

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, пов'язаної покращенням експлуатаційної надійності високовольтного маслонаповненого обладнання ЕСМ за рахунок підвищення достовірності розпізнавання типу дефектів за результатами аналізу розчинених у маслі газів.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз значень діагностичних критеріїв у маслонаповненому обладнанні ЕСМ з дефектами різного типу для 3449 одиниць обладнання дозволив встановити діапазони значень діагностичних критеріїв (відношень характерних газів, відсоткового вмісту газів і відношень газів до газу з максимальним вмістом) для дефектів різного типу. За результатами аналізу сформовано 109 масивів зі схожими значеннями діагностичних критеріїв, для яких побудовано 109 графічних областей (номограм) для дефектів різного типу. Отримані 109 масивів відповідають 32 групам дефектів різного типу, що у 2,5–7 разів перевершує кількість дефектів, які розпізнаються відомими стандартами та методами. Серед 109 номограм дефектів 95 отримано вперше, що дає змогу більш ніж у 7 разів підвищити кількість дефектів, які розпізнаються з використанням методу номограм.

2. Проведений порівняльний аналіз достовірності розпізнавання дефектів різного типу з використанням різних стандартів та методів з інтерпретації результатів АРГ показав, що достовірність розпізнавання кожного із методів не є постійною, а варіюється залежно від типу дефекту. Дана обставина не дозволяє розглядати той чи інший метод як універсальний для розпізнавання дефектів різного типу.

3. Проведені аналізи методів і критеріїв, що використовуються для визначення типу дефектів високовольтного маслонаповненого обладнання за вмістом розчинених в маслі газів, значень діагностичних критеріїв та достовірності розпізнавання дефектів різного типу з використанням різних стандартів та методів з інтерпретації результатів АРГ дозволили виявити й узагальнити основні

проблеми, що виникають при оцінюванні стану обладнання ЕСМ за результатами АРГ, та недоліки, характерні для відомих стандартів і методів, що використовуються для розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ. За результатами аналізу значень діагностичних критеріїв для 109 масивів зі схожими значеннями цих критеріїв встановлено, що вміст газів в обладнанні з одним і тим самим типом дефекту може суттєво відрізнятись. При цьому для одного і того самого типу дефекту максимальний вміст можуть мати різні гази, що зумовлено різними значеннями температури гарячої точки в одному температурному діапазоні або різними значеннями енергії розрядів. Крім того, одні й ті самі діапазони значень відношень газів можуть відповідати різним типам дефектів, тому для достовірного розпізнавання таких дефектів недостатньо використовувати лише один діагностичний критерій. Основними причинами відмови від розпізнавання під час визначення типу дефекту є неповне використання діагностичної інформації деякими стандартами і методами та відсутність унормованих значень для деяких типів дефектів (в першу чергу для дефектів комбінованого типу).

4. Розроблені нові методи розпізнавання типу дефектів у маслонаповненому обладнанні ЕСМ за значеннями відношень газів, відсоткового вмісту газів та комплексом діагностичних критеріїв. Метод розпізнавання типу дефектів у маслонаповненому обладнанні ЕСМ за значеннями відношень газів (CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ і $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$) дозволяє розпізнавати часткові розряди, електричні розряди і термічні дефекти та їхні комбінації з іншими дефектами як графічно, так і аналітично з використанням таблиць зі значеннями відношень газів. Метод розпізнавання типу дефектів у маслонаповненому обладнанні ЕСМ за значеннями відсоткового вмісту газів дозволяє розпізнавати дефекти, для яких газами із максимальним вмістом є водень, метан, етан, етилен чи ацетилен, для чого використовуються таблиці з діапазонами та середніми значеннями відсоткового вмісту 5 газів. Метод розпізнавання типу дефекту з використанням комплексу діагностичних критеріїв дозволяє розпізнавати дефекти з одночасним використанням значень відношень газів, відсоткового вмісту газів та значень відношень газів до газу із максимальним вмістом, для чого на першому етапі за

допомогою методу діагностики за відстанню до множини визначається загальна приналежність дефекту до однієї з груп дефектів, а потім усередині цієї групи за допомогою методу мінімальної відстані до множини визначається однотипний об'єкт з найближчими значеннями діагностичних критеріїв до значень критеріїв діагностованого об'єкта. Проведений порівняльний аналіз достовірності розпізнавання типу дефектів з використанням розроблених методів та наявних стандартів і методів з інтерпретації результатів АРГ показав перевагу розроблених методів над наявними, зокрема й при розпізнаванні комбінованих дефектів.

5. Дисертаційне дослідження проводилося на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП» відповідно до ініціативної науково-дослідної роботи «Удосконалення методів діагностики стану маслонаповненого високовольтного обладнання електричних мереж» (№ ДР 0121U109404, 2021–2022 рр.), у якій здобувач був відповідальним виконавцем. Основні наукові результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні наукових досліджень в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за планом МОН України «Забезпечення стійкого, надійного та ефективного енергопостачання районів міст постраждалих внаслідок бойових дій» (№ ДР 0123U100244, 2023–2025 рр.), де здобувач є виконавцем окремих розділів.

6. Результати дисертаційної роботи застосовуються при інтерпретації результатів аналізу розчинених у маслі газів високовольтного маслонаповненого обладнання у службі ізоляції та грозозахисту АТ «Харківобленерго». Також використовуються у навчальному процесі на кафедрі передачі електричної енергії в освітніх компонентах «Техніка високих напруг» і «Математичні основи технічної діагностики» НТУ «ХП» (підтверджено актами впровадження, додаток Д).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> (дата звернення: 01.08.2023).
2. National long-term strategies. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies_en (дата звернення: 01.08.2023).
3. Кулик О. С. Розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур у високовольтному маслонаповненому обладнанні за результатами аналізу розчинених у маслі газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2021. № 2 (3). С. 102–113. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.03>.
4. Team ECOSENSE. The fundamentals of Dissolved Gas Analysis for power transformers. Application guide. URL: <https://www.reinhausen.com/dissolved-gas-analysis-dga>.
5. Bartley W. H. An analysis of transformer failures. Part 2. *International Association of Engineering Insurers (IMIA)*. URL: <https://www.imia.com/wp-content/uploads/2023/08/EP21-2004-Analysis-of-Transformer-Failures-2-1.pdf>.
6. Shimomugi K., Kido T., Kobayashi T. How transformers age. *T&D World*. URL: <https://www.tdworld.com/substations/article/20972255/how-transformers-age>.
7. Investigation into modeling Australian power transformer failure and retirement statistics / D. Martin et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 33, no. 4. P. 2011–2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2814588>.
8. Про схвалення Плану розвитку системи розподілу АТ «ХАРКІВОбленерго» на 2021-2025 роки : Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 25.11.2020 р. № 2157.
9. Impact of low molecular weight acids on oil impregnated paper insulation degradation / K. Kouassi et al. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. 1465. DOI:

<https://doi.org/10.3390/en11061465>.

10. Zhu M., Gu C., Zhu W. Investigation on the interaction between cellulosic paper and organic acids based on molecular dynamics. *Molecules*. 2020. Vol. 25, no. 17. 3938. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25173938>.
11. The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation / N. Lelekakis et al. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. Vol. 30, no. 3. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6804738>.
12. Grisar M. Proposition for different life hazard curve for transformer and substation equipment. *Transformers Magazine*. 2019. Vol. 6, no. 5. P. 62–72.
13. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Казьмірук О. І. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з урахуванням технічного стану трансформаторів із РПН. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2012. № 4. С 1–9.
14. Tenbohlen S., Vahidi F., Gebauer J., Krüger M., Müller P. Assessment of power transformer reliability. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 22–26 August 2011.
15. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2017. № 23(1245). С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.07>.
16. Хавтирко В. В. Дослідження дефектів в силових трансформаторах. *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, Україна, 14–23 берез. 2018 р.
17. Tenbohlen S., Jagers J., Vahidi F. Standardized survey of transformer reliability: on behalf of CIGRE WG A2.37. *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Toyohashi, Japan, 11–15 September 2017. DOI: <https://doi.org/10.23919/iseim.2017.8166559>.
18. Murugan R., Ramasamy R. Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*. 2015. Vol. 55. P. 182–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.06.002>.

19. Tariku A., Bekele G. Distribution transformer failure study and solution proposal in Ethiopia. *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Nairobi, Kenya, 25–28 August 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/powerafrica49420.2020.9219933>.
20. Jan S. T., Afzal R., Khan A. Z. Transformer failures, causes & impact. *International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering (ICDMCME'2015)*, Bali, Indonesia, 1 February 2015.
21. Dörnenburg E., Gerber O. E. Analysis of dissolved and free gases for monitoring performance of oil-filled transformers. *Brown Boveri Review*. 1967. Vol. 54, no. 213.
22. Stamm H., Schulze W. Deterioration of insulators consisting of paper-oil layers and its study by gas chromatography. *22nd CIGRE Session*, Paris, France, 1968. Paper 12–14.
23. IEC 60567:2011. Oil-filled electrical equipment - Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases - Guidance. Чинний від 2011-10-20. Вид. офіц. 2011. 119 с.
24. IEEE Std C57.104-2019. IEEE guide for the interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers. На заміну IEEE Std C57.104-2008 ; чинний від 2019-11-01. Вид. офіц. 98 с. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8890040>.
25. ASTM D3612-02. Standard test method for analysis of gases dissolved in electrical insulating oil by gas chromatography. Вид. офіц. 2017. 22 с. DOI: <https://doi.org/10.1520/D3612-02R17>.
26. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Методичні вказівки. Чинний від 2007-03-01. Вид. офіц. Київ, 2007.
27. Bakar N., Abu-Siada A., Islam S. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. Vol. 30, no. 3. P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6804740>.
28. Kulyk O. S. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2020. No. 1 (1). P.

15–25. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.03>.

29. Шутенко О. В., Кулик О. С., Пономаренко С. Г. Порівняльний аналіз діючих стандартів і методик з інтерпретації результатів АРГ : навчально-методичний посібник для виконання індивідуальних розрахунково-графічних завдань. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 126 с.

30. СТ КЕГОС 00-512-08. Диагностика развивающихся дефектов маслonaполненного оборудования по результатам хроматографического анализа. Вид. офіц. Астана, Казахстан, 2008. 54 с.

31. IEC 60599:2022. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Чинний від 2022-05-25. Вид. офіц. 2022. 80 с.

32. Dörnenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil-Cooled Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*. 1974. Vol. 61. P. 238–274.

33. Rogers R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1978. Vol. EI-13, no. 5. P. 349–354. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>.

34. Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*. 1977. No. 76. P. 345–349.

35. Duval M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2002. Vol. 18, no. 3. P. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2002.1014963>.

36. Duval M. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24, no. 6. P. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2008.4665347>.

37. Duval M., Lamarre L. The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. Vol. 30, no. 6. P. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6943428>.

38. Cheim L., Duval M., Haider S. Combined Duval Pentagons: A Simplified Approach. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 11. P. 2859. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112859>.

39. Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electric*

Technology Research Association. 2009. Vol. 65, no. 1.

40. Pugh D. R. Combustible Gas Analysis. Minutes of Fortieth International Conference of Doble Clients. 1973. Sec. 10–401.

41. Pugh D. R. Advances in Fault Diagnosis by Combustible Gas Analysis. *Minutes of Forty-First International Conference of Doble Clients*. 1974. Sec. 10–1201.

42. Möllmann A., Pahlavanpour B. New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers. *Electra*. 1999. No. 186. P. 31–51.

43. Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, 27 April – 4 September 1986.

44. Shutenko O., Kulyk O. Comparative analysis of new methods for defect type recognition by dissolved gas analysis. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 3–7 October 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916319>.

45. Lee S.-j., Kim Y.-w., Seo H.-d. et al. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: application of relative content of fault gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 691–696. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508774>.

46. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: application of gas-ratio combinations / Sung-wook Kim et al. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 685–690. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508773>.

47. Internal defect diagnosis method of an oil immersed transformer through a dissolved gas composition ratio : patent 1020130074674 South Korea. Published on 04.07.2013.

48. Emara M. M., Peppas G. D., Gonos I. F. Two Graphical Shapes Based on DGA for Power Transformer Fault Types Discrimination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021. Vol. 28, no. 3. P. 981–987. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009415>.

49. Mansour D.-E. A. Development of a new graphical technique for dissolved

gas analysis in power transformers based on the five combustible gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22, no. 5. P. 2507–2512. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004999>.

50. Gouda O. E., El-Hoshy S. H., E.L.-Tamaly H. H. Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13, no. 12. P. 2299–2310. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>.

51. Gouda O. E., El-Hoshy S. H., E.L.-Tamaly H. H. Proposed three ratios technique for the interpretation of mineral oil transformers based dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, no. 11. P. 2650–2661. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1927>.

52. Power transformer fault diagnosis using neural network optimization techniques / V. Rokani et al. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, no. 22. 4693. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11224693>.

53. Chothani N., Raichura M., Patel D. Convolution neural network and xgboost-based fault identification in power transformer. *Studies in Infrastructure and Control*. Singapore, 2023. P. 231–262. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3870-4_8.

54. Novel probabilistic neural network models combined with dissolved gas analysis for fault diagnosis of oil-immersed power transformers / Y. Zhou et al. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, no. 28. P. 18084–18098. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01878>.

55. Using generic direct M-SVM model improved by Kohonen map and Dempster–Shafer theory to enhance power transformers diagnostic / M. Hendel et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 21. 15453. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115453>.

56. A novel SVM-based decision framework considering feature distribution for Power Transformer Fault Diagnosis / L. Hong et al. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 9392–9401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.062>.

57. A power transformer fault diagnosis method-based hybrid improved seagull optimization algorithm and support vector machine / Y. Wu et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 17268–17286. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3127164>.

58. A fuzzy logic proposal for diagnosis multiple incipient faults in a power

transformer / J. C. Fernández et al. *Progress in Artificial Intelligence and Pattern Recognition*. Cham, 2021. P. 187–198. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89691-1_19.

59. Soni R., Mehta B. Diagnosis and prognosis of incipient faults and insulation status for asset management of power transformer using fuzzy logic controller & fuzzy clustering means. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 220. 109256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109256>.

60. Gopakumar S., Sree Renga Raja T. Determination of power transformer fault's severity based on fuzzy logic model with GR, level and DGA interpretation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01691-w>.

61. Fault diagnosis method for transformer based on NCA and CapSA-RELM / X. Han et al. *Electrical Engineering*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01974-5>.

62. Hybrid DGA method for power transformer faults diagnosis based on evolutionary k-means clustering and dissolved gas subsets analysis / A. Nanfak et al. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2023. Vol. 30, no. 5. P. 2421–2428. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2023.3275119>.

63. Lu S., Zeng X. Transformer fault diagnosis based on IWOA optimized XGBoost. *Third International Conference on Electronics, Electrical and Information Engineering (ICEEIE 2023)*, Xiamen, China, 11–13 August 2023 / ed. by X. Qu. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3008720>.

64. Шутенко О. В. Аналіз основних проблем, що виникають під час розпізнавання типу дефектів за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2023. № 1 (6). С. 130–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.14>.

65. Кулик О. С., Шутенко О. В. Аналіз проблем, що виникають при розпізнаванні типів дефектів за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *XIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців» : матеріали*

конференції, м. Харків, Україна, 19–22 листоп. 2019 р. Харків, 2019. С. 208–209.

66. Шутенко О. В., Кулик О. С. Розпізнавання перегрівів у діапазоні температур 500-700°C, які супроводжуються розрядами з різною щільністю енергії за результатами аналізу розчинених у маслі газів. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2022)* : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Харків, Україна, 20–23 груд. 2022 р. Харків, 2022. С. 91–94.

67. Шутенко О. В., Кулик О. С. Діагностика оливнонаповненого устаткування з комбінованими дефектами за результатами аналізу розчинених у оливі газів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. № 203. С. 39–42.

68. Kulyk O. S., Shutenko O. V. Analysis of gas content in oil-filled equipment with spark discharges and discharges with high energy density. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. 2019. Vol. 20, no. 5. P. 437–447. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-019-00124-8>.

69. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of gas content in oil-filled equipment with low energy density discharges. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 258–277. DOI: <https://doi.org/10.15676/ijeei.2020.12.2.6>.

70. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of overheating with temperatures of 150-300°C by analysis of dissolved gases in oil. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. P. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>.

71. Shutenko O., Kulyk O. Combined defects recognition in the low and medium temperature range by results of dissolved gas analysis. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. P. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250131>.

72. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of combined defects with high-temperature overheating based on the dissolved gas analysis. *Sādhanā*. 2022. Vol. 47, no. 3. 146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01919-x>.

73. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of discharges that are accompanied by low-temperature overheating based on the analysis of gases dissolved in the oil of high-voltage transformers. *Енергозбереження, Енергетика, Енергоаудит*. 2021. No. 3-4(157-158). P. 20–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2021.03.02>.
74. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of mid-temperature overheating in high-voltage power transformers by dissolved gas analysis. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 13–17 September 2021. P. 401–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570059>.
75. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of high-temperature overheating in high-voltage power transformers by dissolved gas analysis. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–24 September 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598575>.
76. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis. *Electrical Engineering*. 2022. Vol. 104, no. 4. P. 2109–2121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5>.
77. Shutenko O., Kulyk O. Diagnosis of oil-filled equipment with x-wax deposition based on dissolved gas analysis. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575623>.
78. Кулик О. С. Розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2022. № 1 (4). С. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.01.07>.
79. Шутенко О. В., Кулик О. С. Розпізнавання часткових розрядів, що супроводжуються нагрівом, за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: Наука та Інновації : збірник тез*, м. Дніпро, Україна, 24 груд. 2020 р. Харків, 2020. С. 16–18.
80. Шутенко О. В., Кулик О. С. Діагностика високовольтних вводів з відкладеннями Х-воску за результатами аналізу розчинених в маслі газів.

Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: Наука та Інновації : збірник тез, м. Дніпро, Україна, 24 груд. 2020 р. Харків, 2020. С. 36–38.

81. Shutenko O., Kulyk O. Analysis of gas content in oil-filled equipment with defects for which ethane is the key gas. *Lighting engineering and power engineering*. 2020. Vol. 2, no. 58. P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424x-2020-2-58-33-42>.

82. Шутенко О. В. Анализ содержания газов в маслонаполненном оборудовании с дефектами электрического типа. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. № 3(38). С. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2222331>.

83. Шутенко О. В., Кулик О. С. Аналіз вмісту газів в обладнанні з розрядами високої енергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2018. № 196 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». С. 51–55.

84. Shutenko O. V., Abramov V. B., Yakovenko I. S. Practical aspects of recognition of electric type defects on the analysis results of gases dissolved in oil. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”*. 2018. No. 6. P. 30–43. DOI: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2018.6.151536>.

85. Shutenko O., Yakovenko I. Analysis of Gas Content in High Voltage Equipment with Partial Discharges. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 347–352. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559534>.

86. Shutenko O. Analysis of gas composition in oil-filled faulty equipment with acetylene as the key gas. *Energetika*. 2019. Vol. 65, no. 1. P. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v65i1.3973>.

87. Shutenko O., Kulyk O. Comparative analysis of the defect type recognition reliability in high-voltage power transformers using different methods of DGA results interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240911>

88. Кулик О. С., Шутенко О. В. Особливості розпізнавання часткових

розрядів високовольтного маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених в маслі газів. *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2020)»* : збірник наукових праць, м. Харків, Україна, 10–13 листопада 2020 р. Харків, 2020. С. 106–110.

89. Шутенко О. В. Анализ графических образцов построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2017. № 31(1253). С. 97–121.

90. Shutenko O., Yakovenko I. Fault diagnosis of power transformer using method of graphic images. *2017 IEEE International Young Scientists' Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, Ukraine, 17–20 October 2017. Lviv, 2017. P. 66–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126594>.

91. Shrivastava K., Choubey A. A novel association rule mining with IEC ratio based dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformers. *International Journal of Advanced Computer Research*. 2012. Vol. 2, no. 4. P. 33–44.

92. Chen A.-P., Lin C.-C. Fuzzy approaches for fault diagnosis of transformers. *Fuzzy Sets and Systems*. 2001. Vol. 118, no. 1. P. 139–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(99\)00115-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(99)00115-3).

93. Wang F., Bi J., Zhang B., Yuan S. Research of Transformer Intelligent Evaluation and Diagnosis Method Based on DGA. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 77. P. 01002. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167701002>.

94. Niu L., Zhao J.-g., Li K.-j. Application of data mining technology based on RVM for power transformer fault diagnosis. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Berlin, Heidelberg, 2012. P. 121–127. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30223-7_20.

95. Illias H. A., Zhao Liang W. Identification of transformer fault based on dissolved gas analysis using hybrid support vector machine-modified evolutionary particle swarm optimisation. *PLOS ONE*. 2018. Vol. 13, no. 1. e0191366. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191366>.

96. Шутенко О. В., Кулик О. С. Аналітичний метод розпізнавання типу дефекту маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів. *Електротехніка та електроенергетика*. 2023. №2. С. 43-59. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-2-5>.
97. Duval M., dePabla A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17, no. 2. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.917529>.
98. Shutenko O., Kulyk O. DGA results for 25 transformers. *Mendeley Data*. 2023. V1. DOI: <https://doi.org/10.17632/x22y4s9fks.1>.
99. Кулик О. С. Метод розпізнавання типу дефектів маслонаповненого обладнання за значеннями відсоткового вмісту газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2023. № 1 (6). С. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.01.18>.
100. Li S., Wu G., Gao B., Hao C., Xin D., Yin X. Interpretation of DGA for transformer fault diagnosis with complementary SaE-ELM and arctangent transform. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23, no. 1. P. 586–595. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.005410>.
101. Abu-Siada A. Improved consistent interpretation approach of fault type within power transformers using dissolved gas analysis and gene expression programming. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 4. 730. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12040730>.
102. Sokolov V., Mayakov V., Kuchinsky G., Golubev A. On-Site partial discharge measurement of transformers. 19 p. (Preprint).
103. Li S. Study of dissolved gas analysis under electrical and thermal stresses for natural esters used in power transformers : Student thesis: Master of Philosophy. 2012. 176 p.
104. Ekojono, Prasjo R. A., Apriyani M. E., Rahmanto A. N. Investigation on machine learning algorithms to support transformer dissolved gas analysis fault identification. *Electrical Engineering*. 2022. Vol. 104, no. 5. P. 3037–3047. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01532-5>.

105. Sarma G. V. S. S. N. S., Reddy B. R., Nirgude P. D., Naidu V. Multilevel SVM and AI based transformer fault diagnosis using the DGA data. *Journal of Informatics Electrical and Electronics Engineering (JIEEE)*. 2021. Vol. 2, no. 3. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.54060/jieec/002.03.001>.
106. Zainal Abidin M. S., Husain A. R., Marzuki K. et. al. Design of a Fault Diagnostic Engine for Power Transformer Using Data Mining. Skudai, Johor, Malaysia : Universiti Teknologi Malaysia. URL: <http://eprints.utm.my/id/eprint/5839/1/74286.pdf>.
107. Tomsovic K., Amar A. On refining equipment condition monitoring using fuzzy sets and artificial neural nets. Knoxville, Tennessee. 19 p. (University of Tennessee).
108. Al-Auqaili S. A. A.-G. H. A new fuzzy logic approach to identify transformer criticality using dissolved gas analysis : Master of Philosophy thesis. Bentley, Perth, Australia, 2013.
109. Li E., Wang L., Song B. Fault diagnosis of power transformers with membership degree. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 28791–28798. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902299>.
110. Malik H., Mishra S. Application of gene expression programming (GEP) in power transformers fault diagnosis using DGA. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52, no. 6. P. 4556–4565. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2016.2598677>.
111. Panchal R. K., Swami P. S., Thosar A. G. Improving the accuracy of DGA interpretation for detection of incipient faults using MATLAB GUI. *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2018. Vol. 9, no. 4. P. 124–133.
112. Chen A.-P., Lin C.-C. Fuzzy approaches for fault diagnosis of transformers. *Fuzzy Sets and Systems*. 2001. Vol. 118, no. 1. P. 139–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(99\)00115-3](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(99)00115-3).
113. Soni R., Chaudhari K. An approach to diagnose incipient faults of power transformer using dissolved gas analysis of mineral oil by ratio methods using fuzzy logic. *2016 International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Paralakhemundi, Odisha, India, 3–5 October 2016. P. 1894–1899. DOI: <https://doi.org/10.1109/scopes.2016.7955775>.

114. Shutenko O. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika*. 2018. Vol. 64, no. 1. P. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i1.3724>.

115. Шутенко О. В. Особливості розпізнавання типу дефекту маслonaповненого обладнання з використанням методу номограм. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2022. № 1 (4). С. 86–104. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.01.10>.

116. Roland U., Eseosa O. Artificial neural network approach to distribution transformers maintenance. *International Journal of Scientific Research Engineering Technology*. 2015. Vol. 1, no. 4. P. 62–70.

117. Taha I. B. M., Hoballah A., Ghoneim S. S. M. Optimal ratio limits of rogers' four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2020. Vol. 27, no. 1. P. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2019.008395>.

118. Kulkarni A. S., Swami P. S., Thosar A. G. Dissolved gas analysis of transformer oil using adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7, no. 5. P. 1487–1491.

119. Ghoneim S. S. M., Taha I. B. Artificial neural networks for power transformers fault diagnosis based on IEC code using dissolved gas analysis. *International journal of control automation and systems*. 2015. Vol. 4, no. 2. P. 18–21.

120. Hoballah A., Mansour D.-E. A., Taha I. B. M. Hybrid grey wolf optimizer for transformer fault diagnosis using dissolved gases considering uncertainty in measurements. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 139176–139187. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3012633>.

121. Шутенко О. В., Кулик О. С. Розпізнавання типу дефектів силових трансформаторів за результатами аналізу розчинених в маслі газів в діагностичних просторах різного типу. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021) : збірник наукових праць V Міжнародної науково-технічної конференції, м. Харків, Україна, 9–12 листоп. 2021 р. Харків, 2021. С. 111–112.*

122. Шутенко О. В., Кулик О. С. Розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених у маслі газів з використанням еталонних множин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD) : тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*, м. Харків, Україна, 17–20 трав. 2023 р. Харків, 2023. С. 134.

123. Шутенко О. В., Кулик О. С. Процедура розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ з використанням комплексу діагностичних критеріїв. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD) : тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022*, м. Харків, Україна, 19–21 жовт. 2022 р. Харків, 2022. С. 92.

124. Кулик О. С. Розробка методу для розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених в маслі газів з використанням комплексу діагностичних критеріїв. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2022. № 2 (5). С. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.14>.

125. Shutenko O., Kulyk O. Method of fault-type recognition based on the dissolved gas analysis using a set of diagnostic criteria. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.13068>.

126. Sebestyen G. S. Decision-making processes in pattern recognition (ACM monograph series). Indianapolis, USA : Macmillan Publishing Co., Inc., 1962. 162 p.

127. Shutenko O., Kulyk O., Ponomarenko S. Informational and analytical system for diagnostics of the electric power equipment condition. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. P. 105–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160251>.

128. Armor A. F. Expert systems for power plants: the floodgates are opening. *Power Engineering*. 1989. Vol. 93, no. 7. P. 29–33.

129. Wang Z., Liu Y., Griffin P. J. Neural net and expert system diagnose transformer faults. *IEEE Computer Applications in Power*. 2000. Vol. 13, no. 1. P. 50–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/67.814667>.

130. Development of dissolved gas analysis(DGA) expert system using new diagnostic algorithm for oil-immersed transformers / Y. M. Kim et al. *2012 IEEE*

International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali, Indonesia, 23–27 September 2012. P. 365–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/cmd.2012.6416455>.

131. SIDAT - integrated system for automatic diagnostic on power transformers / A. M. Carneiro et al. *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2012*, Fortaleza, CE, Brazil, 5–7 November 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/induscon.2012.6451393>.

132. Kaminaris S. D., Moronis A. X., Kolliopoulos N. I., Sakarellos A. P. PTME – a new expert system application for Power Transformer Troubleshooting and Maintenance. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases*, Corfu Island, Greece, 16–19 February 2007. P. 52–57.

133. Concept of developing an intelligent system for control and operational diagnostics of technological equipment condition / B. Suleimenov et al. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection*. 2014. Vol. 4, no. 1. P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.5604/20830157.1093194>.

134. Pius V., Boonruang M. Implementation of computer based software for oil immersed power transformer condition monitoring via dissolved gas in oil results. 2016 IEEE P&ES – IEEE PES Thailand Joint Symposium on Advanced Technology in Power Systems, Bangkok, Thailand, 11 March 2023.

135. Шутенко О. В., Баклай Д. В. Анализ функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2011. № 3. С. 179–193.

136. ПрАТ «Запоріжтрансформатор». Експертна система моніторингу, діагностики та керування «ЕСМДУ-ТРАНС». Запоріжжя. 35 с. URL: http://ztr.com.ua/files/ztr_d72-esmdu-trans--2014_eng.pdf.

137. Шутенко О. В., Баклай Д. В. Информационноаналитическая система для диагностики состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования. *Енергетика та електрифікація*. 2011. № 8. С. 32–41.

138. Шутенко О. В., Баклай Д. В., Сапожников А. С. Преимущества модульного построения ИАС «СИРЕНА» для диагностики состояния электроэнергетического оборудования. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD) : тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2015*, м. Харків, Україна, 20–22 трав. 2015 р. С. 199.

139. Шутенко О. В., Кулик О. С., Пономаренко С. Г., Швець С. І. Принципи побудови функціональних модулів в інформаційно-аналітичній системі «СИРЕНА». *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD) : тези доповідей XXVIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021*, м. Харків, Україна, 18–20 трав. 2021 р. Харків, 2021. С. 100.

140. Шутенко О. В., Загайнова О. А., Сердюкова Г. М. Безперервний контроль стану ізоляції високовольтних вводів в середовищі інформаційно-аналітичної системи «СИРЕНА». *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, Вип. 195 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2018. С. 29–32.

141. Шутенко О. В., Кулик О. С., Пономаренко С. Г. Формування баз даних в інформаційно-аналітичній системі «СИРЕНА». *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2022) : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції*, м. Харків, Україна, 20–23 груд. 2022 р. Харків, 2022. С. 94–95.

142. Shutenko O. Determine the boundary value of the concentration of gases dissolved in oil of method minimum risk. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 29 May – 2 June 2017. P. 468–472. DOI: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100533>.

143. Shutenko O., Proskurnia O., Abramov V. Comparative analysis of risks which are accompanied by the use of typical and boundary gases concentrations for the diagnostics of high voltage transformers. *Energetika*. 2018. Vol. 64, no. 3. P. 137–145. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i3.3806>.

144. Shutenko O. V. Determination of the values of the boundary concentrations of gases taking into account the type of protection of oil of high voltage transformers.

Electrical Engineering and Power Engineering. 2019. No. 4. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-4-3>.

145. Шутенко О. В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. *Електричні мережі та системи*. 2010. №. 3. С. 38–45.

146. Shutenko O. Method for detection of developing defects in high-voltage power transformers by results of the analysis of dissolved oil gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2018. Vol. 18, no. 1. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.15546/acei-2018-0002>.