УДК 621.316 **doi: 10.20998/2313-8890.2025.11.01**

Гапон Дмитро Анатолійович, доцент, д.т.н., завідувач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(095)593-95-77, Dmytro.Hapon@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8609-9707
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002
Дем'яненко Роман Ігорович, Ph.D., старший викладач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(067)980-16-32 Roman.Demianenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0902-2607
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002
Солодовник Андрій Олександрович, аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(066)602-25-55, Andrii.Solodovnyk@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0006-3196-3530
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002
Светелік Олександр Олександрович, аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем», +38(067)539-12-69, Oleksandr.Svetelik@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7005-6761
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 10/0,4 кВ

Анотація. *У статті наведено результати статистичного аналізу провалів напруги в розподільній мережі 10/0,4 кВ на основі даних системи моніторингу якості електроенергії. Для періоду спостережень тривалістю 136 діб проаналізовано інтенсивність виникнення подій, їх залишкову напругу U_{res} та тривалість Δt на шинах 10 кВ і 0,4 кВ, а також характер трансформації провалів через трансформаторну підстанцію. Показано, що більшість збурень мають короткочасний характер і належать до «неглибоких» провалів із U_{res} у діапазоні 70–90 % від номіналу, однак наявний «хвіст» розподілу з критичними подіями (U_{res}<40 %), які можуть призводити до відмов чутливого електрообладнання. Виявлено груповий (кластерний) характер появи провалів у часі та високу синхронність подій на різних рівнях напруги, що свідчить про домінуючий вплив зовнішніх аварійних процесів у мережі живлення. Для оцінки впливу на технологічне навантаження виконано зіставлення параметрів провалів із кривою стійкості ITIC/CBEMA, за результатами якого визначено зону потенційно небезпечних подій та сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення стійкості систем автоматизації та критичних споживачів (застосування ДБЖ, коригування налаштувань АСУ та врахування серійних подій).*

Ключові слова*: електрична мережа, провал напруги; залишкова напруга; тривалість провалу; якість електроенергії; розподільні мережі; кластеризація подій; несиметричні провали.*

Hapon Dmytro, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(095)593-95-77, Dmytro.Hapon@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8609-9707
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002
Demyanenko Roman, Ph.D., Senior Lecturer, Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(067)980-16-32 Roman.Demianenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0902-2607
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002
Solodovnik Andriy, postgraduate student of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(066)602-25-55, Andrii.Solodovnyk@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0006-3196-3530
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002
Svetelik Oleksandr, postgraduate student of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, +38(067)539-12-69, Oleksandr.Svetelik@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7005-6761
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpichova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

ANALYSIS OF STOCHASTIC CHARACTERISTICS OF VOLTAGE DROPS IN 10/0.4 kV DISTRIBUTION NETWORKS

Abstract*. The paper presents the results of a statistical analysis of voltage sags in a 10/0.4 kV distribution network based on power quality monitoring data. For an observation period of 136 days, the event occurrence rate, residual voltage U_{res}, and sag duration Δt were analyzed at the 10 kV and 0.4 kV buses, as well as the transformation of sags through the distribution substation. It is shown that most disturbances are short-term and correspond to "shallow" sags with U_{res} in the range of 70–90 % of nominal voltage; however, the distribution exhibits a tail of critical events (U_{res} <40 %) that may cause malfunctions of sensitive electrical equipment. A grouped (clustered) pattern of sag occurrence over time and a high synchronism of events across different voltage levels were identified, indicating the dominant influence of external fault processes in the upstream supply network. To assess the impact on industrial loads, sag parameters were compared with the ITIC/CBEMA tolerance curve; based on the results, a potentially hazardous event region was determined and practical recommendations were formulated to improve the ride-through capability of automation systems and critical consumers (use of UPS, adjustment of control system settings, and consideration of consecutive events).*
Keywords*: power network; voltage sag; residual voltage; sag duration; power quality; distribution networks; event clustering; unbalanced sags.*

Актуальність теми. Провали напруги залишаються однією з найбільш критичних проблем якості електроенергії у сучасних розподільних мережах.

Міжнародні стандарти, такі як IEEE 1159 та EN 50160, визначають провал як короткочасне зниження середньоквадратичного значення напруги в діапазоні від 0,1 до 0,9 в.о. [1, 2]. Європейський стандарт EN 50160, гармонізований в Україні, встановлює, що більшість провалів триває менше 1 секунди, а зниження напруги (глибина провалу) рідко перевищує 60 % [3].

Проте дослідники відзначають, що стандарт EN 50160 дає лише описову статистичну характеристику і не є достатнім інструментом для оцінки реального впливу на промислових споживачів, оскільки він не нормує кількість провалів як жорсткий показник якості [4]. У зв'язку з цим, у науковій літературі пропонується використовувати додаткові індекси, описані в стандарті IEEE 1564 [5], такі як SARFI (System Average RMS Variation Frequency Index), для точнішої оцінки надійності електропостачання конкретного вузла навантаження [6].

Аналіз останніх публікацій. Важливим аспектом, який висвітлюється в роботах останніх років, є зміна характеристик провалу при його проходженні через розподільні трансформатори. Дослідження підтверджують, що схема з'єднання обмоток трансформатора (найпоширеніша – Δ/Yн-11) суттєво впливає на фазові співвідношення та глибину провалу на вторинній стороні [7].

Зокрема, у роботі [7] показано, що несиметричні короткі замикання (однофазні або двофазні) на стороні 10 кВ трансформуються у складні векторні діаграми на стороні 0,4 кВ, часто змінюючи «тип» провалу та згладжуючи його глибину за рахунок складових нульової послідовності [8]. Це пояснює різницю в статистичних розподілах подій для високої та низької сторін, яка часто спостерігається на практиці. Для моделювання цих процесів та прогнозування залишкової напруги на клемах споживачів широко використовується метод симетричних складових.

Значна частина публікацій присвячена вразливості сучасного обладнання. Промислові системи, що включають частотні перетворювачі (VFD), програмовані логічні контролери (PLC) та контактори, є вкрай чутливими навіть до короткочасних збурень [9, 10].

Експериментальні дослідження [10], демонструють, що обладнання часто поводиться стохастично: один і той самий провал може викликати або не викликати відключення залежно від робочої температури, навантаження та моменту виникнення провалу на синусоїді (point-on-wave)[10]. Крім того, повторювані провали (кластери), які виникають через роботу автоматики повторного включення (АПВ), призводять до прискореного зносу обладнання та скорочення терміну його служби [9].

Для оцінки стійкості обладнання стандартом де-факто залишаються криві ITIC (CBEMA) [11] та SEMI F47 [12]. Дослідники активно використовують їх для картування вразливості, щоб визначити зони ризику для конкретних технологічних процесів [13, 14].

В умовах стохастичної природи провалів просте накопичення статистики є недостатнім. Сучасні підходи включають використання імовірнісних методів та методів Data Mining для виявлення кореляцій між місцем виникнення пошкодження в мережі та параметрами провалу у споживача[15]. Наприклад, у роботі[16] пропонується застосовувати алгоритми кластеризації для визначення відносного розташування джерела збурення на основі даних моніторингу, що дозволяє підвищити ефективність діагностики мережі.

Результати проведеного моніторингу якості електроенергії. У ході досліджень було проведено моніторинг показників якості електричної енергії на шинах підстанції за період з 15 листопада 2024 року по 31 березня 2025 року. Об’єктом аналізу стали електромагнітні перехідні процеси на рівнях напруги 10 кВ та 0,4 кВ.

За досліджуваний період (136 діб) система моніторингу зафіксувала значну інтенсивність збурень:

- На стороні 10 кВ виявлено 55 випадків провалів фазної напруги.
- На стороні 0,4 кВ зафіксовано 47 випадків.

Така щільність подій свідчить про низьку надійність зовнішньої мережі живлення або наявність характерних локальних збурень у досліджуваному енерговузлі.

Аналіз масиву даних показує, що більшість провалів мають короткочасний характер, що корелює з часом роботи релейного захисту та автоматики (РЗА) в розподільних мережах.

• Екстремальні значення: Найглибший провал напруги (критична подія) на обох рівнях напруги стався 3 лютого 2025 року о 06:55:

- На стороні 10 кВ залишкова напруга склала 24,4 % ($U_{res} \approx 1.48$ кВ) при тривалості $\Delta t = 0{,}121$ с.
- На стороні 0,4 кВ ця подія трансформувалася у провал із залишковою напругою 24,7 %, тривалістю 0,101 с.

• Тривалі порушення: Виявлено аномальні події з надмірною тривалістю, які виходять за межі типового часу спрацювання струмових відсічок. Наприклад, 25 січня 2025 року на стороні 0,4 кВ зафіксовано провал тривалістю 3,44 с із залишковою напругою 39 %. Подібні тривалі збурення становлять найбільшу загрозу для термічної стійкості обладнання та безперервності технологічних процесів.

Важливою особливістю зафіксованої статистики є явище повторних провалів (кластеризація подій) за короткий проміжок часу, що може бути пов’язано з циклами автоматичного повторного включення (АПВ) або розвитком аварійних процесів у суміжних ділянках мережі.

Характерні приклади кластеризації:

• 21 листопада 2024 р.: серія з трьох провалів протягом 15 секунд (тривалістю до 0,2 с кожен). Зокрема, о 16:37 зафіксовано послідовні збурення по фазах В та А.

• 28 листопада 2024 р.: зафіксовано серію провалів о 12:37, що торкнулися міжфазної напруги U_{BC}.

• 13 грудня 2024 р.: група подій з інтервалом у декілька хвилин (08:46–08:50).

Аналіз осцилограм свідчить про переважання несиметричних коротких замикань. Значна частина зафіксованих подій є двофазними або однофазними провалами.

- Наприклад, подія 15 листопада (21:53:58) на стороні 10 кВ характеризується глибоким зниженням напруги в лінії СА до 83,8 %, при цьому інші фази зазнали меншого впливу.
- Трансформація несиметричних провалів з рівня 10 кВ на 0,4 кВ відбувається зі зміною фазових співвідношень через групу з'єднання обмоток трансформатора (імовірно Δ/Yн-11). Це підтверджується даними за 3 лютого, де критичне зниження напруги на 10 кВ (фаза А) призвело до провалу в лінії СА на стороні 0,4 кВ до рівня 24,7 %.

На рис. 1 наведено хронологічну діаграму подій, яка візуалізує моменти виникнення та залишкову напругу провалів у мережах 10 кВ та 0,4 кВ протягом досліджуваного періоду.

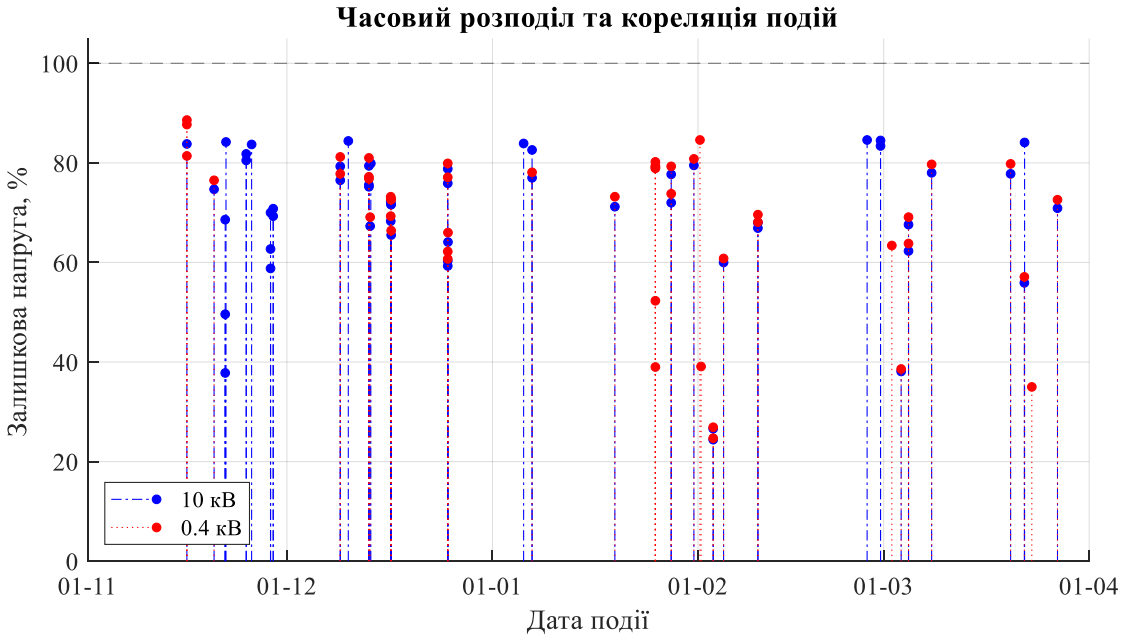

Рисунок 1 – Часовий розподіл провалів напруги

Співставлення часових міток та амплітудних характеристик дозволяє зробити наступні висновки щодо природи збурень:

1. Високий рівень кореляції між рівнями напруги

Візуальний аналіз демонструє чітку синхронність появи збурень на стороні 10 кВ (сині маркери) та 0,4 кВ (червоні маркери). Це підтверджує наявність жорсткого електричного зв'язку та свідчить про те, що переважна більшість провалів на стороні споживача (0,4 кВ) є наслідком трансформації аварійних режимів із розподільної мережі 10 кВ. Локальні збурення, що виникають виключно у внутрішньобудинковій мережі, складають незначну частку від загальної кількості подій.

2. Ефект кластеризації аварійних подій

На діаграмі чітко простежується нерівномірність розподілу подій у часі – так звана «кластеризація». Виділяються окремі дати з аномально високою щільністю збурень, зокрема:

- 21 листопада 2024 р.: Зафіксовано серію короткочасних провалів з інтервалом менше однієї секунди, що характерно для роботи циклів автоматичного повторного включення (АПВ) ліній електропередавання в умовах нестійкого пошкодження.
- 13 грудня 2024 р. та 16 грудня 2024 р.: Спостерігаються групи повторних провалів, ймовірно пов'язані з розвитком аварійних процесів або оперативними перемиканнями в мережі під час ліквідації аварій.

3. Амплітудна трансформація

Аналіз висоти маркерів (залишкової напруги) показує, що глибина провалу на стороні 0,4 кВ не завжди лінійно відповідає глибині на стороні 10 кВ. Наприклад, під час критичної події 3 лютого 2025 р. (найглибший провал), залишкова напруга на обох рівнях знизилася майже синхронно до рівня ~24 %. Проте в інших випадках (наприклад, події кінця листопада) спостерігається згладжування або, навпаки, поглиблення провалу при переході через трансформатор, що пояснюється векторною діаграмою напруг при несиметричних коротких замиканнях та схемою з'єднання обмоток силового трансформатора (Δ/Yн).

Діаграма підтверджує гіпотезу про домінуючий вплив зовнішньої мережі на якість електропостачання споживачів. Наявність часових кластерів (груп подій)

вимагає налаштування систем захисту чутливого обладнання з урахуванням можливості їх серійного характеру, а не лише поодиноких провалів.

На рис. 2 представлено гістограму розподілу провалів напруги за їхньою глибиною (залишковою напругою U_{res}) для двох рівнів електропостачання: 10 кВ та 0,4 кВ.

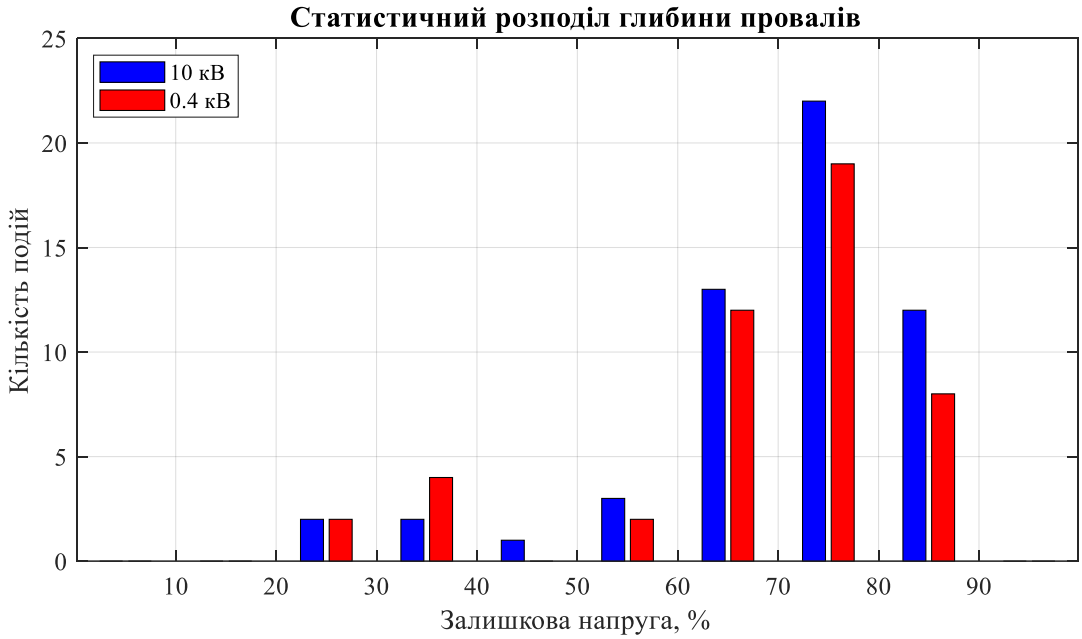

Рисунок 2 – Гістограма відносного розподілу глибини провалів напруги, зафіксованих на шинах 10 кВ та 0,4 кВ за період моніторингу.

Гістограма дозволяє оцінити ймовірність виникнення збурень різного ступеня тяжкості та виявити характерні закономірності для досліджуваного вузла навантаження:

1. Домінування «неглибоких» провалів

Аналіз модальних інтервалів гістограми показує, що розподіл подій є суттєво нерівномірним і зміщений у бік високих значень залишкової напруги. Переважна більшість зафіксованих збурень (понад 70 % випадків) характеризується залишковою напругою в діапазоні 70–90 % від U_{nom}.

Така статистика свідчить про віддаленість місць коротких замикань від точки моніторингу (електрична віддаленість пошкоджень у мережі 10–110 кВ). Для більшості сучасного промислового обладнання провали такої глибини не є

критичними, проте вони можуть викликати мерехтіння освітлення (флікер) та збої в роботі чутливих контакторів, що не мають затримки на відпадіння.

2. Наявність критичних збурень

Попри домінування неглибоких провалів, «хвіст» розподілу в зоні низьких значень напруги (U_{res}< 40 %) вказує на наявність тяжких аварійних режимів.

• Зокрема, на гістограмі виділяється група подій із залишковою напругою в діапазоні 20–30 %. Це відповідає зафіксованому мінімуму 24,4 % на стороні 10 кВ та 24,7 % на стороні 0,4 кВ.

• Також зафіксовано події в діапазоні 30–40 %, наприклад, провали до рівня 37,8 % та 39,0 %.

Саме ці події, хоч і є менш чисельними, становлять найбільшу загрозу для стійкості технологічного процесу, оскільки гарантовано призводять до відключення частотних перетворювачів та перезавантаження контролерів (PLC), якщо не використовуються спеціалізовані засоби захисту (динамічні компенсатори спотворень напруги).

3. Співвідношення розподілів 10 кВ та 0,4 кВ

Порівняльний аналіз стовпчиків гістограми для 10 кВ (синій колір) та 0,4 кВ (червоний колір) демонструє високу кореляцію, що підтверджує наскрізний характер проходження провалів через трансформаторну підстанцію.

Однак спостерігається певна відмінність у кількості подій у сусідніх бінах (інтервалах). Це пояснюється трансформацією виду провалу при переході через трансформатор із групою з’єднання обмоток Δ/Yн-11. Наприклад, глибокий двофазний провал на стороні 10 кВ може трансформуватися у менш глибокий, але трьохфазний або однофазний провал на стороні 0,4 кВ, змінюючи свою категорію на гістограмі.

Отримана статистика розподілу глибини провалів свідчить про те, що досліджуваний об'єкт піддається переважно частим, але неглибоким збуренням (70–90 %), які вимагають насамперед організаційних заходів (налаштування уставок

захисту). Водночас наявність подій з $U_{res}\approx$ 24 % вимагає перевірки обладнання на відповідність кривим стійкості ITIC/CBEMA у зоні глибоких провалів.

На рис. 3 наведено карту провалів напруги, побудовану шляхом накладання параметрів зафіксованих подій (тривалість Δt та залишкова напруга U_{res}) на стандартну криву стійкості ITIC (Information Technology Industry Council). Ця крива регламентує допустимі межі відхилення напруги для обладнання інформаційних технологій, систем автоматизації та цифрової електроніки.

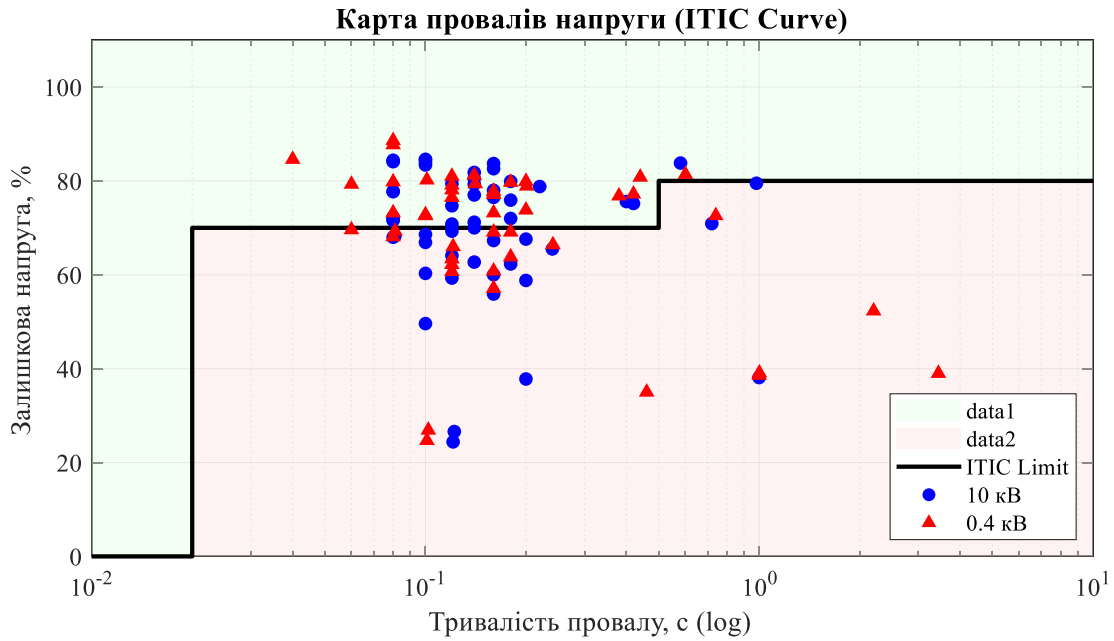

Рисунок 3 – Карта провалів напруги відносно кривої ITIC/CBEMA.

1. Загальна оцінка відповідності стандартам.

Аналіз графічної області показує, що більшість зафіксованих збурень (близько 85 % подій) знаходяться у верхній частині діаграми, в межах так званої «зони нормального функціонування» (No Interruption Region). Це переважно провали глибиною до 30 % (залишкова напруга 70 % і вище) тривалістю до 0,5 с. Для такого класу збурень стандартні імпульсні блоки живлення промислової електроніки повинні забезпечувати безперервну роботу за рахунок енергії, накопиченої у вхідних конденсаторах.

2. Аналіз критичних подій (Prohibited Region).

Водночас на діаграмі виділяється група точок, що потрапляють у «зону порушення функціонування» (Prohibited Region), розташовану нижче граничної лінії кривої ITIC. Ці події становлять пряму загрозу для безперервності технологічного процесу:

- Глибокі короткочасні провали: Найбільш небезпечною подією став провал, зафіксований 3 лютого 2025 року. На рівні 10 кВ залишкова напруга знизилася до 24,4 % при тривалості 0,121 с. На рівні 0,4 кВ параметри склали 24,7 % та 0,101 с відповідно. Точка з такими координатами знаходиться значно нижче кривої стійкості, що гарантовано призводить до відключення магнітних пускачів, зупинки частотних перетворювачів (помилка «Undervoltage») та перезавантаження контролерів.
- Тривалі провали: Особливу увагу привертає аномальна подія в мережі 0,4 кВ від 25 січня 2025 року, тривалість якої склала 3,444 с при залишковій напрузі 39 %. Згідно з вимогами ITIC, при такій значній тривалості (більше 0,5 с) напруга має відновлюватися до рівня не нижче 80 %. Зафіксоване значення (39 %) є критичним і неминуче призводить до порушення роботи всіх типів електроприймачів, окрім тих, що захищені джерелами безперебійного живлення (ДБЖ) з відповідною ємністю батарей.

3. Порівняння стійкості на різних рівнях напруги.

Візуалізація демонструє, що перехід збурень з рівня 10 кВ (сині маркери) на рівень 0,4 кВ (червоні маркери) не призводить до суттєвого покращення ситуації. Хоча в деяких випадках трансформатор Δ/Yн дещо зменшує глибину провалу, критичні події залишаються в забороненій зоні кривої ITIC. Це підтверджує, що природного демпфування провалів трансформатором недостатньо для захисту чутливого навантаження.

Результати ITIC-аналізу вказують на необхідність впровадження активних засобів захисту. Оскільки критичні події мають як велику глибину (до 24 %), так і значну тривалість (до 3,4 с), використання простих суперконденсаторних буферів

може бути недостатнім. Рекомендовано застосування ДБЖ подвійного перетворення (Online UPS) для критично важливих вузлів автоматизації.

Висновки.

1. Результати моніторингу: За період спостережень (136 діб) у досліджуваному вузлі навантаження зафіксовано високу інтенсивність електромагнітних збурень у вигляді провалів напруги: 55 випадків на стороні 10 кВ та 47 випадків на стороні 0,4 кВ. Це підтверджує, що провали напруги є домінуючим фактором погіршення якості електроенергії, значно перевищуючи за частотою інші види завад.

2. Характеристика збурень: Статистичний аналіз показав, що 80 % зафіксованих подій мають залишкову напругу в межах 70–90 % від U_{nom}, що характерно для віддалених коротких замикань у високовольтній мережі. Однак виявлено наявність критичних збурень із залишковою напругою до 24,4 %, які гарантовано призводять до зупинки технологічного процесу.

3. Джерело та розповсюдження: Встановлено високий коефіцієнт кореляції між подіями на рівнях 10 кВ та 0,4 кВ. Синхронність виникнення та подібність часових діаграм свідчать про те, що основне джерело збурень знаходиться у зовнішній мережі електропостачання (сторона ВН). Трансформація провалів через силовий трансформатор Δ/Yн в окремих випадках змінює вид провалу (фазність), але не забезпечує достатнього демпфування його глибини для захисту чутливого навантаження.

4. Оцінка стійкості (ITIC/CBEMA): Накладання параметрів провалів на криву стійкості ITIC виявило, що хоча більшість подій знаходяться в зоні допустимих значень, критичні провали (зокрема подія 3 лютого 2025 р. та тривала подія 25 січня 2025 р.) потрапляють у зону порушення функціонування (Prohibited Region). Особливу небезпеку становить зафіксована аномальна тривалість провалу 3,44 с, яка перевищує типові налаштування струмових захистів розподільних мереж.

5. Практичні рекомендації:

Для релейного захисту: Враховуючи значну кількість неглибоких провалів (до 70 %), рекомендується переглянути налаштування блоків живлення та кіл

управління магнітних пускачів, або використати пристрої типу «Restart» для автоматичного повторного пуску невідповідальних механізмів.

Для критичного навантаження: Наявність провалів тривалістю понад 3 секунди робить неефективним використання суперконденсаторних накопичувачів малої ємності. Для забезпечення безперервності роботи АСУ ТП необхідно застосовувати джерела безперебійного живлення (Online UPS) з подвійним перетворенням енергії, розраховані на автономну роботу протягом мінімум 5–10 хвилин для перекриття часу можливих перемикань в мережі 10 кВ.

Для налаштування АСУ: Системи автоматизації повинні бути налаштовані з урахуванням можливості серії повторних провалів (кластерів) з інтервалом 0,5–1 с, що виникають при роботі АПВ ліній електропередавання.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159–2019. New York: IEEE Standards Association, 2019.
2. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems: EN 50160:2010. Brussels: CENELEC, 2010.
3. Review on voltage sag studies for distribution grid including renewable energy sources / M. Ghaseminezhad et al. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2023. Vol. 31, no. 1. P. 12–28.
4. Perez E., Picatto A. Analysis of voltage sag compensation in distribution systems using a multilevel DSTATCOM // *Ingeniería e Investigación*. 2015. Vol. 35, no. 2. P. 45–52.
5. IEEE Guide for Voltage Sag Indices: IEEE Std 1564-2014. New York: IEEE, 2014.
6. Urbonaite L. Extracting Information from Voltage Dip Monitoring: Doctoral Thesis. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, 2016.
7. Analysis of Unsymmetrical Voltage Sag Propagation Through Distribution Transformer / A. Ali et al. // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7, no. 2.
8. Research of Voltage Sag Propagation through Transformers / J. Li et al. // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 605–607. P. 120–124.
9. DySC as a Solution to Voltage Sag and Its Impact on Equipment Longevity: Technical Report / LKH Precicon, 2024
10. Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment / F. Córcoles et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013. Vol. 45, no. 1. P. 120–128.
11. Information Technology Industry Council (ITI). ITI (CBEMA) Curve Application Note. Washington, DC: ITI, 2000.
12. Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). SEMI F47-0706 (Reapproved 0812): Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity. Milpitas, CA: SEMI, 2006 (reapproved 2012)
13. Voltage dips caused by faults in a transmission system: A monitoring case study of a sensitive industrial consumer / R. C. Leborgne et al. // *Electric Power Systems Research*, 2020. Vol. 180. Art. 106123.

14. A Novel Approach of Voltage Sag Data Analysis Stochastically: Study, Representation, and Detection of Region of Vulnerability / B. R. Prusty et al. // *Sustainability*, 2023. Vol. 15, no. 4. P. 3215.

15. Prediction of Voltage Sag Relative Location with Data-Driven Algorithms in Distribution Grid / I. O. Aksu et al. // *Energies*, 2022. Vol. 15, no. 3. P. 1189.

16. Optimized Placement of Voltage Sag Monitors Considering Distributed Generation Dominated Grids / J. Yuan et al. // *Frontiers in Energy Research*, 2021. Vol. 9. Art. 642

REFERENCES:

1. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159-2019. New York: IEEE Standards Association, 2019.

2. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems: EN 50160:2010. Brussels: CENELEC, 2010.

3. Review on voltage sag studies for distribution grid including renewable energy sources / M. Ghaseminezhad et al. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2023. Vol. 31, no. 1. P. 12–28.

4. Perez E., Picatto A. Analysis of voltage sag compensation in distribution systems using a multilevel DSTATCOM // *Ingeniería e Investigación*. 2015. Vol. 35, no. 2. P. 45–52.

5. IEEE Guide for Voltage Sag Indices: IEEE Std 1564-2014. New York: IEEE, 2014.

6. Urbonaite L. Extracting Information from Voltage Dip Monitoring: Doctoral Thesis. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, 2016.

7. Analysis of Unsymmetrical Voltage Sag Propagation Through Distribution Transformer / A. Ali et al. // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7, no. 2.

8. Research of Voltage Sag Propagation through Transformers / J. Li et al. // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 605–607. P. 120–124.

9. DySC as a Solution to Voltage Sag and Its Impact on Equipment Longevity: Technical Report / LKH Precicon, 2024

10. Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment / F. Córcoles et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013. Vol. 45, no. 1. P. 120–128.

11. Information Technology Industry Council (ITI). ITI (CBEMA) Curve Application Note. Washington, DC: ITI, 2000.

12. Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). SEMI F47-0706 (Reapproved 0812): Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity. Milpitas, CA: SEMI, 2006 (reapproved 2012)

13. Voltage dips caused by faults in a transmission system: A monitoring case study of a sensitive industrial consumer / R. C. Leborgne et al. // *Electric Power Systems Research*, 2020. Vol. 180. Art. 106123.

14. A Novel Approach of Voltage Sag Data Analysis Stochastically: Study, Representation, and Detection of Region of Vulnerability / B. R. Prusty et al. // *Sustainability*, 2023. Vol. 15, no. 4. P. 3215.

15. Prediction of Voltage Sag Relative Location with Data-Driven Algorithms in Distribution Grid / I. O. Aksu et al. // *Energies*, 2022. Vol. 15, no. 3. P. 1189.

16. Optimized Placement of Voltage Sag Monitors Considering Distributed Generation Dominated Grids / J. Yuan et al. // *Frontiers in Energy Research*, 2021. Vol. 9. Art. 642

Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 28.10.2025;
прийнята до публікації 02.11.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.
The article was submitted on 18.10.2025; revised on 28.10.2025; and accepted for publication on 02.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.