

ПРОВАЛИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХНІХ ХАРАКТЕРИСТИК

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Широке впровадження засобів силової електроніки, зростаюча кількість нелінійних споживачів, зміна структури носіїв електричної енергії негативно впливають на якість електричної енергії. Одним з найвпливовіших параметрів якості електричної енергії, що впливають на перебої в роботі електричного обладнання, є провали напруги. Провали напруги в електричній мережі є негативним явищем, яке призводить до збільшення втрат електроенергії, зростання споживання реактивної потужності, зменшення продуктивності приймачів електроенергії, перебоїв в роботі електричного обладнання.

Проаналізовано основні причини провалів напруги, такі як перенавантаження, короткі замикання, несправність обладнання та інші фактори, які впливають на стан електричних мереж, та методи визначення їхніх характеристик.

Визначення провалів напруги часто встановлюється на основі двох параметрів — величина/глибина та тривалість. Таке визначення характерно для перехідних процесів внаслідок симетричних спадів напруги. Але перехідні процеси через несиметричні спади напруги визначаються не тільки значеннями величина/глибина та тривалість, а й так званою точкою на хвилі напруги, де відбувається провал напруги та зміною фазового кута під час провалу напруги.

Стрибки фазового кута напруги в електричній мережі та пов'язаний з цим зсув фазового кута, суттєво впливають не тільки на похибку визначення кількісних та якісних параметрів електричної енергії, а є проблемою для силової електроніки, яка використовує перемикання фаз або перехід напруги через нуль.

Визначення фазового кута проаналізовано на прикладі наявності короткого замикання в радіальній електричній мережі. Зазначено доцільність визначення основних характеристик провалів напруги в електричних мережах та проаналізовано найпридатніші методи.

Ключові слова: якість електроенергії, провали напруги, трифазна система, незбалансоване падіння напруги, стрибок фазового кута.

Вступ

Погіршення якості електроенергії, такі як: миттєве зниження напруги (просадка), перевищення напруги (зростання), стрибки напруги та гармоніки, — визначено як основні джерела проблем якості електроенергії [1]. До прикладу, короткочасне зниження напруги (просадка) та падіння напруги може спричинити відключення чутливого обладнання, що призведе до втрат промислового виробництва. Такі події мають серйозні економічні наслідки, а також впливають на якість продукції та послуг.

Забезпечення якості електроенергії — це нова галузь в електротехніці, де фундаментальні дослідження включають базові концепції та визначення, моделювання та аналіз, вимірювання та прилади, джерела, ефект і пом'якшення. Кінцевою метою дослідження якості електроенергії є підтримання задовільної якості електропостачання.

З рис. 1 видно, що найбільший відсоток перебоїв обладнання, тобто 31 %, спричинений провалами напруги. Провал напруги може вплинути на більшість чутливого обладнання, наприклад персональні комп'ютери (ПК), приводи з регульованою швидкістю (ASD), програмовані логічні контролери (PLC) і контактори.

Наявні алгоритми визначення характеристик споживання електроенергії ґрунтуються на обробленні закодованих вибірок миттєвих значень фазних струмів і напруг, взятих за визначений період сигналу в еквідістантні моменти часу.

Зростаюча потреба в електроенергії, зміна структури носіїв енергії, збільшення кількості потужних нелінійних навантажень негативно впливають на якість електроенергії та зумовлюють наявність систематичних похибок у вимірювальних приладах для синусоїдальних систем.

Особливо великим є вплив нестабільності частоти в електричній мережі [2].

Метою роботи є визначення основних характеристик провалів напруги, які суттєво впливають на похибку вимірювань приладами, принцип роботи яких ґрунтується на точці переходу напруги через нуль та необхідність врахування стрибків фазового кута основної хвилі напруги (впливає на частоту дискретизації).

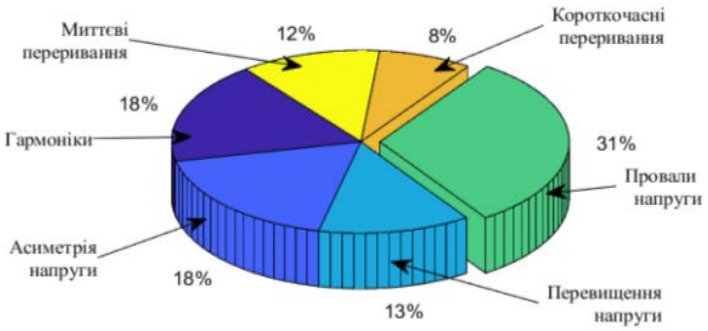


Рис. 1. Вплив параметрів якості електроенергії на перебої в роботі електричного обладнання

Результати дослідження

Згідно з чинними нормами, провалом напруги називають короткочасне (від півперіоду до кількох десятків секунд) різке зменшення середньоквадратичного значення напруги більш ніж на 10 % від номінального в деякій точці електричної мережі, з подальшим її відновленням до попереднього або близького до нього значення. Для провалу напруги згідно з [1] використовують такі основні характеристики: глибина провалу, яку визначають за найменшим значенням напруги під час її провалу; амплітуда провалу, яка є відносним найменшим значенням напруги під час її провалу; тривалість провалу, яку визначають як час від моменту зменшення напруги нижче 90 % до моменту, коли під час відновлення вона стає більшою цього значення.

Основні характеристики провалу напруги показано на рис. 2. [3]

У трифазних системах електропостачання початком провалу напруги вважають момент, коли напруга в одній з фаз падає нижче порогового значення початку провалу напруги (ΔU_A), закінченням провалу напруги вважають момент, коли напруга у всіх фазах зростає вище порогового значення закінчення провалу напруги (ΔU_C).

Для кількісного визначення величини провалу використовуються такі основні методи [1]—[3]:

Метод середньоквадратичної напруги

Напруга під час провалу обчислюється за часовими вибірками миттєвих значень напруги. Слід звернути увагу на:

- середньоквадратичне значення під час провисання не є постійним (рис. 3);
- напруга не відновлюється відразу після падіння (див. рис. 3);

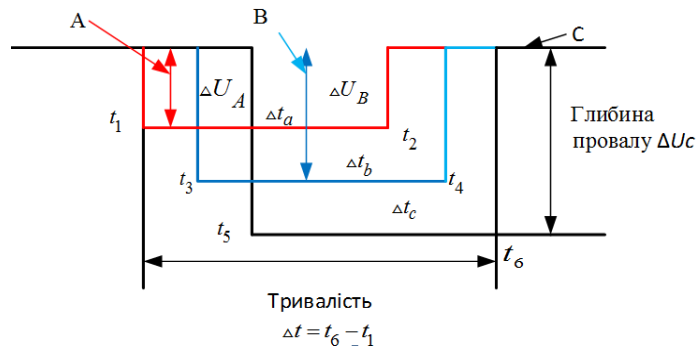


Рис. 2. Основні характеристики провалу напруги в трифазній системі: t_1, t_3, t_5 ; t_2, t_4, t_6 — початок та кінець провалів напруги фаз A, B, C відповідно; $\Delta t_a, \Delta t_b, \Delta t_c$ — тривалість провалів фаз; $\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C$ — глибина провалів

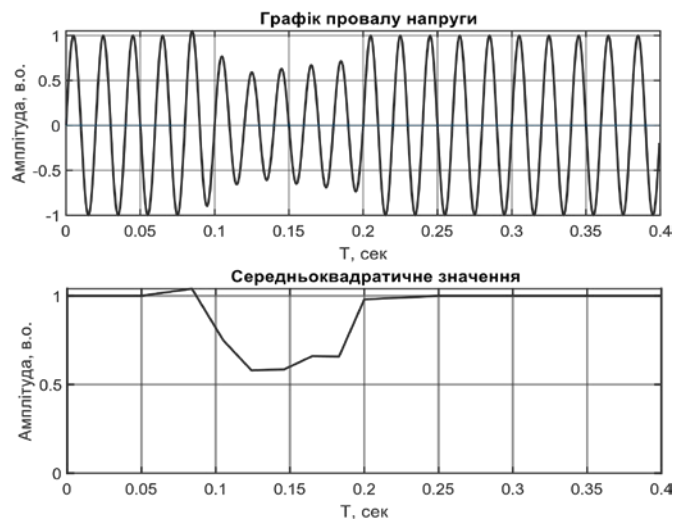


Рис. 3. Провал напруги та її середньоквадратичне значення

– відразу після падіння напруга становить лише 90 % від значення перед падінням.

Метод основної напруги

Основне значення напруги під час падіння розраховується як функція часу. Отримане при цьому абсолютне значення дає величину падіння напруги як функцію часу, а аргумент дає стрибок фазового кута. Цей метод передбачає, що в ньому немає постійного компонента.

Метод пікової напруги

Застосовуючи цей метод вважають, що напруга під час її падіння характеризується постійним середньоквадратичним значенням, зазвичай найнижчою фазною напругою. Однак насправді, середньоквадратичне значення змінюється під час просідання. Тому розроблені різні методи для характеристики провалів напруги.

Найпоширенішим підходом до визначення рівня напруги під час падіння є врахування найнижчої фазної напруги та ігнорування решти (рис. 4, фаза А).

Однак, цей метод визначає лише одне падіння на одну несправність і

не розрізняє однофазні та багатифазні падіння напруги.

Інший метод полягає в розгляді напруги в кожній фазі. Просадка напруги в кожній фазі буде зараховуватися як окрема подія. За допомогою цього методу просадка трифазної напруги буде зарахована як три провали напруги. Таке представлення полягає у використанні середньої напруги всіх фаз. Цей метод визначає лише один провал напруги і вказує на несправність, і зазвичай, жодна з фаз не має такої ж напруги, як середня. Дослідження провалів трифазної напруги виявило дві основні групи: збалансованих і незбалансованих провалів напруги [3], [4]. Збалансований провал напруги має однакову величину в усіх фазах і фазовий зсув 120° (рис. 5).

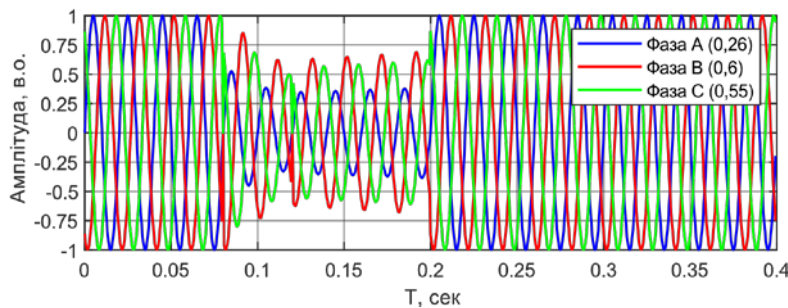


Рис. 4. Трифазне незбалансоване падіння напруги

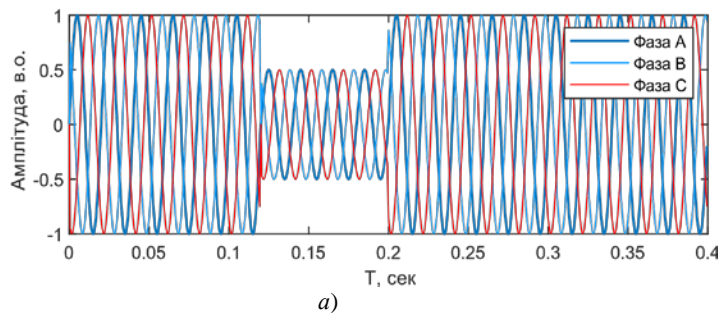


Рис. 5. Збалансований трифазний провал напруги: а — векторна діаграма; б — тип провалу А

Незбалансовані провали напруги не мають однакової величини в усіх фазах або фазового зсуву на 120° між фазами (рис. 6).

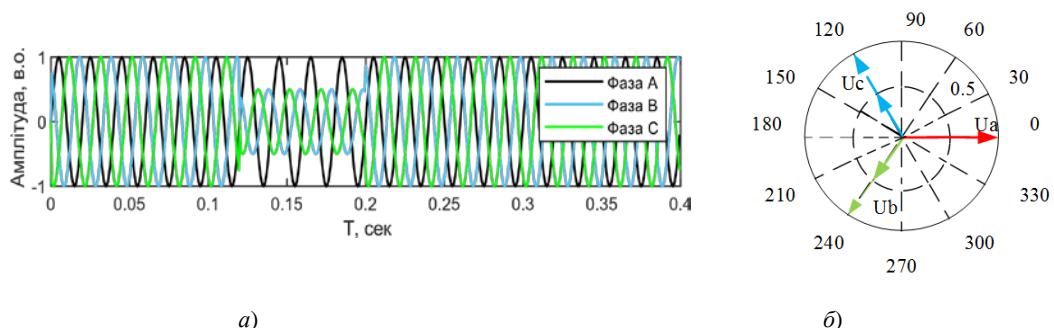


Рис. 6. Незбалансоване трифазне падіння напруги: а — векторна діаграма; б — тип провалу Е

Незбалансовані типи провалів складніші, вони додатково поділяються на 6 підгруп. Як зазначено раніше, визначення провалів напруги часто встановлюється на основі двох параметрів: величини/глибини та тривалості. Для врахування обох параметрів часто використовується такий термін як площа «величина–тривалість». Прикладом цього є застосування кривої прийнятності потужності

(КПП). Це графічний інструмент, який використовується для визначення того, чи впливає величина напруги провалу на несправність електрообладнання, чи ні. Практично, це поділ двовимірної площини величина–тривалість на прийнятні та неприйнятні зони. Зазвичай їх три:

1. Допустима область. Усі події в цій області не призводять до збоїв у роботі електрообладнання.
2. Заборонена область. Ця область містить усі потенційно небезпечні випадки провалу/перевищення напруги.

3. Зона переривання. Ця область містить провали напруги, які спричиняють несправності електрообладнання.

Іншими важливими параметрами, які описують «провал напруги», є зміна фазового кута під час провалу напруги та пов'язаний зсув фазового кута, де відбувається провал напруги [5], [6].

Розглянемо визначення зазначених параметрів на основі радіальної електромережі (рис. 7).

Хоча модель досить проста, вона є дуже корисним інструментом для оцінки індивідуальних властивостей провалу напруги. Припустимо, що мережа працює на номінальній напрузі $E = 1$ в. о. Мережа живиться від генератора, або від зовнішньої електромережі. У точці A сталося к. з. Представлена модель дає змогу обчислити падіння напруги в довільній точці мережі. Це досягається шляхом визначення точки загального приєднання (ТЗП) у мережі, звідки подаються струми к. з. та навантаження.

Імпеданс між генератором (або зовнішньою мережею) і ТЗП називається імпедансом джерела Z_S . Імпеданс між ТЗП і місцем пошкодження (т. A) називається опором замикання Z_F . Якщо знехтувати струмами навантаження під час к. з., провал напруги U_{np} на ТЗП у в. о. описується як

$$U_{np} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E, \quad (1)$$

де $Z_S = R_S + jX_S$; $Z_F = R_F + jX_F$.

При цьому необхідно відмітити, що величина падіння напруги залежить від опору несправності — відстані к. з. від ТЗП (буде прагнути до 1 в. о.). Чим більша відстань від навантаження до к. з., тим менше провал напруги на клеммах навантаження.

Стрибки кута фази під час трифазних замикань викликані різницею у співвідношенні X/R між джерелом і фідером. Стрибок фазового кута можна розрахувати як

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right). \quad (2)$$

Якщо $X_S/R_S = X_F/R_F$, то $\Delta\varphi = 0$ і немає стрибка фазового кута.

Основним джерелом стрибків фазового кута є трансформація прогинів від високих рівнів напруги до низьких рівнів напруги, а також через різницю у відношенні реактивного опору до опору (X/R) між джерелом і фідером [6], [7].

На рис. 8 показано графік провалу напруги та стрибок фазового кута. Стрибок фазового кута під час несправності зумовлений зміною співвідношення X/R .

Характеристики точок на хвилі напруги

Щоб дізнатися точніше значення для тривалості падіння, потрібно знайти «точку на хвилі ініціювання спаду» і «точку на хвилі відновлення напруги».

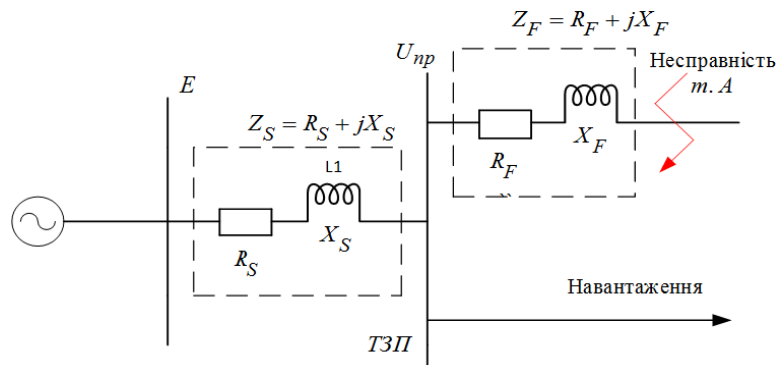


Рис. 7. Спрощена модель радіальної електромережі [4], [5], трифазне металічне к. з. в т. А

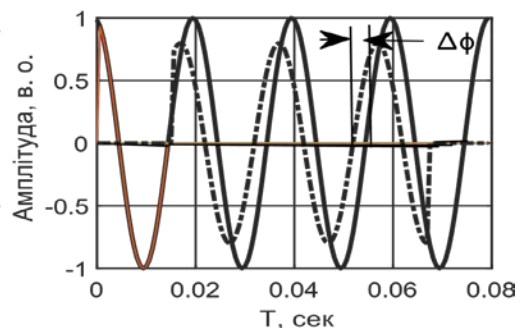


Рис. 8. Провал напруги величиною 70% зі стрибком фазового кута + 45%

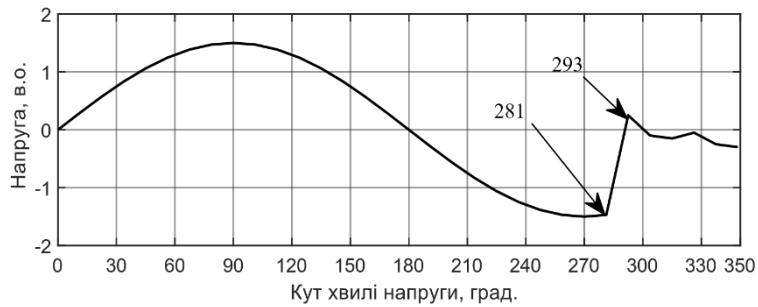


Рис. 9. Точка початку хвилі провисання знаходиться між 281° і 293°

Точка на хвилі початку спаду [4] — це фазовий кут основної хвилі напруги, де починається спад напруги. Цей кут відповідає куту, під яким виникає коротке замикання. Точка відліку береться для обчислення точки на хвилі початку провисання. Зазвичай перехід основної напруги через нуль вгору береться за еталон [5].

На рис. 9 точка початку спаду або точка на хвилі початку спаду знаходиться поблизу пікового значення напруги.

Точка на хвилі відновлення напруги — це фазовий кут основної хвилі напруги, за якого відбувається основне відновлення — 90...95 % від номінальної напруги.

Висновки

1. Наявність провалів напруги в електричній мережі призводить до стрибків фазового кута напруги і, як наслідок, до появи похибки вимірювання параметрів завдяки невідповідності встановленої частоти дискретизації та реальної частоти в електричній мережі. Для зменшення цієї похибки необхідно враховувати значення дійсного фазового кута основної гармоніки напруги за якого відбувається основне її відновлення після провалу.

2. Для знаходження дійсного значення фазового кута потрібно знаходити точне значення тривалості провалу напруги, тобто необхідне визначення так званих точок на хвилі початку провисання і на хвилі відновлення напруги (фазовий кут основної хвилі напруги).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). *Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності*, чинний з 1.10.2014. К.: Держстандарт України, 2014, 34 с.
- [2] М. Ф. Сопель, І. В. Яковлева, і Є. М. Танкевич, «Вплив нестабільності частоти електромережі на точність векторних вимірювань струму та напруги,» *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 36, с. 121-126, 2013.
- [3] Yang Han, Yu Feng, Ping Yang, Lin Xu, Yan Xu, and Frede Blaabjerg, "Cause, Classification of Voltage Sag, and Voltage Sag Emulators and Applications: A Comprehensive Overview," *IEEE Open Access Journal*, no. 6, pp. 1922-1934, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958965>.
- [4] M. H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions," *IEEE Press Series on Power Engineering*, pp. 253-324, 2000.
- [5] G. Alonso Orcajo, J. M. Cano R., C. H. Rojas G., M. G. Melero, M. F. Cabanas, and F. Pedrayes, "Voltage Sags in Industrial Systems," *RE&PQJ*, vol. 1, no. 3, pp. 296-301, March 2005. <https://doi.org/10.24084/repqj03.278>.
- [6] George G. Karady, Saurabh Saksena, Baozhuang Shi, and Nilanjan Senroy, "Effects of Voltage Sags on Loads in a Distribution System," *Power Systems Engineering Research Center*, PSERC Publication 05-63, October, 2005.
- [7] V. E. Wagner, A. A. Andreshak, and J. P. Staniak, "Power quality and factory automation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 4, pp. 620-626, Jul./Aug. 1990. <https://doi.org/10.1109/28.55984>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.08.2023

Волошко Анатолій Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання, e-mail: avolosko820@gmail.com ;

Шевчук Віталій Вадимович — аспірант кафедри електропостачання, e-mail: vshevchuk1603@gmail.com
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

A. V. Voloshko¹
V. V. Shevchuk¹

Voltage Failures in Electrical Networks and Determination of their Characteristics

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Widespread introduction of power electronics, the growing number of non-linear consumers, and the change in the structure of electrical energy carriers have a negative impact on the quality of electrical energy. One of the most important parameters of electrical energy quality influencing the interruptions of the operation of electrical equipment is voltage failures. Voltage failure in the electrical network is negative phenomenon that leads to an increase of electricity losses, an increase of reactive power consumption, a decrease of electric loads performance and interruptions in the operation of electrical equipment.

Main causes of voltage failures, such as overloads, short circuits, equipment malfunctions and other factors that affect the state of electrical networks and methods for determining their characteristics are analyzed.

The determination of voltage failure is often established on the basis of two parameters — magnitude/depth and duration. This determination is typical for the transient processes due to symmetrical voltage drops. But transient processes due to asymmetric voltage failures are determined not only by the values of magnitude/depth and duration, but also by the so-called point on the voltage wave where the voltage dip occurs and the change in the phase angle during the voltage dip.

Jumps in the voltage phase angle in the electrical network and the associated phase angle shift significantly affect not only the error in determining the quantitative and qualitative parameters of electrical energy, but are also a problem for power electronics that use phase switching or voltage crossing through zero.

The determination of the phase angle is analyzed on the example of the presence of a short circuit in the radial electrical network. The expediency of determining the main characteristics of voltage dips in electrical networks is highlighted and the most suitable methods are analyzed.

Keywords: power quality, voltage dips, three-phase system, unbalanced voltage drop, voltage waves.

Voloshko Anatolii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Supply, e-mail: avolosko820@gmail.com ;

Shevchuk Vitalii V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Supply, e-mail: vshevchuk1603@gmail.com