УДК 621.319.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.38

В. В. ШЕВЧУК
PhD, науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-0535-2630

В. В. КУЧАНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, завідувач відділу
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-6473-9478

В. І. КОШМАН
кандидат технічних наук, науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-6473-9478

Л. Р. САБАРНО
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-2153-2183

І. М. СЕВАСТЮК
молодший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-1971-3345

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЛЕ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, СТРИБКУ ФАЗОВОГО КУТА ТА ТОЧОК ПОЧАТКУ ТА ЗАКІНЧЕННЯ ПРОВАЛІВ

Проблема забезпечення якості електроенергії стає все більш актуальною з впровадженням різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та децентралізацією систем електропостачання. Ці зміни ускладнюють завдання забезпечення стійкого електропостачання, що призводить до значних втрат від погіршення якості електроенергії. На тлі змін у господарському механізмі енергетики проблема зниження втрат електроенергії в електричних мережах залишається актуальною, ставши важливим завданням для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних організацій. Рівень втрат електроенергії в електричних мережах є ключовим показником економічності їхньої діяльності та ефективності систем обліку електроенергії. Цей показник вказує на проблеми, які потребують термінового вирішення у сфері розвитку, реконструкції та технічного оновлення електричних мереж, вдосконалення методів їхньої експлуатації та управління, підвищення точності обліку електроенергії та ефективності збору коштів за спожиту електроенергію. Якість електроенергії має вирішальне значення для безперебійної роботи сучасних електричних систем та електроніки. Зростання електричного навантаження та поширення електронних пристроїв призводять до збільшення спотворень у напрузі та струмі, що може спричинити серйозні проблеми в роботі обладнання та підвищити ризик виникнення аварійних ситуацій. Для забезпечення надійності та стабільності електропостачання необхідно розробляти та вдосконалювати методи та засоби визначення наявності та корекції спотворень якості електроенергії. Аналіз та класифікація провалів напруги є необхідним для ідентифікації відмов та вчасної реакції на них. Розробка систем моніторингу, зокрема на основі моделей просторового вектору, дозволяє забезпечити постійний контроль за параметрами електроенергії та вчасно реагувати на будь-які аномалії.

Ключові слова: *якість електроенергії, несиметричні джерела спотворення, провали напруги, спотворення якості електричної енергії,, режими електроспоживання.*

V. V. SHEVCHUK
PhD, Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-0535-2630

V. V. KUCHANSKY
Ph.D., Senior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-6473-9478

V. I. KOSHMAN
Ph.D. in Engineering, Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-6473-9478

L. R. SABARNO
Ph.D. in Engineering, Senior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-2153-2183

I. M. SEVASTYUK
Junior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-1971-3345

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC RELAY TO VOLTAGE FALLS, PHASE ANGLE JUMPS, AND THE POINTS OF BEGINNING AND END OF FALLS

The problem of ensuring the quality of electricity is becoming increasingly relevant with the introduction of various renewable energy sources, powerful nonlinear consumers and decentralization of electricity supply systems. These changes complicate the task of ensuring a stable electricity supply, which leads to significant losses from deterioration in the quality of electricity. Against the background of changes in the economic mechanism of the energy sector, the problem of reducing electricity losses in electricity networks remains relevant, becoming an important task for ensuring the financial stability of energy supply organizations. The level of electricity losses in electricity networks is a key indicator of the efficiency of their activities and the efficiency of electricity metering systems. This indicator indicates problems that require urgent solutions in the field of development, reconstruction and technical renewal of electricity networks, improvement of methods of their operation and management, increasing the accuracy of electricity metering and the efficiency of collecting funds for consumed electricity. The quality of electricity is crucial for the uninterrupted operation of modern electrical systems and electronics. The growth of electrical load and the spread of electronic devices lead to an increase in voltage and current distortions, which can cause serious problems in the operation of equipment and increase the risk of emergency situations. To ensure the reliability and stability of power supply, it is necessary to develop and improve methods and means of determining the presence and correction of power quality distortions. Analysis and classification of voltage dips is necessary for identifying failures and responding to them in a timely manner. The development of monitoring systems, in particular based on spatial vector models, allows for constant monitoring of electricity parameters and timely response to any anomalies.

Key words: *power quality, asymmetrical sources of distortion, voltage dips, distortion of the quality of electrical energy, power consumption modes.*

Постановка проблеми

У сучасних електроенергетичних системах, точка початку провалу є важливим показником, що визначає стійкість та надійність електрообладнання. Цей термін використовується для опису випадків, коли напруга спадає нижче нормального рівня на певний час, який може тривати від декількох мілісекунд до декількох секунд.

Початок провалу може виникати з різних причин, включаючи перевантаження в електричній мережі, зміни навантаження, короткі замикання або викиди. Коли такі події відбуваються, напруга в мережі може раптово спадати, що може мати серйозний вплив на електрообладнання [1–2].

Слід враховувати, що точка початку провалу може бути особливо критичною для деяких типів обладнання, особливо для чутливих пристроїв, таких як комп’ютери, медичне обладнання або обладнання з автоматичним управлінням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як приклад, у [3–4] ряд реле, пускачів двигунів і контакторів були випробувані з використанням двох значень точки початку провалу як параметрів (0 і 90°). Вища чутливість визначалась для провалів напруги, коротших ніж 4–5 циклів з 90° точкою початку провалу, ніж для тих самих провалів з 0° точкою початку провалу напруги. Для провалів тривалістю більше 5 циклів чутливість вища для 0° точки початку провалу, ніж для 90° точки. Подальші дослідження показали, що більшість провалів напруги тривають від 5 до 30 циклів, і тому рекомендується перевіряти реле, пускачі двигунів і контактори з 0° точкою початку провалу напруги.

Формулювання мети дослідження

Аналіз сприйнятливості електроприймачів до короткочасних випадкових провалів напруги, які визначається їх інерційністю, тобто часом, протягом якого здатні зберегти запасену енергію електромагнітного чи електростатичного поля.

Викладення основного матеріалу дослідження

Спотворення якості електроенергії – це відхилення від нормальних параметрів електричної енергії, яке може виникати внаслідок різних фізичних або технічних причин. Це може включати в себе такі явища, як гармоніки, перепади напруги, високі рівні шуму, флікер, недостатній фактор потужності тощо. Такі спотворення можуть впливати на електричні системи та прилади, що використовуються в промисловості, комерції або побуті, та можуть призводити до різноманітних проблем [7].

Аналізуючи результати досліджень також представлених в [5], показано, що положення точки початку провалу суттєво впливає на чутливість контакторів котушки змінного струму до провалів напруги (рис. 1).

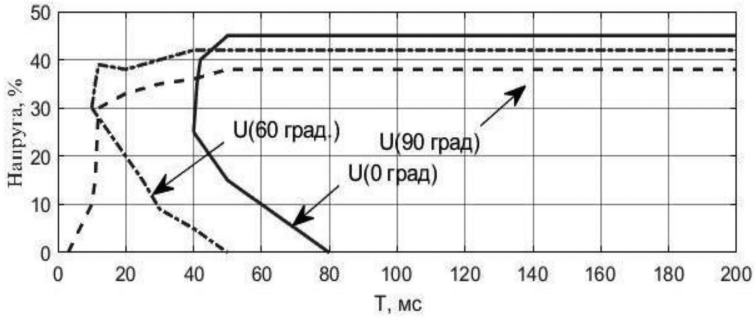


Рис. 1. Вплив точки початку провалу на чутливість провідника (без зсуву фази) [8]

Як слідує із рис. 1, контактор більш чутливий до глибоких провалів напруги з 90° точкою на хвилі, ніж до тих же провалів з 0° точкою початку провалу. Найпомітніший вплив точки початку провалу призводить до виникнення високого пускового струму під час відновлення номінальних умов електропостачання після завершення провалу (рис. 2).

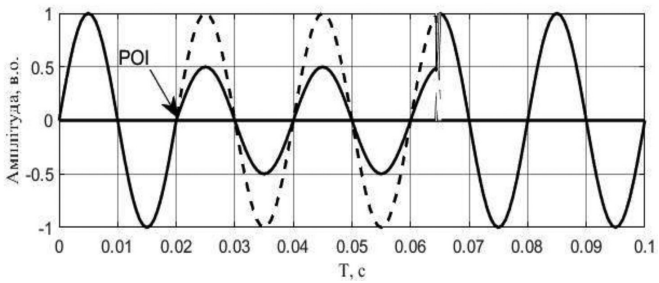


Рис. 2. Провал напруги з 0° точкою його початку [19]

Електромагнітне реле (ЕМР) – це пристрій, який використовується для керування електричними контактами за допомогою електромагнітних полів. Воно складається з котушки з ізольованим проводом, що намотана на магнітний сердечник, і контактів, які рухаються під впливом цього поля, відкриваючи або закриваючи електричне коло. Принцип дії ЕМР полягає в тому, що під час подачі електричного струму на котушку вона створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник, викликаючи його рух. Цей рух змінює положення контактів, що призводить до відкриття або закриття електричного кола.

ЕМР широко застосовується в промислових системах управління та зв'язку як свого роду базовий електричний компонент, який також відіграє роль у комутаційних ланцюгах, передачі сигналів та усуненні перешкод. Однак, коли в електромережі виникає коротке замикання це спричиняє проблеми з якістю електроенергії, такі як падіння напруги та короткі переривання [1, 5, 6], які впливають на нормальну роботу ЕМР.

Вважаючи вищеозначене, в роботі проведені дослідження роботи ЕМР при наявності провалів, POW (POR, POI) та PAJ.

Механізм реагування ЕМР на провал напруги ґрунтується на його основному принципі дії, що базується на використанні електромагнітного поля для керування перемиканням контактів. Коли на котушку ЕМР подається електричний струм, це створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник.

Під час провалу напруги, коли електричний струм або напруга падають нижче певного рівня, струм через котушку ЕМР може також зменшитися або втратити. Це призводить до втрати магнітного поля, яке утримувало контакти у потрібному стані.

У результаті, магнітний сердечник може відпустити свою позицію під дією сили пружини або іншого механізму, що призведе до зміни положення контактів. Це може призвести до відкриття або закриття електричного кола, залежно від конфігурації ЕМР.

ЕМРФ – це електромеханічні реле, робота яких заснована на дії магнітного поля нерухомої обмотки зі струмом на рухомий феромагнітний елемент (якір). Коли подається синусоїдальне живлення змінного струму, основний потік котушки змінного струму змінюється синусоїдально з часом:

$$F = \Phi_m \sin(\omega t). \tag{1}$$

Електромагнітна сила розраховується за допомогою електромагнітної сили Максвелла:

$$F_{mag} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \tag{2}$$

де S – площа магнітного притягання в повітряному зазорі, μ_0 – проникність вакууму.

Таким чином, згідно з рівняннями (1) та (2), Fmag можна записати як:

$$F_{mag} = \frac{\Phi_m^2 \sin^2(\omega t)}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2 \cos(2\omega t)}{4\mu_0 S}. \tag{3}$$

Із (3) слідує, що F_{mag} пропорційний квадрату основного потоку і змінюється в залежності від часу при подвоєній частоті напруги.

На рис. 3 представлені форми сигналів – електромагнітної сили та сили пружини.

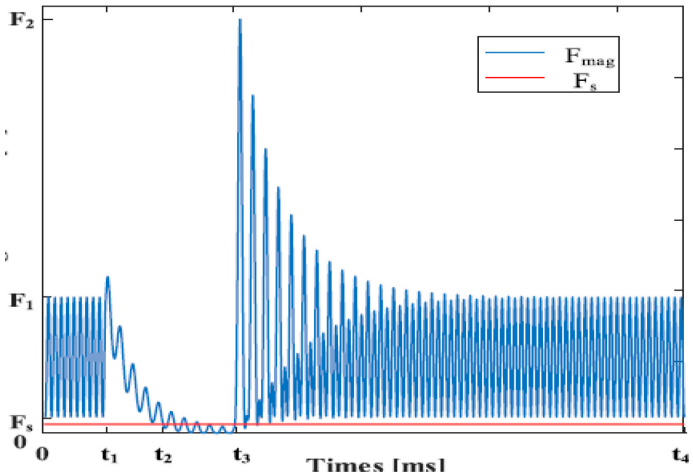


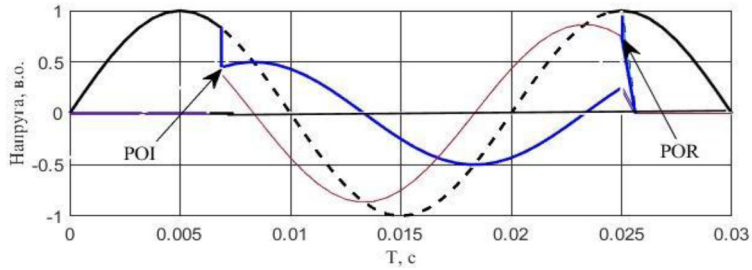
Рис. 3. Криві електромагнітної сили (F_{mag}) і сили пружини (F_s) під час провалу напруги

Перед початком провалу F_{mag} перевищує F_s, і ЕМР працює нормально. Коли провал відбувається в момент часу t_1, Fmag поступово зменшується; однак F_{mag} все ще перевищує F_s до часу t_2, і ЕМР працює нормально від t_1 до t_2. Fmag менше, ніж F_s від t_2, і ЕМР відключається від t_2 до t_3. Зниження закінчується в t_3, і ЕМР відновлюється для нормальної роботи. Це відбувається коли величина провалу напруги перевищує певний рівень і F_{mag} залишається вищим за F_s незалежно від того, скільки триває провал, і EMR може працювати стабільно [6–8]. Іншими словами, для забезпечення нормальної роботи EMR під час живлення Fmag має бути більше F_s. Таким чином, необхідно знати та кількісно визначити толерантність EMR до падіння напруги.

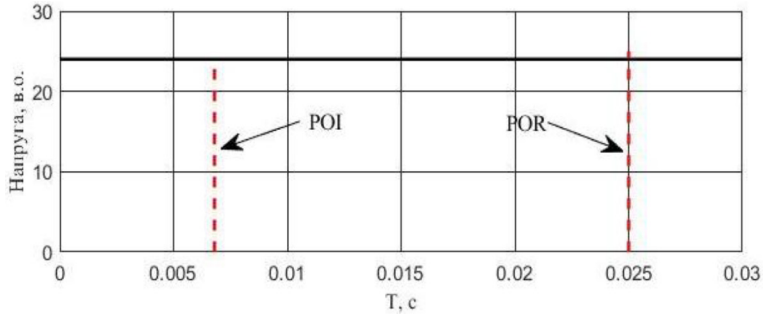
Крім того, різні POW і PAJ впливають на основний потік EMR, тим самим впливаючи на зміну F_{mag}. Це означає, що POW і PAJ можуть впливати на сприйнятність до ЕМР, тому при проведені тестування ЕМР потрібно брати до уваги ці характеристики.

В роботі була досліджена залежності роботи ЕМР від тривалості провалу напруги. На рис. 4 *а*, *б*, представлені провали напруги з різною тривалістю та криві спрацювання ЕМР.

Як видно на рис. 4, *а* представлений сигнал провалу напруги з тривалістю 18 мс і в даному випадку реле не спрацювало (рис. 4, *б*). Зазвичай, реле витримує тривалість провалу 20–25 мс, а потім спрацьовує. Провал напруги тривалістю 18 мс може відбутися внаслідок різних факторів, таких як короткочасне перевантаження або імпульсне навантаження.

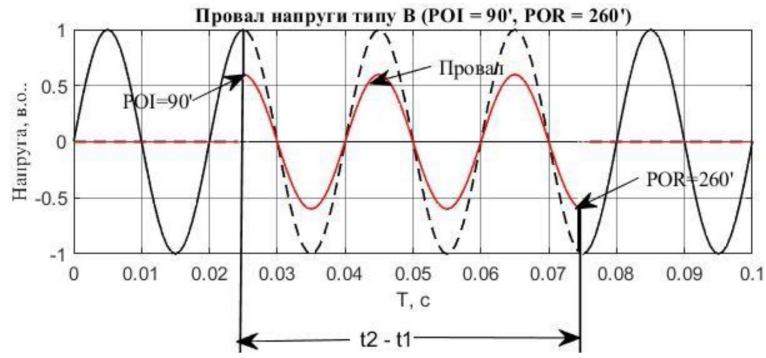


а

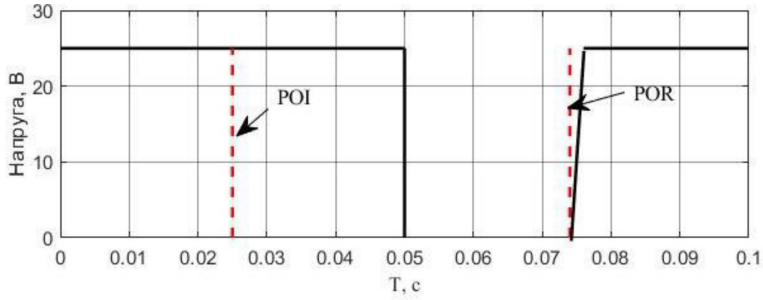


б

Рис. 4. Провал напруги з тривалістю 18 мс та крива спрацювання ЕМР



а



б

Рис. 5. Провал напруги з тривалістю 49 мс та крива спрацювання ЕМР

При наявності провалу 49 мс (рис. 5, *а*) реле спрацьовує через 25 мс після початку провалу (Точка POI). Напруга живлення навантаження знижується до 0 В, а після відновлення провалу напруги (точка POR) продовжує свою роботу.

Висновки

Для проведення моніторингу наявності спотворень якості електроенергії в електричних мережах, необхідно визначення наявності провалів напруги, ідентифікація їх типу та класифікація для визначення необхідних керуючих сигналів та засобів захисту електрообладнання.

Розроблений метод ідентифікації типу провалів напруги повинен однозначно ідентифікувати як провали, які викликані короткими замиканнями в електричній мережі, та наявністю потужного електричного обладнання.

Список використаної літератури

1. EPRI: 'The effects of point-on-wave on low-voltage tolerance of industrial process devices', (EPRI Brief 44, 1998)
2. EPRI: 'Performance of a hold-in device for relays, contactors and motor starters', (EPRI Brief 46, 1998).
3. Яремчук Н. А., Года О. Ю., Проскін В. В. Оцінювання комплексного показника якості складного об'єкта з характеристикою невизначеності. Український етрологічний журнал. 2018. No 2. С. 9–17.
4. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812–1818, Oct. 2004, doi: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Волошко А. В., Джеря Т. Е., Шевчук В. В. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 106) з матеріалами 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Recent scientific investigation" (26–28 квітня 2022 року), Oslo, Norway, с. 369–376.
6. Волошко А. В., Джеря, Т. Е., Шевчук В. В. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 107) з матеріалами 12-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (6–8 травня 2022 року), Manchester, Great Britain, с. 510–516.
7. Шевчук В. В., Джеря Т. Е. (2022). Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського "Енергетика. Екологія. Людина". Київ, с. 11–17.
8. Шевчук В. В. (2023). Механізм зменшення збитків від наявності провалів напруги за допомогою моделі просторового вектора. Міжнародний електронний науково-практичний журнал "WayScience" ISSN 2664-4819. Конференція 14–15 вересня 2023, вихід збірника тез доповідей 22.09.2023 р

References

1. On Approval of the Distribution Systems Code https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text
2. Kuznetsov V. G., Shpolianskyi O. G., Yaremchuk N. A. Generalized indicator of energy quality in electrical networks and systems. Tekhnichna elektrodynamika. 2011. No. 3. Pp. 46–52. (Ukr)
3. Yaremchuk N. A., Goda O. Yu., Proskin V. V. Evaluation of a complex indicator of the quality of a complex object with a characteristic of uncertainty. Ukrainian Metrological Journal. 2018. No 2. Pp. 9–17. (Ukr)
4. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812–1818, Oct. 2004, doi: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Voloshko A. V., Dzherya T. E., Shevchuk V.290V. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Collection of scientific papers "InterConf," (№ 106) with materials of the 5th International Scientific and Practical Conference "Recent scientific investigation" (April 26–28, 2022), Oslo, Norway, pp. 369–376.
6. Voloshko A. V., Dzherya, T. E., Shevchuk V. V. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Collection of scientific papers "InterConf," (№ 107) with materials of the 12th International Scientific and Practical Conference "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (May 6–8, 2022), Manchester, Great Britain, pp. 510–516.
7. Shevchuk V. V., Dzherya T. E. (2022). Reducing the impact of nonlinear loads on the quality of electricity: basic methods of managing the parameters of energy systems. Collection of scientific works of the Institute of Electrical Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute "Energy. Ecology. Man". Kyiv, pp. 11–17.
8. Shevchuk V. V. (2023). Mechanism for reducing losses from the presence of voltage dips using a spatial vector model. International electronic scientific and practical journal "WayScience" ISSN 2664-4819. Conference September 14–15, 2023, publication of the collection of abstracts 09/22/2023.