, depending on the expert's decision.

Keywords: HAZOP, modeling, risk analysis, information flow model, apparatus, consequence estimation, accident, graph, set.

1. Вступ

Ідентифікація небезпеки є важливим етапом у процесах управління ризиком. Зазвичай цей етап виконується експертами. Сучасні стандарти, міжнародні (IEC 31010:2019) рекомендують використовувати такі методи: checklists, FME(C)A, HAZOP, Scenario Analysis, SWIFT [1]. Процедура вивчення небезпеки та працездатності (HAZOP) — один із найкращих та найретельніших методів виявлення небезпек та проблем із працездатністю на хімічному підприємстві. Процедура HAZOP послідовно досліджує обладнання, а також відхилення від умов його нормальної роботи та розглядає можливі несправності. Звіт HAZOP містить відхилення в роботі обладнання, їх причини, наслідки, аналіз таких наслідків, реалізовані і пропоновані системи захисту [2].

HAZOP вимагає багатогодинної роботи команди досвідчених інженерів і для складних технологічних систем небезпека відхилення параметрів процесу в обладнанні навіть групою досвідчених фахівців без розрахунків не може бути виявлена однозначно [3].

Без застосування сучасних інформаційних технологій, що дозволяють моделювати складні технологічні системи [4], точність експертного висновку про зміну технологічних параметрів в устаткуванні суттєво знижується [5, 6].

Підхід, заснований на моделях [3, 5, 7], останніми роками набуває дедалі більшого значення.

Наприклад, у роботі [3] було досліджено інтеграцію математичного моделювання процесів установки синтезу метил трет-бутилового етеру (МТБЕ) і процедури HAZOP із метою виявлення потенційних загроз і встановлення причин їх появи. Наголошується важливість квантифікації відхилень і наслідків їх впливу на параметри джерела небезпеки, що дає змогу приймати обґрунтоване рішення стосовно можливості настання розгерметизації і подальшого моделювання початкових умов формування аварійних ситуацій при викиді небезпечних речовин у навколишнє середовище.

Автори [4] наголошують, що, з точки зору дослідження безпеки процесу, корисним буде поєднання етапів аналізу ризику з моделюванням технологічного процесу, що дає можливість оцінити стійкість процесу до переходу у небезпечний стан під час збурень вхідних параметрів (наприклад, температури чи складу вхідного потоку апарата).

Взаємозв'язок між аналізом HAZOP і математичним моделюванням технологічних процесів досліджувався у [8]. Було наголошено, що тільки моделювання дозволило повноцінно сформулювати рекомендації за результатами HAZOP-сесії.

Типова процедура HAZOP-дослідження, описана стандартом [2], не передбачає деталізованої моделі інформаційних потоків, а лише дає загальний опис процедури отримання відхилень із застосуванням керуючих слів до параметрів джерел небезпеки. Відсутня формалізація процесу визначення наслідків дії відхилень, лише наявні деякі рекомендації, наприклад, застосування погодженої експертної думки за методом Дельфі [9]. Зі свого боку математичне моделювання небезпечних процесів дає можливість отримати квантифіковані наслідки дії відхилень параметрів процесу на джерело небезпеки, що, на відміну від поширеної практики, дозволяє приймати рішення, керуючись кількісними показниками, а також отримувати повний набір параметрів для подальшого моделювання наслідків аварійної розгерметизації [5]. Але інтеграція математичного моделювання з HAZOP є ускладненою через комплексну ієрархічну модель інформаційних потоків процедури HAZOP.

Метою статті є формалізація моделі інформаційних потоків HAZOP-дослідження, що дозволить зрозуміти місце і умови застосування математичного моделювання впливу відхилень параметрів процесу на параметри стану джерела небезпеки.

2. Місце математичного моделювання у HAZOP-дослідженні

Модель інформаційних потоків HAZOP-дослідження може бути виражена у вигляді орієнтованого графа (рис. 1) [10].

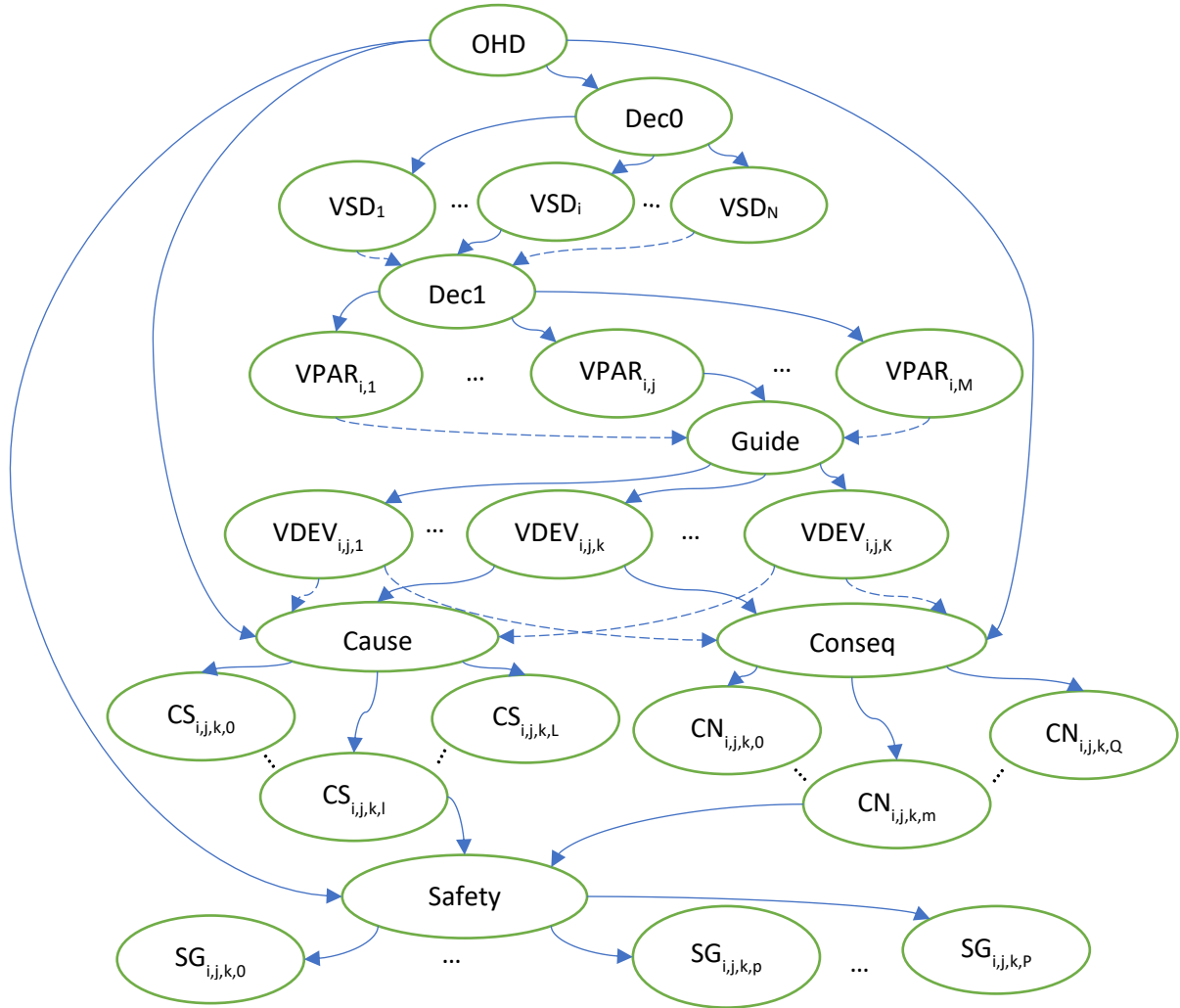


Рисунок 1 — Модель інформаційних потоків типового HAZOP-дослідження

Отриманий орієнтований граф HAZOP-дослідження можна представити у вигляді

$$G1 = (V, E),$$

де V — множина вузлів кожного рівня орграфа; E — множина спрямованих ребер, що з'єднують вузли графа як у межах рівня, так і між рівнями.

Зі свого боку множина V складається з підмножин і відображень (рис. 1):

$$V = \{OHD, VSD, VPAR, VDEV, CS, CN, SG, Dec0, Dec1, Guide, Cause, Consequence, Safeguard\},$$

де OHD — об'єкт підвищеної небезпеки (Object of High Danger); VSD — множина джерел небезпеки (Sources of Danger); $VPAR_i$ — множина параметрів i -го джерела небезпеки; $VDEV_{i,j}$ — множина відхилень j -го параметра i -го джерела небезпеки; $CS_{i,j,k}$ — множина причин k -го відхилення j -го параметра i -го джерела небезпеки; $CN_{i,j,k}$ — множина наслідків k -го відхилення j -го параметра i -го джерела небезпеки; $SG_{i,j,k}$ — множина захисних заходів для k -го відхилення j -го параметра i -го джерела небезпеки; Dec0 — функція декомпозиції об'єкта підвищеної небезпеки, представленого множиною OHD, на джерела небезпеки,

представлених множиною VSD; Dec1 — функція декомпозиції джерела небезпеки, представленого підмножиною VSD_i на параметри джерела небезпеки, представлених підмножиною PAR_i; Guide — функція генерації відхилень, представлених множиною кортежів VDEV_{i,j}, шляхом впливу керуючих слів на j -параметр i -го джерела небезпеки: PAR_{i,j}; Cause — функція генерації причин відхилення PAR_{i,j,k}, представленого у вигляді множини кортежів CS_{i,j,k}; Conseq — функція генерації наслідків відхилення PAR_{i,j,k}, представлених у вигляді множини кортежів CN_{i,j,k}; Safety — функція генерації захисних заходів, представлених у вигляді множини кортежів SG_{i,j,k}.

Вершина OHD графа G1 містить у собі необхідну і достатню структуровану множину інформації про об'єкт підвищеної небезпеки для забезпечення можливості виконання дослідження HAZOP. Нехай розглядається потенційний вплив уражаючих факторів на споруди і людей. Тоді представимо вершину OHD як множину у загальному вигляді:

$$OHD = \{MAP, SD, PAR, SGE, PPL, OBJ\},$$

де MAP — параметри просторового розподілу на місцевості джерел небезпеки, людей, споруд; SD — множина унікальних ідентифікаторів (назв) джерел небезпеки; PAR — множина параметрів, які описують джерела небезпеки і характеризуються числовим значенням, розмірністю і назвою; SGE — множина існуючих на об'єктах систем захисту; PPL — параметри груп людей, які можуть бути у зоні підвищеної небезпеки дії уражаючих факторів аварій; OBJ — параметри споруд, які можуть бути у зоні підвищеної небезпеки дії уражаючих факторів аварій.

Формально процедуру формування множини VSD можна представити у вигляді

$$VSD = \{x | x = Dec0(OHD)\} = \{(SD_1, PAR_1), \dots, (SD_i, PAR_i), \dots, (SD_N, PAR_N)\},$$

де SD_i — унікальний ідентифікатор i -го джерела небезпеки; PAR_i — кортеж параметрів, що описують i -те джерело небезпеки.

Процедуру формування підмножини VPAR_i можна представити у вигляді

$$VPAR_i = \{x | x = Dec1(VSD_i)\} = \{(SD_i, PAR_{i,1}), \dots, (SD_i, PAR_{i,j}), \dots, (SD_i, PAR_{i,M_i})\},$$

де PAR_{i,j} — j -й параметр i -го джерела небезпеки; M_i — кількість параметрів, що описують i -те джерело небезпеки.

Процедуру формування підмножини VDEV_{i,j} можна представити у вигляді

$$VDEV_{i,j} = \{x | x = Guide(VPAR_{i,j})\} = \{(PAR_{i,j}, GuideWord_1, SD_i), \dots, (PAR_{i,j}, GuideWord_k, SD_i), \dots, (PAR_{i,j}, GuideWord_{K_{i,j}}, SD_i)\},$$

де GuideWord_k — k -те керуюче слово, що застосовується до j -го параметра i -го джерела небезпеки; K_{i,j} — кількість керуючих слів, що застосовна до j -го параметра i -го джерела небезпеки.

Процедуру формування підмножини CS_{i,j,k} можна представити у вигляді

$$CS_{i,j,k} = \{x | x = Cause(OHD, VDEV_{i,j,k})\} = \{(Cause_1, VDEV_{i,j,k}, SD_i), \dots, (Cause_l, VDEV_{i,j,k}, SD_i), \dots, (Cause_L, VDEV_{i,j,k}, SD_i)\},$$

де Cause_l — l -та причина відхилення VDEV_{i,j,k} у джерелі небезпеки SD_i; L — кількість причин, що спричиняють відхилення VDEV_{i,j,k}.

Процедуру формування підмножини CN_{i,j,k} можна представити у вигляді

$$CN_{i,j,k} = \{x | x = Conseq(OHD, VDEV_{i,j,k})\} = \{(VDEV_{i,j,k}, SD_i, Consequence_1), \dots, (VDEV_{i,j,k}, SD_i, Consequence_m), \dots, (VDEV_{i,j,k}, SD_i, Consequence_Q)\},$$

де Consequence_m — m -й наслідок, спричинений відхиленням VDEV_{i,j,k} у джерелі небезпеки SD_i; Q — кількість наслідків, що можуть бути спричинені відхиленням VDEV_{i,j,k} у джерелі небезпеки SD_i.

Процедуру формування підмножини $SG_{i,j,k}$ можна представити у вигляді

$$SG_{i,j,k} = \text{Optimize}(\text{Safeguard}(CS_{i,j,k} \times CN_{i,j,k}), \text{Price}, \text{Risk}, \text{Redundancy}),$$

де $CS_{i,j,k} \times CN_{i,j,k}$ — декартовий добуток, що надає усі можливі комбінації причин і наслідків відхилення; $\text{Safeguard}(CS_{i,j,k} \times CN_{i,j,k})$ — функція, що генерує множину систем захисту для усіх можливих комбінацій причина-наслідок для окремого відхилення; $\text{Optimize}(\text{Safeguard}(CS_{i,j,k} \times CN_{i,j,k}), \text{Price}, \text{Risk}, \text{Redundancy})$ — функція оптимізації множини отриманих за допомогою функції Safeguard систем захисту за критеріями мінімізації вартості Price , неперевищення допустимого ризику Risk та неперевищення критерію надлишковості Redundancy .

Маючи достатню описову частину ієрархічної структури даних HAZOP-дослідження, можна сфокусуватися на інтеграції моделювання під час процедури HAZOP. За процедуру моделювання відповідає функція Conseq (рис. 1), вона ж надає можливість вибору між застосуванням експертної думки чи математичного моделювання. Стає очевидним, що для можливості застосування математичної моделі джерела небезпеки необхідна квантифікація кортежу відхилення:

$$VDEV_{i,j,k} = \text{Quant}((PAR_{i,j}, \text{GuideWord}_1, SD_i)) \rightarrow (PAR_{i,j}, \text{GuideWord}_1, \text{Disturbance}_{i,j,k}, SD_i),$$

де $\text{Disturbance}_{i,j,k}$ — значення параметра j -го джерела небезпеки i у результаті відхилення k .

3. Алгоритм інтеграції математичного моделювання у процес HAZOP-дослідження

Проведена математична формалізація процедури HAZOP дозволяє у повній мірі побачити структуру інформаційних потоків, сформулювати вимоги до інтеграції функції математичного моделювання на етапі визначення впливу відхилень на наслідки. На основі проведеного аналізу була побудована блок-схема алгоритму (рис. 2), яка враховує модель інформаційних потоків HAZOP (рис. 1).

Дослідивши інформаційний потік $\langle VDEV_{i,j,k}, \text{Conseq} \rangle$ (рис. 1), стає зрозумілим, що для коректного аналізу впливу відхилення необхідно вивести динамічну математичну модель апарата (джерела небезпеки) на стаціонар, що відповідає регламентним значенням параметрів процесу. Оскільки вихід моделі на стаціонар є ресурсоемним процесом, то виконання даної процедури під час емуляції кожного відхилення є неприйнятним у процесі сесії HAZOP. Більш ефективним виглядає налаштування моделі на стаціонар після декомпозиції ОПН на джерела небезпеки, збереження і подальша мультиплікація цього стану для кожного окремого відхилення параметра процесу (рис. 2).

Декомпозиція ОПН і налаштування моделі джерела небезпеки шляхом виведення її на стаціонар може виконуватися як підготовчий етап перед HAZOP-сесією.

Водночас збережена можливість вибору між методом визначення наслідків впливу відхилення експертною думкою, що забезпечується відповідною процедурою умови на основі значення параметра EO :

- $EO = \text{"True"}$ — вплив відхилення параметра процесу на наслідки визначається експертними методами (Дельфі чи ін.);
- $EO = \text{"False"}$ — вплив відхилення параметра процесу на наслідки визначається шляхом динамічного моделювання.

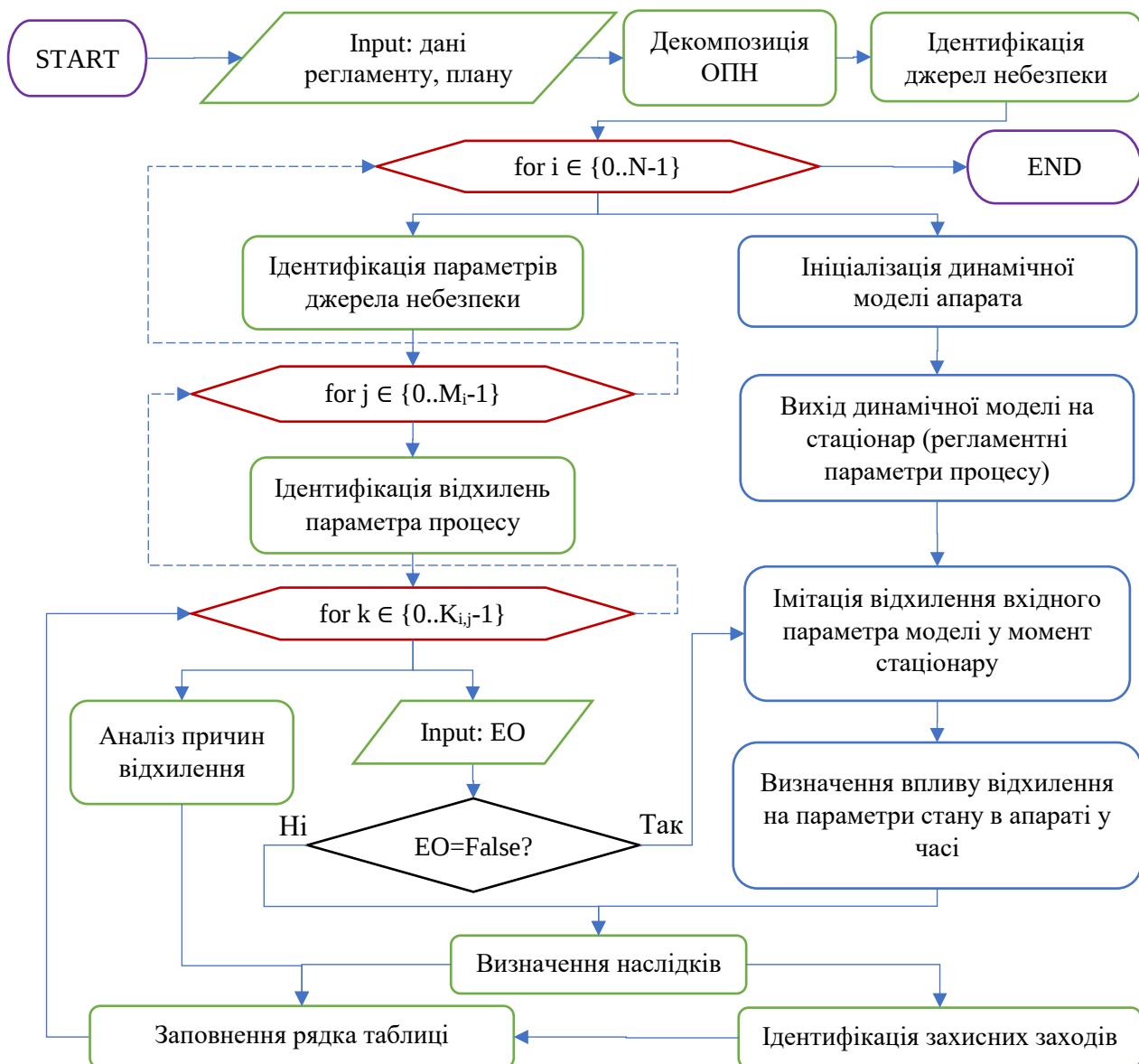


Рисунок 2 — Блок-схема алгоритму виконання HAZOP-дослідження з інтеграцією математичного моделювання впливу відхилень на параметри джерела небезпеки

4. Висновки

Запропонована модель інформаційних потоків процедури HAZOP дозволила розробити метод аналізу впливу відхилення параметра процесу на параметри стану апарата на основі динамічної математичної моделі апарата. Важливим етапом є стаціонарування параметрів моделей із наближенням до регламентних значень, який доцільно виконувати як підготовчий етап до сесії HAZOP. Отриманий підхід є масштабованим і реалізованим як частина інформаційної технології безпеки й інтегрується у HAZOP-сесію як додатковий інструмент підтримки роботи експерта у ситуаціях невизначеності.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques. (First edition 01.07.2019). URL: <https://www.iso.org/standard/72140.html> (accessed: 09.09.2023).

2. Standards E. BS EN 61882:2016. Hazard and operability studies (HAZOP studies). Application guide. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-61882-2016-hazard-and-operability-studies-hazop-studies-application-guide/> (дата звернення: 09.09.2023).
3. Labovský J., Švandová Z., Markoš J. et al. Model-based HAZOP study of a real MTBE plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20, N 3. P. 230–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.03.015>.
4. Pasman H., Reniers G. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 28. P. 2–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.004>.
5. Elhosary E. Automation for HAZOP study: A state-of-the-art review and future research directions. *Journal of Information Technology in Construction*. 2024. N 29. P. 750–777. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.033>.
6. Бегун В.В. Методологічні основи інформаційної технології управління безпекою на основі ризик-орієнтованого підходу: дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. Київ, 2020. 553 с. URL: http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Dysertaciji/dis_Begun_2020.pdf (accessed: 09.09.2023).
7. Danko M., Janošovský J., Labovský J. et al. Integration of process control protection layer into a simulation-based HAZOP tool. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 57. P. 291–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.12.006>.
8. Jelemenský L. Use of LOPA Concept to Support Automated Simulation-Based HAZOP Study. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 67. P. 283–288.
9. RAND Methodological Guidance for Conducting and Critically Appraising Delphi Panels: handbook / Khodyakov D. et al. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2023. 72 p. URL: <https://www.rand.org/pubs/tools/TLA3082-1.html> (дата звернення: 19.04.2025).
10. West D.B. Introduction to Graph Theory: handbook. Subsequent edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson College Div, 2000. 588 p. ISBN 978-0-13-014400-3.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2025