

## ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.314

В.Б. Абрамов, О.В. Шутенко, Д.М. Баклай

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СЕРЕДНІХ РИЗИКІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ КОНЦЕНТРАЦІЙ РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ГАЗІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ТРАНСФОРМАТОРАХ 110 КВ

The comparative analysis of values of average risk, which are accompanied by use of boundary values of concentration of the gases dissolved in oil recommended by known techniques, is presented in this article. For the solution of the given problem, expression for calculation of average risk taking into account laws of distributions of concentration of gases for defectless states and defective states, in conditions, when diagnostics is made on a complex of diagnostic parameters is offered. Using methods of numerical integration, probabilities of correct and erroneous decisions for each of five methods have been calculated. The performed analysis of the received values of average risk has shown that the minimum economic losses will be accompanied by use of boundary concentration recommended by method IEC 60599. Dependences of values of average risks on probability of occurrence of defects in power transformers of a class 110 кВ not hermetically execution were investigated. Analyzed dependences of values of average risks on relation of the prices erroneous decisions. Distinctions in character of these dependences for various techniques were established. The analysis of dependences of value of average risk on probability of occurrence of defects and relations of the prices from erroneous decisions, has specified in necessity of updating of boundary values of concentration of gases taking into account the given factors.

**Keywords:** diagnostics, defects recognition, methods of interpreting the results of chromatographic analysis, the laws of distribution of gas concentrations, the probability of error types I and II, the average risk.

#### Вступ

Інтерпретацію результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів (ХАРГ), яка використовується для виявлення дефектів у силових трансформаторах, зокрема наведено в [1–7]. У цих опублікованих джерелах (частина з яких належить до нормативних документів), крім прописаної послідовності дій для уточнення виду, характеру або місця дефекту, надається також вказівка стосовно того, коли варто проводити зазначені дії. Такою вказівкою, як правило, є підтвердження наявності дефекту або відхилення від бездефектного (нормального, типового) стану силових трансформаторів на підставі виявленого перевищення певного значення концентрацій розчинених газів. Згідно з вказаними публікаціями, ці значення концентрацій називають типовими або граничними, а їх числові величини – відрізняються. Очевидно, що, використовуючи для виявлення дефектів різні значення граничних концентрацій, можна отримати й різні висновки про стан вказаних трансформаторів.

У праці [8] запропоновано й обґрунтовано застосування методики оцінки значення середнього ризику під час діагностики трансформаторів за критерієм граничних концентрацій розчинених у маслі газів. Ця методика може бути використана також у разі аналізу застосування таких критеріїв, наведених у низці існуючих публікацій.

#### Постановка задачі

Враховуючи відмінності величин концентрацій розчинених у маслі газів, які мають сприйматись як граничні для прийняття рішення про ймовірність появи дефекту в силових трансформаторах, вибір їх оптимальних значень є актуальним й становить практичний інтерес. Запропонований у [8] підхід дає можливість виконати порівняння середніх ризиків у разі використання рекомендованих (у т.ч. різними нормативними документами) граничних концентрацій газів для інтерпретації результатів ХАРГ. Для прикладу в статті буде проведено аналіз середніх ризиків для випадків використання граничних концентрацій газів, наведених у п'ятьох публікаціях з інтерпретації результатів ХАРГ. Метою такого аналізу є визначення тих граничних концентрацій, які будуть мінімізувати вказані ризики.

#### Метод вирішення

Під час аналізу результатів діагностики стану технічного об'єкта з комплексу діагностичних ознак [9] використовується поняття середнього ризику, вираз для якого у разі діагностики трансформаторів за критерієм граничних концентрацій розчинених у маслі газів має згідно з [8] такий вигляд:

$$R = C_{11}P_1 \int_{S_1} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) d\mathbf{x} + C_{21}P_1 \int_{S_2} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) d\mathbf{x} + \\ + C_{12}P_2 \int_{S_1} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_2}\right) d\mathbf{x} + C_{22}P_2 \int_{S_2} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_2}\right) d\mathbf{x}, \quad (1)$$

або

$$R = C_{11}P_1P_{11} + C_{21}P_1P_{21} + C_{22}P_2P_{22} + C_{12}P_2P_{12},$$

де  $\mathbf{x}$  – вектор діагностичних ознак (значення концентрацій розчинених у маслі газів);  $P_1 = P(D_1)$  – апіорна ймовірність відсутності дефекту в трансформаторі;  $P_2 = P(D_2)$  – апіорна ймовірність появи дефекту в трансформаторі;

$P_{21} = \int_{S_1} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) d\mathbf{x}$  – ймовірність хибної тривоги,

(похибка I-го роду – випадок, коли ухвалюється рішення про наявність дефекту, але в дійсності трансформатор перебуває в справному стані);

$P_{12} = \int_{S_2} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_2}\right) d\mathbf{x}$  – ймовірність пропуску цілі (похибка II-го роду – ухвалення рішення про справний стан, тоді як трансформатор має дефект);

$P_{11} = \int_{S_1} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) d\mathbf{x}$  – ймовірність правильного рішення у разі діагностики бездефектного трансформатора (ймовірність того, що значення концентрацій газів будуть менші за граничне при відсутності дефекту);

$P_{22} = \int_{S_2} f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_2}\right) d\mathbf{x}$  – ймовірність правильного рішення у разі діагностики дефектного об'єкта (ймовірність того, що при наявності дефекту концентрація хоча б одного з газів перевищить граничні значення);  $C_{21}$  – вартість хибної тривоги;  $C_{12}$  – вартість пропуску цілі;  $C_{11}$  – вартість правильного рішення у разі діагностики бездефектного трансформатора;  $C_{22}$  – вартість правильного рішення у разі діагностики трансформатора, що має дефект;  $S_1, S_2$  – багатовимірні області інтегрування, які характеризують ймовірності правильних рішень, хибної тривоги й пропуску цілі;  $D_1$  – дефектний стан;  $D_2$  – справний (бездефектний) стан.

У виразі (1) статистичний розподіл діагностичних параметрів для стану  $D_1$

$$f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) = f\left(\frac{x_1, x_2, \dots, x_n}{D_1}\right). \quad (2)$$

Якщо параметри  $x_1, x_2, \dots, x_n$  статистично незалежні, тоді

$$f\left(\frac{\mathbf{x}}{D_1}\right) = f\left(\frac{x_1}{D_1}\right)f\left(\frac{x_2}{D_1}\right)\dots f\left(\frac{x_n}{D_1}\right). \quad (3)$$

Для визначення значень ймовірностей помилок I і II-го роду для багатовимірних розподілів діагностичних ознак необхідно ввести допущення, пов'язані з наявністю або відсутністю кореляції між розчиненими в маслі газами. Відомо [10, 11], що при відсутності дефектів і зовнішніх експлуатаційних впливів у баках трансформаторів негерметичного виконання значуща кореляція між газами відсутня. Тоді як наявність дефекту або зовнішнього експлуатаційного впливу характеризується значущою кореляцією між газами вуглеводневого ряду. Проте в літературі з технічної діагностики, наприклад у [9], рекомендується вважати ознаки незалежними навіть при наявності значущого кореляційного зв'язку між ними. Тому статичний розподіл діагностичних параметрів для станів  $D_1$  і  $D_2$  визначався за виразом (3).

Виконані в працях [12, 13] дослідження засвідчили, що розподіл концентрацій газів, розчинених у маслі як дефектних, так і бездефектних трансформаторів, підкорюється закону розподілу Вейбулла із щільністю

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\text{при } (0 \leq x < +\infty), (\alpha > 0; \beta > 0), \quad (4)$$

де  $\alpha, \beta$  – параметри закону розподілу, що інтерпретуються, відповідно, як параметр масштабу й параметр форми.

Взаємне розташування теоретичних щільностей розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів, наведено на рис. 1. З рис. 1 видно, що щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це означає, що принципово неможливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень. У зв'язку з цим доцільно оцінити величину можливого ризику в разі використання граничних концентрацій газів, рекомендованих різними національними стандартами й методиками.

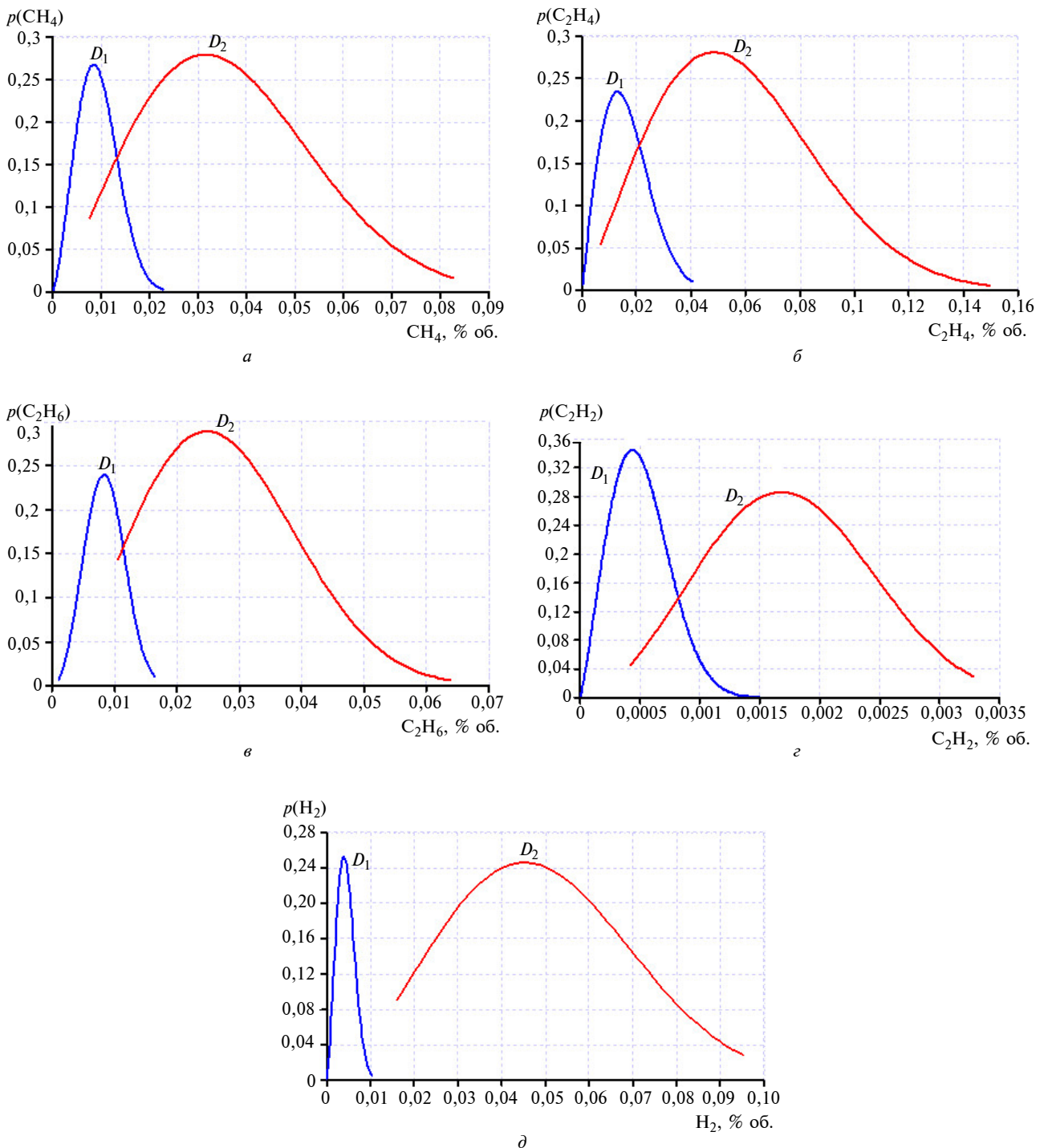


Рис. 1. Щільності теоретичних розподілів газів для бездефектного ( $D_1$ ) і дефектного ( $D_2$ ) станів метану (а), етилену (б), етану (в), ацетилену (г), водню (д)

Із врахуванням отриманих розподілів та виконаного у [8] аналізу, запишемо в загальному вигляді вираз для розрахунків імовірностей помилок I і II-го роду та ймовірностей правильних рішень.

**Імовірність правильного рішення** під час діагностики бездефектних трансформаторів (концентрації всіх п'яти газів нижче граничних) визначається за таким виразом:

$$\begin{aligned}
 P_{11} = & \int_{CH_{4(0)}}^{CH_{4гр}} \frac{\beta_{CH_4}}{\alpha_{CH_4}^{\beta_{CH_4}}} CH_4^{\beta_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\alpha_{CH_4}}\right)^{\beta_{CH_4}}} dCH_4 \times \\
 & \times \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4гр}} \frac{\beta_{C_2H_4}}{\alpha_{C_2H_4}^{\beta_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\beta_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\alpha_{C_2H_4}}\right)^{\beta_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times \\
 & \times \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2гр}} \frac{\beta_{C_2H_2}}{\alpha_{C_2H_2}^{\beta_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\beta_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\alpha_{C_2H_2}}\right)^{\beta_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\
 & \times \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6гр}} \frac{\beta_{C_2H_6}}{\alpha_{C_2H_6}^{\beta_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\beta_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\alpha_{C_2H_6}}\right)^{\beta_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \\
 & \times \int_{H_{2(0)}}^{H_{2гр}} \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{H_2}^{\beta_{H_2}}} H_2^{\beta_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\alpha_{H_2}}\right)^{\beta_{H_2}}} dH_2, \quad (5)
 \end{aligned}$$

де  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $H_2$  – значення концентрацій відповідних газів;  $CH_{4гр}$ ,  $C_{2H_{4гр}}$ ,  $C_{2H_{2гр}}$ ,  $C_{2H_{6гр}}$ ,  $H_{2гр}$  – граничні значення концентрацій відповідних газів;  $CH_{4(0)}$ ,  $C_{2H_{4(0)}}$ ,  $C_{2H_{2(0)}}$ ,  $C_{2H_{6(0)}}$ ,  $H_{2(0)}$  – нижня межа виявлення відповідних газів хроматографом;  $\alpha_{CH_4}$ ,  $\alpha_{C_2H_4}$ ,  $\alpha_{C_2H_2}$ ,  $\alpha_{C_2H_6}$ ,  $\alpha_{H_2}$  – параметри масштабу закону розподілу Вейбулла для концентрацій відповідних газів у бездефектних трансформаторах;  $\beta_{CH_4}$ ,  $\beta_{C_2H_4}$ ,  $\beta_{C_2H_2}$ ,  $\beta_{C_2H_6}$ ,  $\beta_{H_2}$  – параметри форми закону розподілу Вейбулла для концентрацій відповідних газів у бездефектних трансформаторах.

**Імовірність помилки I-го роду** буде зумовлена тим, що за відсутності дефекту в трансформаторі концентрація хоча б одного з газів перевищить граничне значення. Оскільки діагностика здійснюється за комплексом ознак, імовірність помилки I-го роду буде дорівнювати сумі імовірностей перевищення концентрації одним, двома, трьома, чотирма й п'ятьма газами в бездефектних трансформаторах. Для визначення повної кількості можливих комбінацій у [8] використовували такий вираз:

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!}, \quad (6)$$

де  $k$  – число газів;  $m$  – число елементів у комбінації.

Кількість можливих комбінацій для п'яти газів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Число можливих комбінацій п'яти газів

Число елементів у комбінації				
1	2	3	4	5
5	10	10	5	1

Як видно з табл. 1, для визначення ймовірності помилки I-го роду необхідно виконати числове інтегрування виразу (3) 31 раз, змінюючи відповідні межі інтегрування. Вираз для розрахунків імовірності помилки I-го роду можна подати так:

$$\begin{aligned}
 P_{21} = & \left[ \int_{CH_{4гр}}^{\infty} \frac{\beta_{CH_4}}{\alpha_{CH_4}^{\beta_{CH_4}}} CH_4^{\beta_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\alpha_{CH_4}}\right)^{\beta_{CH_4}}} dCH_4 \times \right. \\
 & \times \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4гр}} \frac{\beta_{C_2H_4}}{\alpha_{C_2H_4}^{\beta_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\beta_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\alpha_{C_2H_4}}\right)^{\beta_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times \\
 & \times 0 \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2гр}} \frac{\beta_{C_2H_2}}{\alpha_{C_2H_2}^{\beta_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\beta_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\alpha_{C_2H_2}}\right)^{\beta_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\
 & \times \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6гр}} \frac{\beta_{C_2H_6}}{\alpha_{C_2H_6}^{\beta_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\beta_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\alpha_{C_2H_6}}\right)^{\beta_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \\
 & \left. \times \int_{H_{2(0)}}^{H_{2гр}} \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{H_2}^{\beta_{H_2}}} H_2^{\beta_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\alpha_{H_2}}\right)^{\beta_{H_2}}} dH_2 \right] + \\
 & + \dots + \left[ \int_{CH_{4гр}}^{\infty} \frac{\beta_{CH_4}}{\alpha_{CH_4}^{\beta_{CH_4}}} CH_4^{\beta_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\alpha_{CH_4}}\right)^{\beta_{CH_4}}} dCH_4 \times \right. \\
 & \times \int_{C_2H_{4гр}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_4}}{\alpha_{C_2H_4}^{\beta_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\beta_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\alpha_{C_2H_4}}\right)^{\beta_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times \\
 & \times \int_{C_2H_{2гр}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_2}}{\alpha_{C_2H_2}^{\beta_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\beta_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\alpha_{C_2H_2}}\right)^{\beta_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\
 & \left. \times \int_{C_2H_{6гр}}^{\infty} \frac{\beta_{C_2H_6}}{\alpha_{C_2H_6}^{\beta_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\beta_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\alpha_{C_2H_6}}\right)^{\beta_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \right.
 \end{aligned}$$

$$\times \int_{H_{2гр}}^{\infty} \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{H_2}^{\beta_{H_2}}} H_2^{\beta_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\alpha_{H_2}}\right)^{\beta_{H_2}}} dH_2 \Bigg]. \quad (7)$$

**Значення імовірності помилки II-го роду** (ймовірність того, що за наявності дефекту концентрації всіх п'яти газів будуть менші граничних) визначалося так:

$$P_{12} = \left[ \int_{CH_{4(0)}}^{CH_{4гр}} \frac{\gamma_{CH_4}}{\eta_{CH_4}^{\gamma_{CH_4}}} CH_4^{\gamma_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\eta_{CH_4}}\right)^{\gamma_{CH_4}}} dCH_4 \times \right. \\ \times \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4гр}} \frac{\gamma_{C_2H_4}}{\eta_{C_2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\gamma_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\eta_{C_2H_4}}\right)^{\gamma_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times \\ \times \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2гр}} \frac{\gamma_{C_2H_2}}{\eta_{C_2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\gamma_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\eta_{C_2H_2}}\right)^{\gamma_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\ \times \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6гр}} \frac{\gamma_{C_2H_6}}{\eta_{C_2H_6}^{\gamma_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\gamma_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\eta_{C_2H_6}}\right)^{\gamma_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \\ \left. \times \int_{H_{2(0)}}^{H_{2гр}} \frac{\gamma_{H_2}}{\eta_{H_2}^{\gamma_{H_2}}} H_2^{\gamma_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\eta_{H_2}}\right)^{\gamma_{H_2}}} dH_2 \right], \quad (8)$$

де  $\eta_{CH_4}$ ,  $\eta_{C_2H_4}$ ,  $\eta_{C_2H_2}$ ,  $\eta_{C_2H_6}$ ,  $\eta_{H_2}$  – параметри масштабу закону розподілу Вейбулла для концентрацій відповідних газів у дефектних трансформаторах;  $\gamma_{CH_4}$ ,  $\gamma_{C_2H_4}$ ,  $\gamma_{C_2H_2}$ ,  $\gamma_{C_2H_6}$ ,  $\gamma_{H_2}$  – параметри форми закону розподілу Вейбулла для концентрацій відповідних газів у дефектних трансформаторах.

**Імовірність ухвалення правильного рішення** під час діагностики дефектних трансформаторів буде дорівнювати сумі ймовірностей перевищення концентрації одним, двома, трьома, чотирма й п'ятьма газами при наявності дефекту. Вираз для розрахунків імовірності ухвалення правильного рішення може бути подано у такому вигляді:

$$P_{22} = \left[ \int_{CH_{4гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{CH_4}}{\eta_{CH_4}^{\gamma_{CH_4}}} CH_4^{\gamma_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\eta_{CH_4}}\right)^{\gamma_{CH_4}}} dCH_4 \times \right. \\ \times \int_{C_2H_{4(0)}}^{C_2H_{4гр}} \frac{\gamma_{C_2H_4}}{\eta_{C_2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\gamma_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\eta_{C_2H_4}}\right)^{\gamma_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times$$

$$\times \int_{C_2H_{2(0)}}^{C_2H_{2гр}} \frac{\gamma_{C_2H_2}}{\eta_{C_2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\gamma_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\eta_{C_2H_2}}\right)^{\gamma_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\ \times \int_{C_2H_{6(0)}}^{C_2H_{6гр}} \frac{\gamma_{C_2H_6}}{\eta_{C_2H_6}^{\gamma_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\gamma_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\eta_{C_2H_6}}\right)^{\gamma_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \\ \times \int_{H_{2(0)}}^{H_{2гр}} \frac{\gamma_{H_2}}{\eta_{H_2}^{\gamma_{H_2}}} H_2^{\gamma_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\eta_{H_2}}\right)^{\gamma_{H_2}}} dH_2 \Bigg] + \dots + \\ + \dots + \left[ \int_{CH_{4гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{CH_4}}{\eta_{CH_4}^{\gamma_{CH_4}}} CH_4^{\gamma_{CH_4}-1} e^{-\left(\frac{CH_4}{\eta_{CH_4}}\right)^{\gamma_{CH_4}}} dCH_4 \times \right. \\ \times \int_{C_2H_{4гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{C_2H_4}}{\eta_{C_2H_4}^{\gamma_{C_2H_4}}} C_2H_4^{\gamma_{C_2H_4}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_4}{\eta_{C_2H_4}}\right)^{\gamma_{C_2H_4}}} dC_2H_4 \times \\ \times \int_{C_2H_{2гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{C_2H_2}}{\eta_{C_2H_2}^{\gamma_{C_2H_2}}} C_2H_2^{\gamma_{C_2H_2}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_2}{\eta_{C_2H_2}}\right)^{\gamma_{C_2H_2}}} dC_2H_2 \times \\ \times \int_{C_2H_{6гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{C_2H_6}}{\eta_{C_2H_6}^{\gamma_{C_2H_6}}} C_2H_6^{\gamma_{C_2H_6}-1} e^{-\left(\frac{C_2H_6}{\eta_{C_2H_6}}\right)^{\gamma_{C_2H_6}}} dC_2H_6 \times \\ \left. \times \int_{H_{2гр}}^{\infty} \frac{\gamma_{H_2}}{\eta_{H_2}^{\gamma_{H_2}}} H_2^{\gamma_{H_2}-1} e^{-\left(\frac{H_2}{\eta_{H_2}}\right)^{\gamma_{H_2}}} dH_2 \right]. \quad (9)$$

Як значення критеріїв, що будуть використані для оцінки величин середнього ризику, приймемо типові й граничні концентрації розчинених у маслі газів, які рекомендовані для застосування наступними нормативними документами (НД): ІЕС 60599 (Міжнародна електротехнічна комісія) [3], ANSI/IEEE Std C57.104 (США) [5], СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна) [1], РД 153.34.0-46.302-00 (Росія) [2] і документ Energoromiag (Польща) [4]. На підставі значень цих концентрацій відбувається віднесення технічного стану силових трансформаторів до якогось із різновидів, здебільшого – розмежування на “бездефектні” та “з імовірною наявністю дефектів”.

У ІЕС 60599 зазначено обмежений нижнім і верхнім рівнями діапазон значень концентрацій газів, які названі типовими. Тобто ті, що спостерігаються в 90 % випадків у всіх аналізо-

ваних трансформаторах, що не мають дефектів. Для випадків, коли концентрації газів перевищують такі типові значення, цей НД (як втім і більшість інших) рекомендує застосовувати ще критерій швидкості наростання й критеріальні відносини пар газів з метою визначення небезпеки, виду (характеру) дефекту й корегування періодичності відбору проб на ХАРГ.

Типовими названі також значення концентрацій газів, що наведені в ANSI/IEEE Std C57.104. Вони мають чотири рівні: перший відповідає бездефектному стану, інші – різним ступеням дефектності.

У СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 критерії задані у вигляді діапазонів концентрацій розчинених у маслі газів. Ці діапазони обмежені певними значеннями, завдяки яким контрольовані силові трансформатори відносять до одного із трьох рівнів стану: перший рівень – наявність дефектів не передбачається; при перевищенні нижньої границі діапазону концентрацій газів, який відповідає другому рівню, визначається швидкість наростання газів, і дефект вважається “присутнім”, коли ця швидкість перевищує 30 мол/добу; для третього рівня (перевищення верхньої межі другого рівня) прогнозується наявність дефекту без обліку швидкості наростання концентрацій газів. Тому під час оцінки ймовірностей появи помилок I і II-го роду та ймовірностей правильних рішень для випадків застосування вказівок СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 як граничні значення використовувалися нижні й верхні значення діапазону концентрацій газів для другого рівня.

Рекомендовані РД 153.34.0-46.302-00 критерії концентрацій розчинених у маслі газів, так само як і в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, названі граничними значеннями.

Прийняті в Energorotmag критерії наявності дефекту теж є концентраціями газів, які названі граничними. Варто зазначити, що за деякою аналогією з ІЕС 60599 вони прийняті різними для блокових і мережних трансформаторів.

Оцінку значень ймовірностей помилок I і II-го роду й ймовірностей правильних рішень необхідно проводити враховуючи деяку пріоритетність використання аналізованих газів. Так, на відміну від інших, використовуваних для виявлення дефектів газів, вміст у маслі оксиду й діоксиду вуглецю відображує старіння ізоляції. Однак на цей вміст впливають ще відмінності складу цієї ізоляції (або окремих її складників) і особливості умов, за яких відбувається

таке старіння. У результаті підвищені значення концентрацій CO і CO<sub>2</sub> можуть не відповідати тому ступеню старіння ізоляції, яка перешкоджає продовженню її експлуатації, тобто ступеню небезпечності. Практичні результати й проведені на їх підставі розрахунки показують, що зазначена невідповідність має місце в переважній кількості випадків контролю стану устаткування по ХАРГ. У більшості публікацій з інтерпретації результатів ХАРГ значення концентрацій CO і CO<sub>2</sub> не враховуються при визначенні характеру дефекту. І тільки в деяких із них використовують співвідношення CO<sub>2</sub> і CO для оцінки можливості поширення зони дефекту на тверду ізоляцію (папір, картон), тим самим відводячи цим газам роль доповнюючих, допоміжних. Тому не у всіх випадках перевищення концентраціями CO<sub>2</sub> і CO граничних значень має розглядатися як ознака наявності дефекту в трансформаторі. У зв'язку із цим визначення ймовірностей помилок I і II-го роду та ймовірностей правильних рішень виконувалося без обліку концентрацій оксиду й діоксиду вуглецю.

Як вже зазначалось, рекомендовані критерії розмежування бездефектного стану силових трансформаторів і стану цих трансформаторів з ймовірним дефектом надані у вигляді значень концентрацій розчинених у маслі газів, перевищення яких може бути пов'язане з наявністю дефектів. Але в різних НД ці критерії надаються або одним (типовим чи граничним, тобто допустимим) значенням, або їх діапазоном – деякою сукупністю, яка характеризується величинами мінімального та максимального обмеження вказаних концентрацій. Тому використаний нами в статті узагальнюючий термін “граничне значення” може вважатись застосовним достатньо умовно – саме як критерій можливого розмежування вказаних вище станів силових трансформаторів, а не межі, перевищення якої призводить до безсумнівного виникнення для них небезпеки. Досліджувані критерії разом з їх значеннями наведено в табл. 2.

Залежно від умов експлуатації значення концентрацій газів у бездефектних трансформаторах можуть змінюватися в доволі широкому діапазоні [12] і залежать від багатьох чинників [15], тому складно вибрати розподіл, який би однозначно характеризував бездефектний стан трансформаторів. Виконані в [13] дослідження дали змогу отримати для кожного з газів кілька розподілів, що характеризують без-

Таблиця 2. Критерії ймовірної появи дефектів у силових трансформаторах

Нормативний документ	Критерій	Об'ємні концентрації розчинених в маслі газів, %				
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>
IEC 60599 (МЕК)	мінімальне обмеження	0,004	0,006	0,0003	0,005	0,006
	максимальне обмеження	0,011	0,028	0,005	0,009	0,015
IEEE Std C57.104 (США)	допустиме значення	0,012	0,005	0,0035	0,0065	0,01
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна)	мінімальне обмеження	0,005	0,0015	0,00005	0,005	0,01
	максимальне обмеження	0,012	0,01	0,001	0,01	0,015
РД 153.34.0-46.302-00 (Росія)	допустиме значення	0,01	0,01	0,001	0,005	0,01
Energopomiar (Польща)	допустиме значення	0,02	0,026	0,007	0,017	0,05

дефектний стан. Але розрахунок значень ризиків був проведений з використанням тільки тих розподілів, які отримані для масивів даних з максимальним об'ємом вибіркового значень, що відносились до бездефектних трансформаторів негерметичного виконання. Крім того, використані розподіли визначені з урахуванням типу дефектів, тобто являються характерними для газів, які є ключовими для конкретного типу дефекту (наприклад, етилен – високотемпературний перегрів понад 700 °С, водень – часткові розряди, ацетилен – дугові розряди і т.д.). Значення параметрів законів розподілів для концентрацій газів у бездефектних і дефектних

Таблиця 3. Значення параметрів законів розподілу для концентрацій газів, розчинених у маслі дефектних і бездефектних трансформаторів

Газ	Стан трансформаторів			
	Бездефектний		Дефектний	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
CH <sub>4</sub>	0,00698	4,472519	0,041635	2,194290
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,007242	3,387282	0,065647	2,115252
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,006132	2,851785	0,030929	2,421890
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,000261	1,402001	0,019442	1,761373
H <sub>2</sub>	0,004968	2,363946	0,055464	2,503356

трансформаторах наведено в табл. 3.

Значення ймовірностей виникнення помилок I й II-го роду та ймовірностей прийняття правильних рішень у випадках застосування критеріїв, рекомендованих у вказаних вище НД, отримані з урахуванням наведених вище параметрів розподілів внаслідок числового інтегрування і наведено в табл. 4. Як і очікувалось, значення ймовірностей помилкових і правильних рішень відмінні для різних критеріїв. З табл. 4 видно також, що мінімальні значення

ймовірності помилки II-го роду супроводжуються максимальним значенням ймовірності помилки I-го роду. При цьому мінімальні значення ймовірності похибки II-го роду супроводжуються максимальним значенням ймовірності похибки I-го роду. Ця обставина ускладнює порівняння ефективності застосування досліджуваних критеріїв і вимагає додаткового аналізу, який може бути виконаний на підставі оцінки значень ризиків.

**Аналіз ризиків.** Покладемо, що  $C_{11} = 0$  і  $C_{22} = 0$ , тобто правильні рішення не приносять реального прибутку. У цьому випадку вираз для середнього ризику (1), як очікуваних втрат (економічного збитку), набуває вигляду

$$R = C_{21} P_1 P_{21} + C_{12} P_2 P_{12}. \quad (10)$$

Для розрахунків значення ризику необхідно задатися значеннями ймовірностей дефектного й бездефектного станів, а також вартістю помилкових рішень. Ймовірність виникнення дефектного стану буде залежати від терміну служби трансформаторів. За різними оцінками [3, 14] питома пошкоджувальність мережних трансформаторів перебуває в межах від 2,5 до 5 %. Розглянемо найгірший сценарій: приймемо, що значення ймовірності виникнення дефекту становить  $P_2 = 0,05$  у.о., а ймовірність бездефектного стану –  $P_1 = 0,95$  у.о.

Значення цін помилкових рішень буде також варіюватися в широких межах. Так, ціна пропуску дефекту буде залежати від типу дефекту і його ваги. Наприклад, дефект, що призводить до внутрішнього короткого замикання, й дефект, пов'язаний з порушенням герметичності обладнання регулювання під навантаженням, мають різну ймовірність

**Таблиця 4.** Значення ймовірностей помилок I-го й II-го роду та ймовірностей правильних рішень для досліджуваних критеріїв

Нормативний документ	Критерій	Значення ймовірностей, у.о.			
		$P_{11}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{12}$
IEC 60599 (МЕК)	мінімальне обмеження концентрацій	0,00777157	0,99181936	0,99999997	$1 \cdot 10^{-12}$
	максимальне обмеження концентрацій	0,94871427	0,05087667	0,99999870	0,000001270
IEEE Std C57.104 (США)	допустиме значення концентрацій	0,17091318	0,82867776	0,99999996	0,000000004
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна)	мінімальне обмеження концентрацій	0,00003861	0,99955232	0,99999997	$1 \cdot 10^{-12}$
	максимальне обмеження концентрацій	0,93086888	0,06872206	0,99999995	0,000000014
РД 153.34.0–46.302–00 (Росія)	допустиме значення концентрацій	0,40077017	0,59882077	0,99999997	$6,96 \cdot 10^{-10}$
Energopomiar (Польща)	допустиме значення концентрацій	0,99959093	0,00000001	0,99959107	0,000408894

виникнення і наслідки. Ціна хибної тривоги багато в чому буде визначатися кваліфікацією оперативного персоналу й тим рішенням, яке буде прийнято у разі перевищення концентраціями прийнятих для використання критеріїв (граничних значень): повторний ХАРГ, проведення ремонтних робіт. У цій статті, з урахуванням міркувань, наведених у [8], аналіз ризиків за виразом (10) доцільно проводити, коли застосовувати вартості помилок не у грошових, а у якихось умовних одиницях (вартість однієї помилки перевищує вартість іншої у якусь кількість разів). Наприклад, нехай умовна вартість похибки I-го роду становить 1 умовну одиницю, а вартість похибки II-го роду переважає її в 10000 разів. Для цього випадку значення середніх ризиків для досліджуваних критеріїв наведено в табл. 5 (значення середніх ризиків вказані також в умовних одиницях).

Якщо аналізувати дані тільки табл. 5, то можна дійти висновку, що до найменших значень ризику приведе використання як граничних значень рекомендованого у IEC 60599 (МЕК) максимального обмеження концентрацій газів. Однак варто враховувати, що значення ризику в табл. 5 є крапковими, оскільки відповідають імовірностям діагнозів зі значеннями тільки  $P_1 = 0,95$  у.о. і  $P_2 = 0,05$  у.о. Аналогічно наведено-

му в [8], можна проаналізувати зміни середніх ризиків за будь-якого значення імовірності появи дефектного стану  $R = f(P_2)$ , прийнявши при цьому, що ймовірність бездефектного стану буде дорівнювати  $P_1 = 1 - P_2$ . Графічне відображення таких змін наведено на рис. 2.

Як видно з рисунку, для більшості досліджуваних критеріїв зі зростанням імовірності появи дефекту значення ризику зменшується за лінійним законом і тільки для критеріїв Energopomiar воно зростає. Це пов'язано тим, що для більшості досліджуваних критеріїв переважаючим є виникнення помилки I-го роду (див.

**Таблиця 5.** Значення середніх ризиків у разі використання досліджуваних критеріїв обмеження концентрацій розчинених у маслі газів

Нормативний документ	Критерій	$R$
IEC 60599 (МЕК)	мінімальне обмеження концентрацій	0,9422
	максимальне обмеження концентрацій	0,0490
IEEE Std C57.104 (США)	допустиме значення концентрацій	0,7872
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна)	мінімальне обмеження концентрацій	0,9496
	максимальне обмеження концентрацій	0,0653
РД 153.34.0-46.302-00 (Росія)	допустиме значення концентрацій	0,5689
Energopomiar (Польща)	допустиме значення концентрацій	0,2044



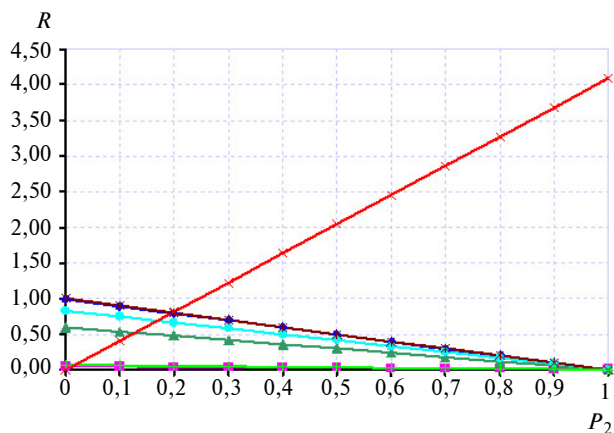


Рис. 2. Вплив імовірності виникнення дефекту в силовому трансформаторі на значення середнього ризику у разі використання критеріїв, наведених у табл. 2; — IEC 60599 мін.; — IEC 60599 макс.; — РД 153.34.0-46.302-00; — IEEE Std C57.104; — SOU-NEE 46.501 мін.; — SOU-NEE 46.501 макс.; — Energopromiar

табл. 4). Значення критеріїв Energopromiar у декілька разів вище значень інших досліджуваних критеріїв, наслідком чого є переважне виникнення помилки II-го роду, вартість якої вища за вартість помилки I-го роду, і цей вплив збільшується зі зростанням імовірності виникнення дефекту.

Із усіх досліджуваних критеріїв найменші значення ризику на всьому інтервалі ймовірності  $P_2$  забезпечують критерії, що відповідають максимальному обмеженню концентрацій у IEC 60599. Трохи більші значення ризику дають критерії, які відповідають максимальному обмеженню концентрацій другого рівня у SOU-NEE 46.501:2006, ще вищі ризики притаманні застосуванню критеріїв, рекомендованих у РД 153.34.0-46.302-00, а також інших критеріїв із табл. 2.

Доволі цікавими є залежності значень середнього ризику від відношень вартості цін помилкових рішень, які наведено на рис. 3. Як видно з рисунку, залежності значень середнього ризику від відношень цін помилкових рішень є нелінійними й відрізняються для досліджуваних критеріїв. Для більшості спостерігається ділянка, на якій зростання відношення цін помилкових рішень не веде до збільшення значень ризику, і тільки за досягнення певного значення такого відношення відбувається стрибкоподібне збільшення величини ризику.

На відміну від цього, у разі застосування критеріїв Energopromiar значення ризику монотонно збільшуються зі зростанням відношення

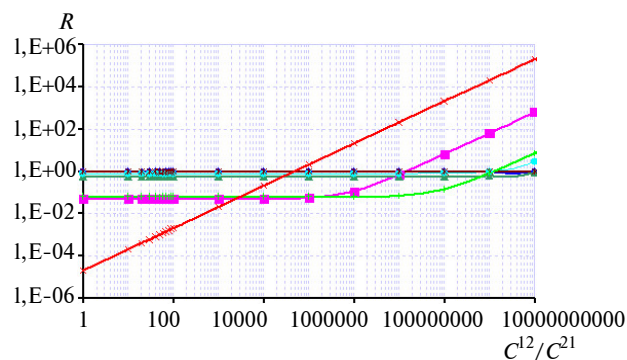


Рис. 3. Залежність значень середнього ризику від відношень вартості цін помилкових рішень; — IEC 60599 мін.; — IEC 60599 макс.; — РД 153.34.0-46.302-00; — IEEE Std C57.104; — SOU-NEE 46.501 мін.; — SOU-NEE 46.501 макс.; — Energopromiar

цін помилкових рішень. Такий характер залежностей зумовлений різними значеннями ймовірностей помилок II-го роду (див. табл. 4). Чим менше значення ймовірності пропуску дефекту, тим довша ділянка залежності, на якій зростання відношення цін помилкових рішень не веде до збільшення ризику. Таким чином, навіть для тих самих параметрів законів розподілу концентрацій газів для дефектного та бездефектного станів, значення середнього ризику не є постійним і залежить від ймовірностей дефектного й бездефектного станів, а також від відношень цін помилкових рішень. Із чого випливає, що граничні значення концентрацій газів, які будуть сприяти зменшенню середнього ризику, і як внаслідок можливих економічних втрат, мають визначатися з урахуванням цих факторів. Тому подальші дослідження варто присвятити розробленню методу визначення граничних концентрацій розчинених у маслі газів, що будуть мінімізувати можливі ризики для заданих параметрів законів розподілу, ймовірностей дефектного і бездефектного станів, а також вартостей помилкових рішень.

## Висновки

Запропоновано вираз для визначення значення середнього ризику під час діагностики стану трансформаторів за значеннями концентрацій розчинених у маслі газів.

Визначено ймовірності виникнення помилок I й II-го роду, ймовірності прийняття правильних рішень і значення середнього ризику в разі використання як граничних значень тих критеріїв, які рекомендовані в п'яти доволі ві-

домих нормативних документах з інтерпретації результатів ХАРГ. Встановлено, що для наведених розподілів концентрацій газів, які характеризують дефектний та бездефектний стани силових трансформаторів, найменші величини ризиків буде забезпечувати застосування критеріїв (граничних значень), що відповідають максимальному обмеженню концентрацій розчинених у маслі газів у IEC 60599.

Досліджено залежність значення середнього ризику застосування під час інтерпретації результатів ХАРГ ряду рекомендованих критеріїв для виявлення дефекту від імовірності виникнення цього дефекту. Встановлено, що за незмінних значень імовірностей помилок I й II-го роду та імовірностей прийняття правильних рішень, значення середнього ризику змінюються в широкому діапазоні залежно від імовірності появи дефекту.

Встановлено, що для більшості досліджуваних критеріїв зі зростанням імовірності появи дефекту значення ризику зменшується й тільки для критеріїв Energorotmag – зростає. Це пояснюється тим, що величина втрат у разі використання більшості із досліджуваних критеріїв зумовлена втратами, пов'язаними з імовірністю помилки I-го роду, а для критеріїв Energorotmag величина можливих втрат зумовлена імовірністю помилки II-го роду.

Проаналізовано залежності середнього ризику від відношення цін помилкових рішень. Встановлено, що при застосуванні більшості досліджуваних критеріїв має місце ділянка, на якій зростання відношення цін помилкових рішень не веде до збільшення значення ризику, і тільки у разі досягнення певного значення такого відношення відбувається стрибкоподібне збільшення величини ризику. Такий характер залежностей зумовлений різними значеннями ймовірностей помилок II-го роду, чим менше значення ймовірності пропуску дефекту, тим довша ділянка залежності, на якій зростання відношення цін помилкових рішень не приводить до збільшення ризику. У разі застосування критеріїв Energorotmag, коли ймовірність пропуску дефекту найбільша, значення ризику монотонно збільшуються зі зростанням відношення цін помилкових рішень.

Навіть для однакових параметрів законів розподілу концентрацій газів, значення середнього ризику не є постійним. Воно залежить від величин ймовірностей дефектного й бездефектного станів і від значень відношень цін помилкових рішень. Тому граничні значення концентрацій розчинених у маслі газів, що забезпечать мінімум ризику, мають визначатися з урахуванням цих факторів, як продовження та розвиток подальших робіт у цьому напрямі.

### Список літератури

1. *COY-H EE 46.501:2006*. Диагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Міністерство палива та енергетики України, 2006.
2. *РД 153-34.0-46.302-00*. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. Москва, 2001.
3. *IEC 60599:1999*. Експлуатаційне електрообладнання, заповнене мінеральним маслом: керівний документ по інтерпретації аналізів розчинених та вільних газів. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1999.
4. *Алексеев Б.А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
5. *Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*, IEEE Std C57.104, 2009.
6. *R.R. Rogers*, “Experiences in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers by Dissolved Gas-in-Oil Chromatography Analysis (A Progress Report),” Minutes of Forty-Fourth Int. Conf. of Doble Clients, 1977, Section 10-501.
7. *N.A. Muhamad et al.*, “Comparative study and analysis of DGA Methods for Transformer mineral oil”, IEEE Lausanne, vol. 1–5, pp. 45–50, July 2007.
8. *Шутенко О.В., Абрамов В.Б., Баклай Д.Н.* Методика определения среднего риска при использовании граничных значений концентраций растворенных в масле газов в качестве критерия наличия дефекта в высоковольтных трансформаторах // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 1. – С. 22–34.
9. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
10. *Шутенко О.В.* Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов // Электрич. сети и сист. – 2010. – № 3. – С. 38–45.

11. *Шутенко О.В.* Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла // Вісник НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 45. – С. 156–167.
12. *Шутенко О.В., Баклай Д.Н.* Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов // Вісник НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 60. – С. 136–150.
13. *Шутенко О.В., Баклай Д.Н.* Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених в маслі високовольтних трансформаторів негерметичного виконання // Вісник НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 24. – С. 102–117.
14. *Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Дементьев Ю.А. и др.* О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей // Электрич. станции. – 2005. – № 11. – С. 69–75.
15. *Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А. и др.* Анализ причин газовой выделенности в силовых трансформаторах, на основе исследования корреляционных связей между растворенными в масле газами // Світлотехн. та електроенергет. – Х.: ХНАМГ. – 2012. – № 3 – С. 72–81.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки та  
автоматики НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
22 липня 2014 року