

## ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА НЕСПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРИВАНЬ ТА ЗМІН НАПРУГИ

**А.В. Волошко\***, докт. техн. наук, **В.В. Шевчук\*\***

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [vchevchuk1603@gmail.com](mailto:vchevchuk1603@gmail.com), [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)

*Розглядається тестування електрообладнання на несприйнятливості до провалів напруги, короточасних перерв та змін напруги. Особливу увагу приділено впливу точки початку провалу на чутливість електрообладнання, а також дослідженню стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибку фазового кута та точок початку і закінчення провалів. Аналізується механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги, його чутливість до зміни частоти, наявності гармонічних спотворень та змін номінального значення напруги. Окремо розглядається симетрія чверті циклу щодо точки на хвилі. Бібл. 6, рис. 6.*

**Ключові слова:** провали напруги, короточасні перерви напруги, зміни напруги, електрообладнання, чутливість електрообладнання, електромагнітне реле, стрибок фазового кута, частота напруги, гармонічні спотворення, симетрія чверті циклу.

**Вступ.** Електрообладнання в сучасних електромережах часто піддається різним видам електромагнітних впливів, які можуть призвести до збоїв у його роботі. Провали напруги, короточасні перерви та зміни напруги є одними з найпоширеніших проблем, що впливають на стабільність роботи обладнання. Ці збої можуть призвести до серйозних фінансових втрат, зниження ефективності та навіть до аварійних ситуацій, що робить питання несприйнятливості електрообладнання до таких впливів надзвичайно актуальним.

Актуальність дослідження полягає в необхідності забезпечення надійної та безперебійної роботи електрообладнання в умовах, коли провали напруги, короточасні перерви та зміни напруги є неминучими. Це особливо важливо для критично важливих об'єктів, таких як медичні установи, виробничі підприємства та інші об'єкти інфраструктури, де будь-які збої можуть мати серйозні наслідки. Особлива увага приділяється аналізу впливу точки початку провалу на чутливість різних типів електрообладнання. Детальне дослідження стійкості електромагнітного реле включає механізм його реагування на провали напруги, а також вплив таких факторів, як зміна частоти, гармонічні спотворення та зміни номінального значення напруги. Окрему увагу приділено симетрії чверті циклу щодо точки на хвилі, яка має значний вплив на реакцію реле.

**Мета роботи.** Метою роботи є дослідження несприйнятливості електрообладнання до провалів напруги, короточасних перерв та змін напруги, а також визначення критичних параметрів, що впливають на стійкість та надійність роботи електрообладнання. Зокрема, досліджується вплив точки початку провалу на чутливість обладнання та стійкість електромагнітного реле до провалів напруги, стрибків фазового кута та гармонічних спотворень. Отримані результати сприятимуть розробці ефективних методів підвищення надійності та стабільності роботи електрообладнання в умовах нестабільного електропостачання.

**Результати досліджень.** Одним із ключових моментів визначення рівня ефективності впроваджених методів та засобів захисту електрообладнання є тестування електрообладнання на їхню несприйнятливості до провалів напруги, короточасних переривань та змін напруги. Це включає проведення серії тестів, які моделюють умови непередбачених втрат напруги та оцінюють реакцію обладнання на такі ситуації. Таке тестування дає змогу виявити потенційні проблеми та внести відповідні корективи в конструкцію або функціонування обладнання для забезпечення його надійності та стабільності в різних умовах електропостачання.



Згідно з ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [1] електрообладнання, яке використовується в системах електропостачання та електроспоживання, повинно пройти випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги перед введенням у промислову експлуатацію. Основні параметри таких випробувань включають глибину та тривалість провалів напруги [2].

Під час тестування електрообладнання піддається провалам напруги на рівнях 30, 60 і понад 95% нижче номінальної напруги. Тривалість провалів та перерв становить 10 мс, 100 мс і 5000 мс відповідно. Для кожного рівня тестування проводяться п'ять провалів зі швидкістю один провал на хвилину. Зміна напруги живлення здійснюється при переході напруги через нуль, а номінальна напруга використовується як основа для визначення рівня випробувальної напруги.

У сучасних електроенергетичних системах важливим показником, який визначає стійкість та надійність електрообладнання, є точка початку провалу (POI) та його закінчення (POW) [3]. Цей термін описує випадки, коли напруга знижується нижче нормального рівня на певний час, що може варіюватися від кількох мілісекунд до кількох секунд. Початок провалу може виникати через різні причини, такі як перевантаження мережі, зміни навантаження, короткі замикання або викиди. Під час таких подій напруга в мережі може раптово знижуватися, що може мати значний вплив на електрообладнання. Особливо критичним це явище є для чутливих пристроїв, таких як комп'ютери, медичне обладнання або обладнання з автоматичним управлінням. Наприклад, медичне обладнання може зазнати серйозних проблем, якщо напруга падає під час критичних процедур, що спричинить небезпечні наслідки для пацієнтів.

Важливість точного визначення точки початку провалу напруги підкреслюється в багатьох стандартах та науково-технічній літературі. Наприклад, дослідження показують, що для деяких застосувань, таких як відключення електромеханічного контактора, фазовий кут, при якому починається падіння напруги, є важливою характеристикою, відомою як точка на хвилі. Обладнання може бути чутливим до точки ініціації під час провалу, а як точка початку, так і точка завершення провалу можуть впливати на роботу пристроїв з активним керуванням, які залежать від синхронізації з формою сигналу. Розглянемо основні аспекти впливу точки початку провалу на чутливість електрообладнання.

#### *Тип обладнання.*

Чутливе обладнання, таке як комп'ютери, медичне обладнання або системи автоматичного управління, особливо вразливе до змін напруги. Раптове зниження напруги може призвести до їхнього вимкнення або пошкодження. Електромеханічні пристрої, такі як двигуни, реле та контактори, також можуть зазнавати збоїв під час провалів напруги. За таких умов вони втрачатимуть потужність або працюватимуть неправильно, що спричинить зупинку виробничих процесів.

#### *Тривалість провалу.*

Короткочасні провали (менше 4-5 циклів) зазвичай викликають менше проблем, ніж довші. Проте навіть короткочасні провали можуть бути критичними для дуже чутливих пристроїв. Довші провали (більше 5 циклів) можуть призвести до значних проблем в роботі обладнання включно з повною зупинкою або пошкодженням.

#### *Фазовий кут.*

Фазовий кут, при якому починається провал, також впливає на чутливість обладнання. Наприклад, випробування показали, що провали напруги, які починаються з точкою  $90^\circ$ , можуть бути більш шкідливими для деяких типів обладнання, ніж провали з точкою  $0^\circ$ . Обладнання, яке залежить від точної синхронізації з електричною хвилею, особливо вразливе до змін фазового кута.

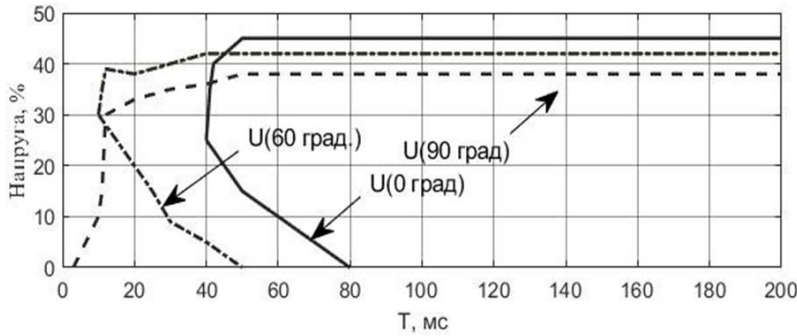
#### *Реакція обладнання.*

Обладнання з активним керуванням, яке використовує інформацію про синхронізацію з формою сигналу, може зазнавати збоїв як на початку, так і в кінці провалу напруги. Деякі пристрої, такі як двигуни постійного струму, що використовують керовані тиристори, особливо вразливі до таких змін.

Для забезпечення надійності роботи рекомендується перевіряти реле, пускачі двигунів і контактори з різними точками початку провалу, зокрема з точкою  $0^\circ$ , оскільки більшість провалів триває від 5 до 30 циклів.

Проаналізувавши результати досліджень, представлених в [4], з'ясовано, що положення точки початку провалу суттєво впливає на чутливість контакторів котушки змінного струму до провалів напруги (рис. 1).

Як показано на рис. 1, контактор більш чутливий до глибоких провалів напруги з фазовим кутом  $90^\circ$ , ніж до аналогічних провалів з фазовим кутом  $0^\circ$ .



**Рис. 1.** Чутливість контакторів котушок змінного струму до провалів та переривань напруги (без зсуву фази)

Також видно, що різниця в чутливості максимальна для коротких переривань, де час спрацювання/відновлення контактора коливається від кількох мс для провалу напруги з  $90^\circ$  фазовим кутом та понад 80 мс для  $0^\circ$  фазового кута.

Дослідження стійкості електромагнітних реле (ЕМР) до провалів напруги є

важливим аспектом забезпечення надійності електричних систем. Провали напруги, стрибки фазового кута, а також точки початку та закінчення провалів впливають на роботу реле і можуть призводити до збоїв в їхньому функціонуванні.

Провали напруги виникають при зниженні напруги в мережі на короткий час, зазвичай від кількох мілісекунд до кількох секунд. Вони можуть бути спричинені різними факторами включно з короткими замиканнями, перевантаженням або змінами в навантаженні. Електромагнітні реле можуть бути чутливими до таких провалів, що може призвести до їхнього неправильного спрацювання або навіть пошкодження.

Фазовий кут визначає момент часу в електричному циклі, при якому починається провал напруги. Стрибки фазового кута можуть впливати на чутливість реле до провалів напруги. Дослідження показують, що реле більш чутливі до провалів напруги, які починаються з певним фазовим кутом, наприклад, з  $90^\circ$ , ніж до провалів, які починаються з фазовим кутом  $0^\circ$ . Це пов'язано з тим, що різні фазові кути впливають на струми, що проходять через реле, по-різному.

Точки початку та закінчення провалів також мають значний вплив на роботу реле. Точка початку провалу визначає, коли напруга починає знижуватися, а точка закінчення — коли напруга повертається до нормального рівня. Реле можуть бути чутливими до обох цих моментів, і їхнє неправильне спрацювання може відбуватися як на початку, так і в кінці провалу. Випробування показують, що реле можуть реагувати по-різному на провали напруги з різними точками початку й закінчення.

Дослідження стійкості електромагнітних реле до провалів напруги включають лабораторні випробування, під час яких реле піддаються провалам напруги з різними фазовими кутами і тривалістю. Випробування показали, що короткочасні провали (менше 4-5 циклів) зазвичай мають менший вплив на реле, ніж довші провали. Однак навіть короткочасні провали можуть викликати серйозні проблеми для особливо чутливих реле.

Важливим висновком досліджень є те, що більшість провалів напруги тривають від 5 до 30 циклів. Таким чином, рекомендується проводити випробування реле з точками початку провалу при  $0^\circ$  та інших фазових кутах для визначення їхньої стійкості до провалів напруги.

Механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги базується на його основному принципі дії, що використовує електромагнітне поле для керування перемиканням контактів. Коли через котушку ЕМР проходить електричний струм, утворюється магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник.

Під час провалу напруги, коли електричний струм або напруга знижуються нижче певного рівня, струм через котушку ЕМР також може зменшитися або зовсім зникнути. Це призводить до втрати магнітного поля, яке утримувало контакти в потрібному стані. Унаслідок цього магнітний сердечник може змінити своє положення під дією пружини або іншого механізму, що призведе до зміни стану контактів. Це може викликати відкриття або закриття електричного кола залежно від конфігурації ЕМР.

Електромеханічні реле функціонують на основі впливу 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, що впливає на магнітний сердечник і відповідно на перемикання контактів. На рис. 2 показано форми сигналів – електромагнітної сили та сили пружини.

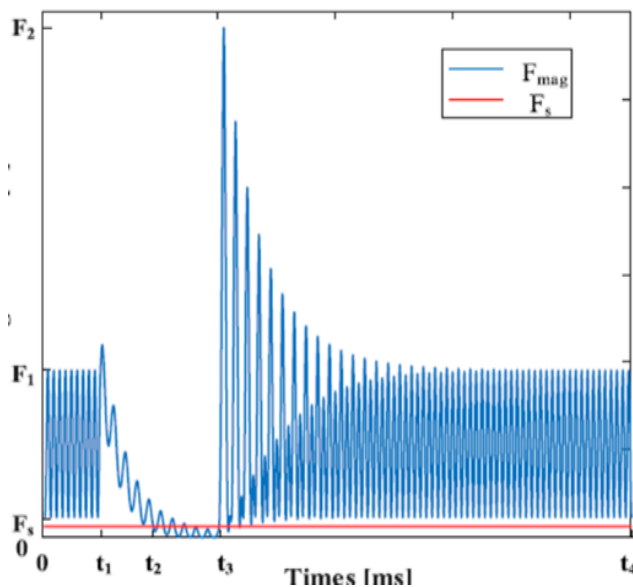


Рис. 2. Криві електромагнітної сили ( $F_{mag}$ ) і сили пружини ( $F_s$ ) під час провалу напруги

Перед початком провалу магнітна сила ( $F_{mag}$ ) перевищує силу пружини ( $F_s$ ), і електромагнітне реле (ЕМР) працює нормально. Коли провал відбувається в момент часу  $t_1$ ,  $F_{mag}$  поступово зменшується; проте  $F_{mag}$  все ще перевищує  $F_s$  до часу  $t_2$ , і ЕМР продовжує працювати нормально від  $t_1$  до  $t_2$ .  $F_{mag}$  стає меншим за  $F_s$  з моменту  $t_2$ , і ЕМР відключається з  $t_2$  до  $t_3$ . Зниження напруги закінчується в  $t_3$ , і ЕМР відновлює нормальну роботу. Це відбувається, коли величина провалу напруги перевищує певний рівень, а  $F_{mag}$  залишається вищим за  $F_s$  незалежно від тривалості провалу, що дає змогу ЕМР працювати стабільно. Іншими словами, для забезпечення нормальної роботи ЕМР під час провалу напруги  $F_{mag}$  має бути більше  $F_s$ . Тому необхідно знати та кількісно визначити толерантність ЕМР до падіння напруги.

Крім того, різні параметри форми хвилі (POW) та амплітудно-частотні характеристики (PAJ) впливають на основний потік ЕМР, що зі свого боку впливає на зміну  $F_{mag}$ . Це означає, що POW і PAJ можуть впливати на сприйнятливості ЕМР до провалів напруги, тому при тестуванні ЕМР ці характеристики потрібно враховувати.

З рис. 3 а видно, що зображений сигнал має провал напруги з тривалістю 18 мс, і в

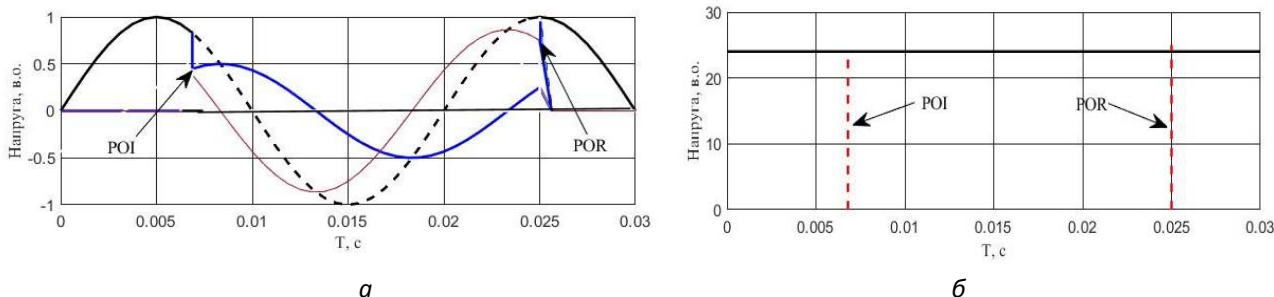


Рис. 3. Провал напруги з тривалістю 18 мс та крива спрацювання ЕМР

цьому випадку реле не спрацює (рис. 3 б). Зазвичай реле витримує тривалість провалу від 20 до 25 мс перед спрацюванням. Провал напруги тривалістю 18 мс може бути спричинений різними факторами, такими як короточасне перевантаження або імпульсне навантаження.

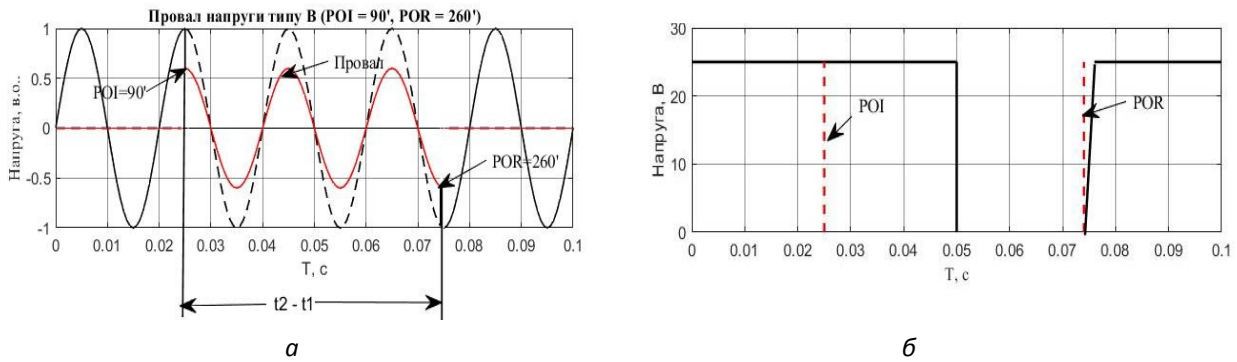


Рис. 4. Провал напруги з тривалістю 49 мс та крива спрацювання ЕМР

При провалі напруги тривалістю 49 мс (рис. 4 а) реле спрацює через 25 мс після початку провалу (точка POI). Напруга живлення навантаження знижується до 0 В, і після відновлення напруги (точка POR) реле продовжує свою роботу.

Провал напруги тривалістю 49 мс може бути серйознішим інцидентом, який може виникнути через більші перевантаження або навіть коротке замикання. Результати цього тесту показують, що чим довша тривалість провалу, тим більша ймовірність відключення ЕМР.

Чутливість електромагнітного реле до змін частоти, наявності гармонічних спотворень та коливань номінальної напруги є ключовими для його ефективної роботи в електричних системах. Частотні зміни можуть виникати через різні причини, такі як некоректна синхронізація джерел живлення або помилки в роботі генераторів. Чутливість ЕМР до таких змін полягає в здатності своєчасно реагувати на частотні коливання, забезпечуючи надійне включення або вимкнення електричного кола.

Зміни номінальної напруги можуть бути спричинені флуктуаціями в електричних мережах або перенапругами. Чутливість ЕМР до таких змін полягає в здатності адаптуватися до навантаження і витримувати відповідні зміни напруги, забезпечуючи стабільну роботу електричних систем. Тестування стійкості ЕМР проводилося за наявності прямокутних провалів [6].

Було проведено тестування стійкості ЕМР до провалів зі зміною частоти на  $\pm 2\%$ . Частотні провали розглядалися при значеннях 49, 50 і 51 Гц. Зміна частоти на  $\pm 2\%$  від номінальної не впливає на чутливість тестованих ЕМР, оскільки їхні характеристики були майже ідентичні при всіх трьох частотах. Так як криві допустимих відхилень напруги для POW із фазовим кутом 0, 180 та 360<sup>0</sup> близькі між собою, а для 90 та 270<sup>0</sup> майже однакові, чутливість ЕМР показана на рис. 5 та 6 тільки для POW між 0 та 90<sup>0</sup>.

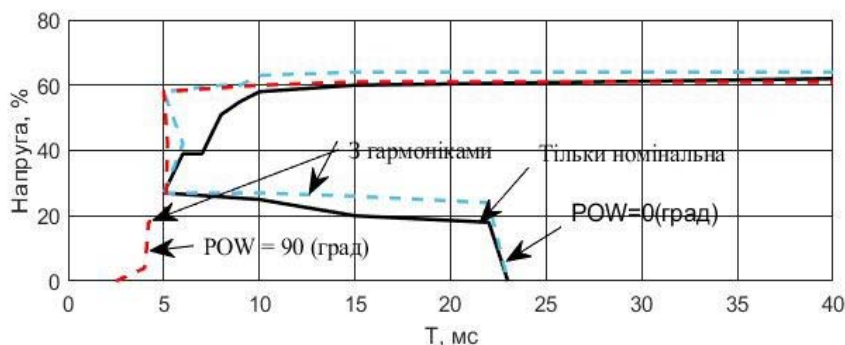
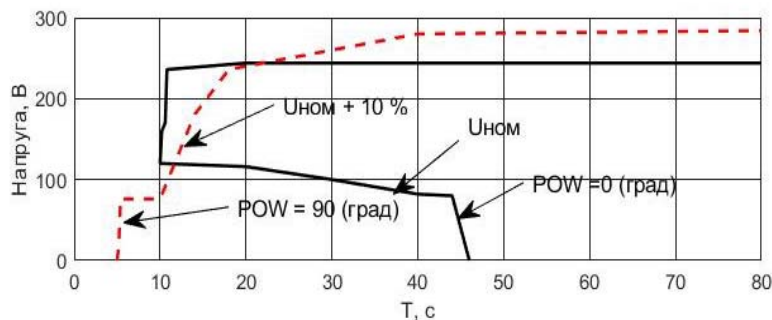


Рис. 5. Криві допустимих відхилень напруги за відсутності стрибка фазового кута та наявності гармонік

Результати тестування стійкості електромагнітного реле (ЕМР) за умов номінальної напруги та наявності спотворень вказують на його залежність від характеристик POW (POI, POR). Стійкість ЕМР незначно вища за наявності гармонік. Це означає, що ефективність роботи реле може змінюватися залежно від потужності сигналу, що надходить до нього.



Коли ми збільшуємо номінальну напругу на 10 %, стійкість ЕМР трохи збільшується і залежить від POW. Це свідчить про те, що при підвищенні напруги ефективність реле може варіюватися залежно від потужності сигналу, що подається (рис. 6).



**Рис. 6.** Криві допустимих відхилень напруги за підвищення напруги на 10 %

**Висновки.** У статті було проведено всебічне тестування електрообладнання на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги. Особливу увагу приділено впливу точки початку провалу на чутливість обладнання, а також стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибків фазового кута та моментів початку й закінчення провалів. Результати дослідження показали, що електромагнітні реле мають певну чутливість до зміни частоти, наявності гармонічних спотворень та змін номінального значення напруги. Також було досліджено вплив симетрії чверті циклу щодо точки на хвилі на роботу реле.

Встановлено, що реле демонструють стабільну роботу при номінальній напрузі, але їхня ефективність може змінюватися за наявності спотворень або підвищення напруги. Це підкреслює важливість урахування потужності сигналу при оцінці стійкості електромагнітного реле до різних електромагнітних впливів.

Дослідження підтверджує, що забезпечення надійної та безперебійної роботи електрообладнання в умовах провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги є критично важливим, особливо для об'єктів із високими вимогами до надійності, таких як медичні установи та виробничі підприємства. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методів захисту електрообладнання від електромагнітних впливів, що сприятиме підвищенню загальної стабільності та ефективності роботи електричних систем.

1. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги для обладнання з силою вхідного струму до 16 А на фазу.
2. IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V., IEEE STD 1668–2014, 2014. Pp. 1–92.
3. Волошко А.В., Шевчук В.В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик. Вісник ВПІ. Вип. 5. 2023. С. 12–17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>
4. Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Under-Voltage Transients. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004. 19. Pp. 1299–1307.
5. Bollen, M.H., 2000. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. 1st Edn., Wiley, New York, ISBN-10: 0780347137, 543 p.
6. Huaying Zhang, Qing Wang, Yihong You. Tolerance of Electromagnetic Relay to Voltage Sags and Short Interruptions. Frontiers in Energy Res. December 2021. Vol. 9. Article 766472. DOI: <https://orcid.org/10.3389/fenrg.2021.766472>

## TESTING OF ELECTRICAL EQUIPMENT FOR IMMUNITY TO VOLTAGE FAILURES, SHORT-TERM INTERRUPTIONS AND VOLTAGE CHANGES

A.V. Voloshko, V.V. Shevchuk

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
Beresteyskyi ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine

e-mail: [vchevchuk1603@gmail.com](mailto:vchevchuk1603@gmail.com), [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)

*The article examines the testing of electrical equipment for immunity to voltage dips, short-term interruptions, and voltage changes. Special attention is paid to the influence of the starting point of the dip on the sensitivity of electrical equipment, as well as to the study of the resistance of the electromagnetic relay to voltage dips, phase angle jumps, and the starting and ending points of dips. The reaction mechanism of the electromagnetic relay to a voltage drop, its sensitivity to a change in frequency, the presence of harmonic distortions and changes in the nominal value of the voltage are analyzed. The symmetry of a quarter cycle with respect to a point on the wave is considered separately. Ref. 6, fig. 6.*

**Key words:** voltage dips, short-term voltage interruptions, voltage changes, electrical equipment, sensitivity of electrical equipment, electromagnetic relay, phase angle jump, voltage frequency, harmonic distortion, quarter-cycle symmetry.

1. DSTU EN IEC 61000-4-11:2022 Electromagnetic compatibility. Part 4-11. Test and measurement methods. Testing for immunity to voltage dips, short-term interruptions and voltage changes for equipment with an input current of up to 16 A per phase.
2. IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V., IEEE STD 1668–2014, 2014. Pp. 1–92.
3. Voloshko A.V., Shevchuk V.V. Voltage dips in electrical networks and determination of their characteristics. Visnyk VPI, Vol. 5. 2023. Pp. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>
4. Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Under-Voltage Transients. IEEE Transaction on Power Delivery. 2004. 19. Pp. 1299–1307.
5. Bollen, M.H., 2000. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. 1st Edn., Wiley, New York, ISBN-10: 0780347137, 543 p.
6. Huaying Zhang, Qing Wang, Yihong You. Tolerance of Electromagnetic Relay to Voltage Sags and Short Interruptions. Frontiers in Energy Res. December 2021. Vol. 9. Article 766472. DOI: <https://orcid.org/10.3389/fenrg.2021.766472>

Надійшла: 03.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 03.08.2024

Accepted: 27.08.2024