

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІНКЕВИЧ ТАРАС ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.316.93-049.6

**НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ
ФАКТОРІВ**

05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Т.В. Бінкевич

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Журахівський Анатолій Валентинович, д.т.н., професор

Ідентичність усіх примірників дисертації ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 35.052.02

Коруд В.І.

Львів – 2018 р.

АНОТАЦІЯ

Бінкевич Т. В. Надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання з врахуванням впливу випадкових факторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи». – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання з врахуванням впливу випадкових факторів, що має важливе значення для підвищення надійності функціонування електричних систем.

Проведено аналіз нових та існуючих зарубіжних і вітчизняних систем засобів грозозахисту повітряних ліній електропересилання у сучасних мережах 6-750 кВ. Розглянуто відомі конструкції, технічні характеристики та особливості роботи пристроїв грозозахисту.

Розглянуто відомі публікації з результатами досліджень щодо врахування впливу випадкових факторів під час розрахунку надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність врахування впливу випадкових факторів і розробки математичної та цифрової моделей розрахунку надійності грозозахисту з врахуванням впливу випадкових факторів.

Запропоновано розраховувати ймовірність грозового ураження повітряної лінії електропересилання, враховуючи сукупність поєднань випадкових факторів, що дозволить адекватніше оцінити надійність грозозахисту та підвищити його ефективність. Визначено закони розподілу випадкових факторів та способи їх врахування під час розрахунку надійності грозозахисту.

Розроблено спосіб визначення області небезпечних параметрів струму блискавки, з урахуванням сукупності випадкових факторів, які впливають на надійність грозозахисту.

Розроблено математичну модель розрахунку надійності грозозахисту, в якій враховано розширену сукупність випадкових факторів, що визначають грозостійкість повітряних ліній електропередачі, а розроблені принципи розрахунку забезпечують адекватність отриманих результатів відповідним природнім процесам. Отримано з застосуванням чисельного інтегрування вираз для розрахунку ймовірності перекриття ізоляції, з врахуванням впливу випадкових факторів.

Розроблено ефективний цифровий комплекс для розрахунку та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів.

Запропонованим цифровим комплексом розраховано надійність грозозахисту повітряних ліній електропередачі Західного регіону України класу напруг 110-330 кВ. На прикладі лінії 220 кВ виконано розрахунки надійності грозозахисту з урахуванням впливу випадкових факторів за застосування різних засобів грозозахисту. За результатами розрахунків визначено найефективніші поєднання цих засобів.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі, надійність грозозахисту, випадковий фактор, ймовірність імпульсного розряду, крива небезпечних параметрів, число грозових відключень, перенапруга, система захисту.

ABSTRACT

Binkevych T.V. Reliability of lightning protection systems of overhead transmission lines taking into account the influence of random factors. – Qualification scientific thesis on the rights for a manuscript.

Thesis for a candidate degree in Technical Science, specialty 05.14.02 – «Power stations, networks and systems». – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to the solution of the scientific and technical problem of assessing the reliability of lightning protection systems for overhead transmission lines, taking into account the influence of random factors, it is of great importance for improving the reliability of electrical systems.

It was made the analysis of new and existing foreign and native systems and means of lightning protection of overhead transmission lines in modern networks of 6-750 kV. It was considered the known designs, technical characteristics and features of the operation of lightning protection devices.

It was tested well-known publications based on the results of studies on the consideration of the influence of random factors in calculating the reliability of lightning protection of overhead transmission lines. The number of these publications was insignificant and the conducted analysis was confirmed the expediency of taking into account the influence of random factors and the development of a mathematical and numerical model for calculating the reliability of lightning protection, taking into account the influence of random factors.

It is proposed to calculate the probability of lightning strike of an overhead power transmission line, taking into account a combination of random factors that would allow to adequately assess the reliability of lightning protection and increase its efficiency. The laws of distribution of random factors and ways to take them into account when calculating the reliability of lightning protection were determined.

A method for determining the area of dangerous parameters of lightning current has been developed, taking into account a set of random factors affecting the reliability of lightning protection.

A mathematical model was proposed for calculating the reliability of lightning protection, which it was taken into account all the expended random factors that determine the frightfulness of overhead transmission lines, and the developed calculation principles ensure that the results obtained were adequate to the corresponding natural processes. We obtained the use of numerical integration, an expression for calculating the probability of a pulsed discharge into an object, taking into account the influence of random factors.

An effective digital complex was prepared for calculating and evaluating the reliability of lightning protection systems for overhead transmission lines, taking into account the influence of random factors.

The proposed digital complex was designed to provide reliable lightning protection for overhead power transmission lines in the Western region of Ukraine with a voltage class of 110-330 kV. On the example of the 220 kV line, the calculations of the reliability of lightning protection were performed taking into account the influence of random factors on the use of various lightning protection means. Basing on the results of calculations, the most effective combinations of lightning protection devices were determined.

Keywords: overhead transmission line, lightning protection reliability, random factor, impulse discharge probability, curve of dangerous parameters, number of lightning trips, overvoltage, protection system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у наукових періодичних виданнях України, що включено до наукометричних баз даних:

1. Zhurakhivskyi A. V. Models of probabilistic evaluation of intensity of disconnection of overhead transmission lines caused by a lightning discharge / A. V. Zhurakhivskyi, **T. V. Binkevych** // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2018. - № 2. - С. 80–86

Публікації у наукових фахових виданнях України:

2. Ліщак І. В. Сучасний грозозахист розподільчих повітряних ліній 6, 10 кВ довго-іскровими розрядниками (РДІ) / І. В. Ліщак, **Т. В. Бінкевич** // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. - С. 75-80.

3. Ліщак І. В. Оцінка надійності схем грозозахисту повітряних ліній електропересилання / І. В. Ліщак, **Т. В. Бінкевич** // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – 785 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 39-45.

4. Журахівський А. В. Імпульсний опір заземлення опор повітряних ліній та його вплив на надійність грозозахисту / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, **Т. В. Бінкевич** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016. - № 1. - С. 74-78.

5. Журахівський А. В. Дослідження впливу миттєвого значення робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, **Т. В. Бінкевич** // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Техніка та електрофізика високих напруг – Харків, 2016. – № 36 (1208). – С. 23-27.

6. Журахівський А. В. Дослідження впливу метеорологічних умов на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання / А. В. Журахівський, **Т. В. Бінкевич**, І. В. Ліщак // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Техніка та електрофізика високих напруг. - 2017. - № 15. - С. 39-43.

7. **Binkevych T.** Means of lightning protection of overhead power transmission lines with isolated neutral / **Taras Binkevych** // Computational Problems of Electrical Engineering. — Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2017. — Vol 7. — No 1. — P. 11–16.

8. А. Журахівський, Підвищення надійності та ефективності грозозахисту повітряних ліній електропередавання шляхом зниження опорів заземлювальних пристроїв / А. Журахівський, **Т. Бінкевич** // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2018. - № 1, с. 59-65.

Матеріали міжнародних конференцій:

9. Журахівський А.В. Імпульсний опір заземлення опор ПЛЕП та його вплив на надійність грозозахисту/ Журахівський А.В., Ліщак І.В., **Бінкевич Т.В.**// Збірник матеріалів III міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками 2015». – Вінниця: Видавництво Вінницького політехнічного інституту, 2015. – С. 24

10. **Бінкевич Т.В.** Дослідження впливу робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній / **Бінкевич Т.В.**// Збірник матеріалів IV Всеукраїнської науково – технічної конференції Практичні аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту «ПАСЕБ – 2016». – Харків: Видавництво ХПІ, 2016. - С.19

11. **Binkevych T.** Probabilistic evaluation of lightning-protection in overhead transmission lines [Електронний ресурс] / **Binkevych T** // VI Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 191–192. – Назва з екрану.

12. Журахівський А.В. Підвищення надійності та ефективності грозозахисту повітряних ліній електропередавання шляхом зниження опорів заземлювальних пристроїв / Журахівський А.В., **Бінкевич Т.В.**// Збірник матеріалів IV міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками 2017». – Вінниця: Видавництво Вінницького політехнічного інституту, 2017.

13. **Binkevych T.** Means and devices of lightning protection of overhead transmission lines of voltage class 110 - 750 kV [Електронний ресурс] / **Binkevych T** // VII Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів :

Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 166–167. – Назва з екрану.

14. **Бінкевич Т.В.** Вплив конструктивних параметрів повітряних ліній електропередавання на показники надійності грозозахисту / **Бінкевич Т.В.** //International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference proceedings, December, 2017, Radom: Izdevnieciba «Baltija Publishing», p. 59-62

15. Журахівський, А.В. Дослідження впливу стану ізоляції на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання [Текст] / Журахівський А.В., **Бінкевич Т.В.** // Международная научная конференция MicroCAD : Секція №22 - Електромагнітна стійкість - НТУ "ХПИ", 2018, С. 219

Тези:

16. Ліщак І. В. Фізичні процеси при пробі повітряної ізоляції / І. В. Ліщак, **Т. В. Бінкевич** // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. - 2012. - Т. 14, № 3(3). - С. 308- 318.

17. Ліщак І. В. Дослідження надійності грозозахисту підстанцій / І. В. Ліщак, **Т.В. Бінкевич** // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. - 2012. - Т. 14, № 2(3). - С. 235-244.

18. Ліщак І. В. Доцільність діагностики ОПН в процесі експлуатації / І. В. Ліщак, **Т.В. Бінкевич** // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. - 2013. - Т. 15, № 1(3). - С. 81-89.

19. **Бінкевич Т. В.** Вибір моделі опори повітряної лінії електропередавання напругою 35-220 кВ при аналізі грозових перенапруг / **Т. В. Бінкевич** // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького. - 2014. - Т. 16, № 2(4). - С. 3-11.

ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних скорочень	13
Вступ	14
Розділ 1. Аналіз сучасних систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання.....	20
1.1. Характеристика розряду блискавки як джерела грозових перенапруг.....	20
1.1.1. Статистичні характеристики, ймовірнісні показники та параметри основних амплітудно – часових характеристик розряду блискавки.....	20
1.1.2. Нормовані значення розрахункових форм хвилі імпульсної напруги блискавки	27
1.1.3. Інтенсивність грозових уражень ліній електропересилання.....	29
1.2. Моделі та засоби грозозахисту ліній електропересилання класів напруг 6 – 35 кВ	30
1.2.1. Загальні положення	30
1.2.2. Американська система грозозахисту.....	32
1.2.3. Фінська система грозозахисту.....	33
1.2.4. Японська система грозозахисту.....	34
1.2.5. Грозозахист ліній довго – іскровими розрядниками.....	36
1.2.6. Грозозахист мультикамерними розрядниками	38
1.3. Засоби та пристрої грозозахисту ліній електропересилання класів напруг 110 – 750 кВ.....	41
1.3.1. Захисні троси (линви).....	41
1.3.2. Зменшення опорів заземлення опор.....	44
1.3.3. Підвищення імпульсної міцності лінійної ізоляції.....	48
1.3.4. Захист окремих опор і ділянок з ослабленою ізоляцією.....	49
1.3.5. Обмежувачі перенапруг.....	51
1.3.6. Визначення оптимального кута захисту.....	52
1.3.7. Використання АПВ, як методу грозозахисту ліній електропересилання.....	53

	10
1.4. Висновки до розділу 1	53
Розділ 2. Основи методики чисельного визначення надійності грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів	55
2.1. Загальні положення	55
2.2. Особливості визначення області небезпечних параметрів	56
2.3. Характеристики випадкових факторів, що впливають на ступінь грозостійкості об'єктів системи.....	65
2.3.1. Параметри хвилі струму блискавки	65
2.3.2. Миттєве значення робочої напруги в момент удару	68
2.3.3. Імпульсний опір заземлення.....	75
2.3.4. Відстань від місця удару блискавки в землю до осі ліній.....	80
2.3.5. Метеорологічні умови.....	81
2.3.6 Стан ізоляції.....	89
2.3.7 Перерахунок вольт – секундних характеристик.....	92
2.4. Висновки до розділу 2	99
Розділ 3. Цифровий комплекс для розрахунку та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів.....	101
3.1. Моделі ймовірнісної оцінки інтенсивності вимкнень повітряних ліній електропередачі, спричинених розрядами блискавки.....	101
3.2. Показники грозостійкості повітряних ліній електропередачі	106
3.2.1. Вплив конструктивних параметрів ЛЕП на показники її грозостійкості	107
3.2.2. Вплив природо-кліматичних умов і особливостей траси на показники надійності грозозахисту ЛЕП	109
3.3. Математична модель для аналізу та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів.....	110

3.3.1. Розрахунки параметрів блискавки та уражуваності лінії залежно від географічного розташування ЛЕП.....	111
3.3.2. Розрахунки параметрів ЛЕП.....	114
3.3.3. Розрахунки складових перенапруг на ізоляції ЛЕП.....	118
3.3.4. Розрахунки кривих небезпечних параметрів та показників надійності грозозахисту ЛЕП.....	122
3.4. Цифровий комплекс для розрахунків та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання з врахуванням впливу випадкових факторів.....	125
3.4.1 Загальна характеристика цифрового комплексу	125
3.4.2. Опис цифрового комплексу.....	126
3.5. Висновки до розділу 3	135
Розділ 4. Розрахунки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання з врахуванням впливу випадкових факторів та рекомендації для підвищення їх ефективності	136
4.1. Розрахунки надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання 110 – 330 кВ	136
4.1.1 Розрахунки надійності грозозахисту повітряної лінії електропересилання 110 кВ Л 2- ЛТЕЦ 1.....	137
4.1.2. Розрахунки надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання 220 кВ	140
4.1.2.1 Лінія 220 кВ Стрий – Борислав.....	140
4.1.2.2 Лінія 220 кВ Стрий – Львів південна	144
4.1.2.3 Лінія 220 кВ Стрий – Мукачево.....	144
4.1.2.4 Лінія 220 кВ Стрий – БуТЕС.....	144
4.1.3 Розрахунки надійності грозозахисту повітряної лінії електропересилання 330 кВ РАЕС – Ковель	145
4.2. Парето оптимальні засоби та пристрої грозозахисту для підвищення надійності грозозахисту ЛЕП	149

4.3. Рекомендації для підвищення надійності та ефективності систем грозозахисту ЛЕП	152
4.4. Висновки до розділу 4	156
Загальні висновки	158
Список використаних джерел	160
ДОДАТКИ	176
Додаток А Вимірювання приладом MRU-105 опору заземлювальних пристроїв опор ЛЕП та питомого опору ґрунту.....	177
Додаток Б Розрахункові графіки кривих небезпечних параметрів за удару блискавки в ЛЕП 110 – 330 кВ.....	184
Додаток В Порівняння результатів розрахунків надійності грозозахисту отриманих за методикою [11,12] та за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»	195
Додаток Г	201
Г. 1 Результати розрахунку надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – Львів південна.....	201
Г. 2 Результати розрахунку надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – Мукачево.....	205
Г. 3 Результати розрахунку надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – БуТЕС.....	209
Додаток Д Діагностика елементів ЛЕП, які впливають на надійність грозозахисту.....	213
Додаток Е Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	217

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПВ	автоматичне повторне ввімкнення
ВСХ	вольт-секундна характеристика
ЕЕС	електроенергетична система
ЗА	захисний апарат
ЗП	заземлювальний пристрій
ІП	іскровий проміжок
ІРМК	ізолятор – розрядник з мультикамерною системою
КЗ	коротке замикання
КНП	крива небезпечних параметрів
ЛЕП	повітряна лінія електропередавання
ОПН	обмежувач перенапруг нелінійний
ПЗП	пристрій захисту від імпульсної перенапруги
ПЛЗ	провід із захисним покриттям
ПУБ	прямий удар блискавки
РДІ	довго – іскровий розрядник
РМК	розрядник мультикамерного типу

ВСТУП

Ефективність функціонування електроенергетичних систем залежить від багатьох факторів, в тому числі від грозозахисту їх об'єктів, в першу чергу ліній електропередавання та підстанцій. Лінії електропередавання є досить важливими об'єктами енергосистем, оскільки ними відбувається передавання електричної енергії споживачам. Тому вони повинні бути надійно захищеними від впливу зовнішніх факторів, в тому числі від атмосферних перенапруг.

Внаслідок електромагнітної індукції близький удар блискавки створює також індуквану перенапругу, котра зазвичай призводить до деякого збільшення напруги на ізоляції. Удари блискавки, як правило, відбуваються за дії робочої напруги лінії, що призводить до коротких замикань та вимкнення пошкодженої лінії електропередавання. Від місця удару блискавки вздовж лінії зі швидкістю світла з малим спотворенням і загасанням розповсюджуються електромагнітні хвилі. Дійшовши до підстанції, ці хвилі можуть викликати небезпечні перенапруги на ізоляції її обладнання.

Для об'єднаних енергетичних систем несанкціоновані вимкнення, викликані ударами блискавки, є небезпечним явищем, оскільки можуть призвести до випадання цих систем із синхронізму з катастрофічними наслідками. Крім цього, атмосферні перенапруги, потрапляючи з повітряних ліній електропередавання на обладнання електричних станцій і розподільних підстанцій, викликають руйнування (пробої) ізоляції електричних апаратів, трансформаторів, вимикачів тощо, аж до виходу з ладу автоматизованих систем управління технологічними процесами

Надійність грозозахисту повітряних ліній електропередавання та підстанцій тим вища, чим менша кількість аварійних відключень через грози за певний період часу. Інтенсивність грозових пошкоджень залежить від частоти грозових впливів і здатності об'єкта протистояти кожному удару блискавки.

Наявні засоби грозозахисту, як правило, забезпечують певну грозостійкість об'єктів. Але проблема розробки нових пристроїв та схем захисту, аналізу та удосконалення існуючих залишається актуальною.

У наявних джерелах аналізу впливу випадкових факторів на надійність систем грозозахисту, на наш погляд, приділено недостатньо уваги. Провівши аналіз існуючих моделей ймовірнісної оцінки інтенсивності відмов апаратів ЕЕС, необхідно зазначити, що істотним недоліком існуючих моделей є те, що вони можуть враховувати лише обмежену кількість випадкових факторів, що визначають грозостійкість об'єктів, а це негативно впливає на достовірності показників надійності та ускладнює оптимізацію схем грозозахисту.

Актуальність теми. Як показав аналіз методів і засобів існуючих систем грозозахисту істотним недоліком є врахування лише обмеженої (недостатньої) кількості випадкових факторів, що визначають грозостійкість об'єктів, тому проблему, досліджену в кваліфікаційній роботі, слід вважати актуальною.

Запропоновані методика та цифровий комплекс для розрахунків й оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів дають змогу розробити рекомендації щодо підвищення надійності та ефективності систем грозозахисту, що в свою чергу зменшить збитки від пошкоджень об'єктів електроенергетики та недовідпуску електричної енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку «Моделювання, аналіз, синтез і оптимізація електроенергетичних й енергозабезпечувальних систем та інтелектуалізація управління ними» кафедри електроенергетики та систем управління (колишнє найменування кафедри «Електричні системи та мережі) Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Аналіз перенапруг в електричних мережах та режими роботи вимірних трансформаторів струму й напруги в цих умовах» (№ держреєстрації 0115 U 004699, 2015 – 2018 р.р.), а також госпдоговірної роботи № 738 для ПрАТ «Львівобленерго» «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації» (2017 – 2018 р.р.). Окремі результати роботи використовують під час викладання таких дисциплін: «Основи надійності електричних мереж і систем»; «Перенапруги та координація ізоляції в електричних мережах».

Автор брав участь у виконанні цих робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проведення аналізу випадкових факторів, які впливають на ефективність систем грозозахисту та розрахунки їх надійності з врахуванням впливу випадкових факторів.

Виконання поставленого завдання передбачає розв'язання наступних задач:

1. Аналіз і систематизація сучасних та існуючих методів і засобів грозозахисту повітряних ліній електропередачі.

2. Визначення способів врахування випадкових факторів та уточнення їх законів розподілу для розрахунків надійності грозозахисту.

3. Розроблення методу визначення області небезпечних параметрів, з врахуванням сукупності випадкових факторів.

4. Розроблення математичної моделі для розрахунків надійності грозозахисту, в якій враховано випадкові фактори, які визначають грозостійкість повітряних ліній електропередачі.

5. Розроблення цифрового комплексу для розрахунків та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів.

Об'єктом дослідження є процеси в електричних мережах за дії в них атмосферних перенапруг.

Предметом дослідження є надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі різних класів напруг.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи аналітичної та статистичної обробки даних, математичного моделювання, теорії ймовірності, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням методів комп'ютерного симулювання, методи об'єктно – орієнтованого програмування та дослідження процесів у діючих електроустановках.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Обґрунтовано необхідність врахування розширеної сукупності випадкових факторів в розрахунках надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання, що дасть змогу адекватніше оцінити грозостійкість повітряної лінії електропередавання.

2. На основі статистичного аналізу випадків перекриття ізоляції окремих фаз повітряних ліній електропередавання під час удару блискавки в ЛЕП обґрунтовано та розроблено математичну модель оцінки впливу миттєвого значення робочої напруги на ймовірність виникнення небезпечних перенапруг.

3. Розроблено математичну модель для визначення області небезпечних параметрів з урахуванням розширеної сукупності випадкових факторів, що дає змогу окреслити небезпечні для ізоляції лінії поєднання параметрів імпульсу струму блискавки.

4. Запропоновано математичну модель для оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання, з урахуванням розширеної сукупності випадкових факторів, що дає змогу проводити аналіз існуючих систем грозозахисту та розробляти рекомендації щодо їх вдосконалення.

Практичне значення отриманих результатів

1. Практичне значення результатів роботи полягає у використанні розроблених математичних моделей та цифрового комплексу під час оцінки надійності та діагностиці систем грозозахисту ЛЕП.

2. Створений та реалізований новий цифровий комплекс для розрахунку та оцінки надійності систем грозозахисту ЛЕП з урахуванням впливу випадкових факторів, дасть змогу якісно та ефективно проводити розрахунки та розробляти конкретні рекомендації щодо підвищення надійності та ефективності діючих і проєктованих систем грозозахисту, що в свою чергу зменшить збитки від пошкоджень об'єктів електроенергетики та недовідпуску електричної енергії.

3. Запропоновано використовувати спеціальні хімічні домішки з гелеутворюючими добавками, як метод нетрадиційного зменшення опору заземлення.

4. Сформовано ефективні комбінації поєднань засобів грозозахисту, а саме: поєднання заземлювального пристрою, збільшення довжини гірлянди ізоляторів та встановлення обмежувачів перенапруг тощо.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що є в дисертації, отримані здобувачем самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автору належать: [1,3,11] – проведення аналізу існуючих математичних моделей оцінки надійності грозозахисту повітряних ліній електропересялення та презентація розробленої математичної моделі, яка враховує випадкові фактори, що впливають на грозостійкість повітряної лінії електропересялення; [2,7] – проведення аналізу існуючих методів та засобів грозозахисту повітряних ліній електропересялення з ізольованими проводами; [4-6,8-10,12] – дослідження впливу того чи іншого випадкового фактору на надійність грозозахисту та запропоновано способи їх врахування під час розрахунку надійності грозозахисту повітряних ліній; [13] - проведення аналізу існуючих методів та засобів грозозахисту повітряних ліній електропересялення класів напруги 110-750 кВ; [14] - дослідження впливу конструктивних параметрів повітряної лінії електропересялення на показники надійності грозозахисту; [15] - дослідження впливу стану ізоляції на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропересялення.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на VI і VII Міжнародних молодіжних наукових форумах “Litteris et Artibus”: конференції ERECS-2016, 2017 (м. Львів, 2016 р., 2017 р.); 70-й, 71-й, 72-й, 73-й студентських науково-технічних конференціях (м. Львів, 2012 р., 2013 р., 2014 р., 2015р.); X, XI Всеукраїнському конкурсі "Молодь-енергетиці України : відкритий конкурс молодих енергетиків та вчених "(м. Київ, 2012 р., 2013 р.); Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» (м. Маріуполь, 2013 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015)» (м. Вінниця, 2015 р.); IV Всеукраїнській науково – технічній конференції Практичні аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту «ПАСЕБ – 2016» (м. Харків, 2016 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2017»

(м. Вінниця, 2017 р.); International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, 2017); XXVI міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (MicroCAD-2018) (Харків, 2018).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 19 наукових робіт, з них 7 статей у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у науковому періодичному виданні, що входить до наукометричних баз даних; 4 тез доповідей у збірниках наукових конференцій; 7 матеріали міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 218 сторінок, із них: 102 рисунків по тексту, 15 таблиць, 6 додатків на 45 сторінках, 139 назв використаної літератури на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

1.1 Характеристика розряду блискавки як джерела грозових перенапруг

1.1.1 Статистичні характеристики, ймовірнісні показники та параметри основних амплітудно – часових характеристик розряду блискавки

Як відомо, грозова хмара є носієм електричних зарядів, зосереджених на водяних краплях. Їх рух і розподіл в хмарі залежать не тільки від сил електростатичної взаємодії, але також від ваги крапель, швидкості та напрямку повітряних потоків. Внаслідок спільної дії цих сил в хмарі можуть довго існувати зони позитивної та негативної полярностей з різною густиною зарядів. Нерівномірність розподілу зарядів призводить до виникнення сильного електричного поля всередині хмари між зонами різної полярності і між хмарою та землею. Умови для виникнення блискавки створюються тоді, коли в якому-небудь місці хмари напруженість електричного поля перевищить електричну міцність повітря [1,55].

Розряд блискавки проростає у вигляді лідера, спрямованого в основному силовими лініями електричного поля. Як показують результати експериментальних досліджень, розряди блискавки в землю з імовірністю 0,9 виникають з негативною відносно до землі зони хмари (такі розряди прийнято називати негативними) [34,35,48,55].

Час проростання лідера від хмари до поверхні землі становить кілька мілісекунд. Як показують фотографічні спостереження (фоторозгортки), лідер проростає нерівномірно, а саме стрибками або ступенями. Середня швидкість проростання лідера оцінюється значеннями, близькими до 0,0005 швидкості світла [51].

По мірі того, як негативно заряджений канал лідера наближається до поверхні землі, напруженість електричного поля між ним і землею зростає. На землі та наземних об'єктах накопичуються заряди протилежної (позитивної) полярності,

індуковані зарядом лідера, і напруженість електричного поля на окремих точках поверхні землі, особливо на піднесених об'єктах, сягає критичного значення, при цьому на наземних об'єктах (опорах, тросах і проводах ЛЕП) виникають позитивні стримери, а потім розвивається і зустрічний лідер [47,53].

В заключній фазі розряду блискавки відбувається перекриття проміжку між вихідним і зустрічним лідерами.

Результати спостережень дають можливість встановити зв'язок між струмом блискавки і висотою орієнтування, яка змінюється від 200 і більше метрів - для ударів зі струмами понад 200 кА, і до 20-30 м - для ударів зі струмами 15-20 кА [49,50,52,54].

Спостережувані та реєстровані чисельні параметри блискавки носять імовірнісний характер і відтворюють їх переважно в табличному або графічному видах. У таблиці 1.1 наведені чисельні характеристики негативної блискавки, яка рухається по низхідній лінії [21].

Під час негативного удару блискавки слідом за головним розрядом звичайно спостерігаються повторні розряди за тим же каналом. Типова осцилограма багаторазового розряду зображена на рисунку 1.1 [1].

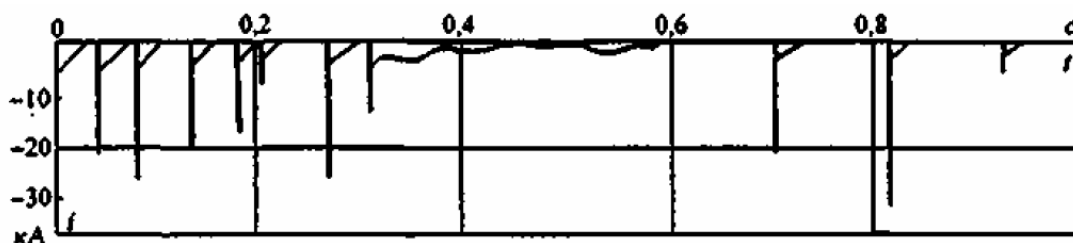


Рисунок 1.1 - Типова осцилограма струму багаторазового розряду блискавки негативної полярності (повільна розгортка)

В окремих випадках спостерігалось до тридцяти і більше повторних розрядів в одному ударі блискавки, однак 50% ударів містить не більше двох-трьох імпульсів. На рисунку 1.2 показано розподіл числа складових N_i в багаторазовому розряді.

Таблиця 1.1 - Чисельні значення параметрів негативної блискавки, яка рухається по низхідній лінії

Реєстрований параметр	Мінімальний	Характерний	Максимальний
Грозава хмара			
Потенціал, В	$3 \cdot 10^7$	10^8	10^9
Висота розташування над поверхнею землі центрів скупчення зарядів, км: нижніх позитивних/середніх негативних/верхніх позитивних	1,5/2/5	2/4/8	5/8/12
Відстань між центрами нижніх і верхніх позитивних зарядів, км	5	10	18
Ступінчастий лідер			
Довжина ступені, м	3	50	200
Інтервал часу між ступенями, мкс	30	50	120
Швидкість поширення, м / с	10^5	$1,5 \cdot 10^5$	10^6
Заряд, який переноситься, Кл	3	5	20
Стріловидний лідер			
Швидкість поширення, м / с	10^6	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$
Заряд, який переноситься, Кл	0,2	1	6
Головна стадія			
Швидкість поширення зворотного удару, м / с	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$
Швидкість наростання струму, кА / мкс	1	10	120
Час, що відповідає макс. знач. струму, мкс	0,1	2	20
Амплітуда струму, кА			
перший розряд /наступні розряди	5/2,5	30/15	200/100
Час розряду, мс	5	50	100
Час півспаду імпульсу струму, мкс	10	50	250
Довжина каналу блискавки, км	1,5	4,5	14
Діаметр каналу блискавки, см	0,1	5	12
Заряд, який переноситься, за винятком безперервного (супроводжуючого) струму, Кл	0,2	2,5	20
Питома провідність каналу, См / м	$4 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$
Хвильовий опір каналу, Ом	100	200	300
Спалах блискавки			
Число одиничних розрядів по одному каналу блискавки	1	3	26
Інтервал часу між поодинокими розрядами блискавки, мс	3	60	100
Тривалість спалаху, с	0,01	0,2	2

Загальна тривалість багаторазового розряду може досягати 1 с, як на рисунку 1.1, але такі затяжні удари є рідкісним явищем. Велика частина ударів має тривалість не більше 0,3 с [34].

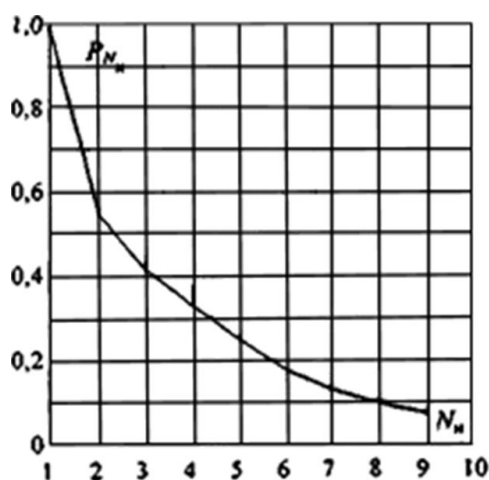


Рисунок 1.2 - Розподіл числа імпульсів в багаторазовому розряді блискавки (6000 реєстрацій)

Характерні осцилограми імпульсів струму першої (1) і наступних (2) складових багаторазового розряду показані на рисунку 1.3 в двох масштабах часу. Форма імпульсу першої складової має такі особливості: струм в початковій стадії наростає відносно повільно; фронт імпульсу має увігнуту форму; найбільша крутизна фронту спостерігається поблизу максимуму струму [1].

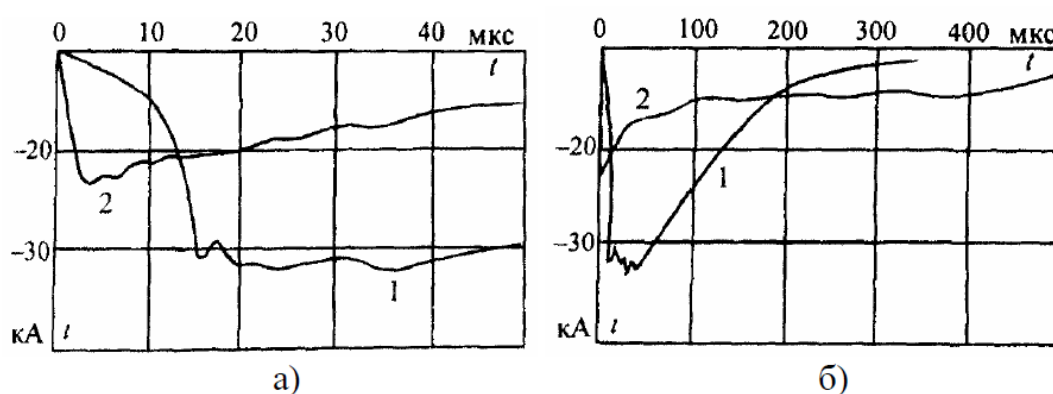


Рисунок 1.3 - Типові осцилограми імпульсу струму першої (1) і наступних (2) складових багаторазового розряду блискавки негативної полярності в різних масштабах часу (а, б)

Злами і коливання кривої струму поблизу максимуму пояснюються викривленнями каналу блискавки і наявністю в ньому розгалужень. Після нейтралізації каналу лідера в стадії головного розряду струм блискавки через уражений об'єкт протягом 100-200 мкс спадає до невеликого чи до нульового значення (рисунки 1.3, б, крива 1) [1].

Імпульс струму блискавки, що протікає через уражений об'єкт за повторних розрядів, відрізняється більш коротким фронтом і тривалістю та, як правило, меншою амплітудою за більшої крутизни струму на фронті. За формою він ближче до стандартного грозового імпульсу з параметрами 1,2 / 50 мкс (рисунки 1.4) [1,25,36].

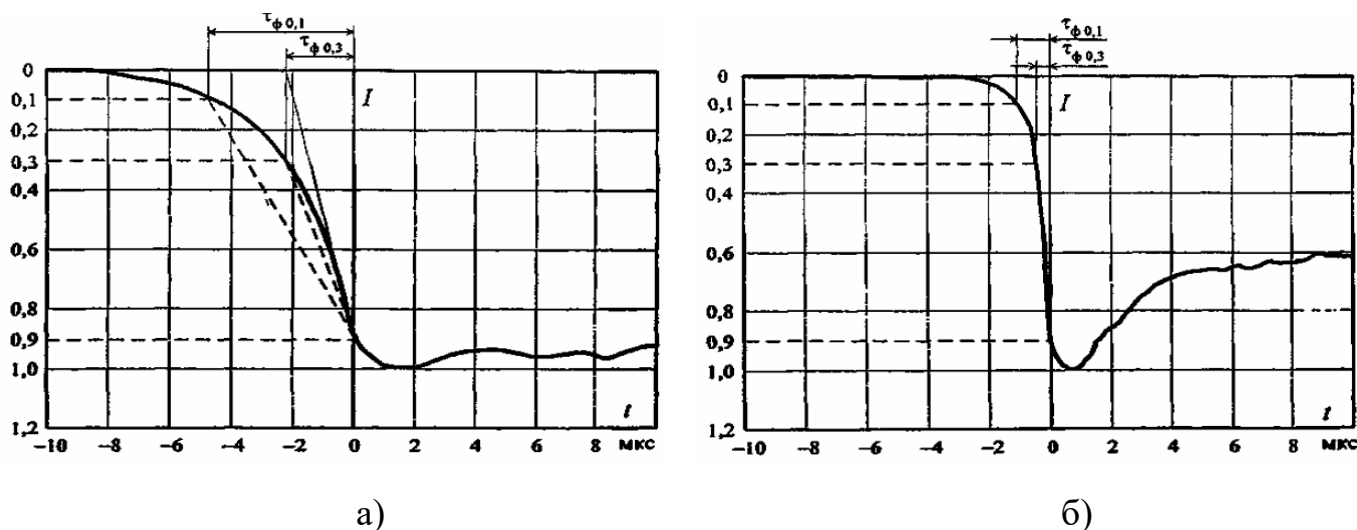


Рисунок 1.4 - Середньостатистична форма імпульсів багаторазового розряду блискавки: а) перший імпульс; б) подальші імпульси

В результаті обробки осцилограм багаторазового розряду блискавки, отримані статистичні розподіли, описані логарифмічним нормальним законом розподілу. Для амплітуди струму перших імпульсів наведені варіанти розподілів (рисунки 1.5), отримані за результатами польових досліджень в різних країнах [1,25].

Для розрахунку грозостійкості ЛЕП доцільніше використовувати розподіли струмів блискавки, отримані по реєстраціях на ЛЕП. Параметри логарифмічного нормального закону залежно від висоти опор $h_{оп}$ вибираються наступним чином [1]:

$$\text{для } h_{оп} \leq 20 \text{ м } I = 20 \text{ кА, } \sigma_{lgI} = 0,39,$$

для $h_{\text{оп}} > 20$ м $I = 20 + 0,32(h_{\text{оп}} - 20)$ кА, $\sigma_{\lg I} = 0,39 - 0,0028(h_{\text{оп}} - 20)$.

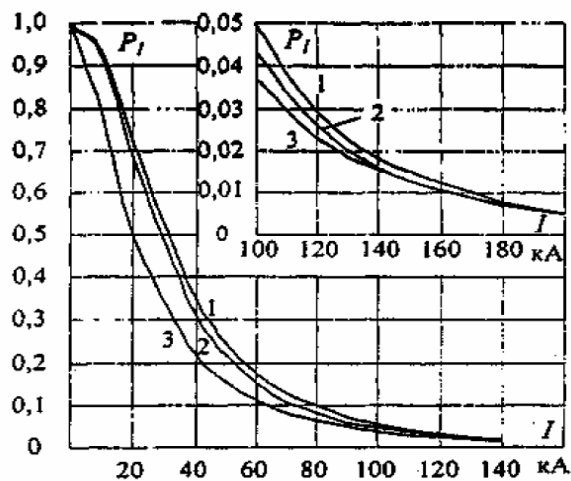


Рисунок 1.5 - Розподіл амплітуди струму перших імпульсів багаторазового розряду блискавки: 1 - узагальнений розподіл за результатами вимірів переважно на вежах (рекомендація Дослідницького комітету № 33 СІГРЕ); 2 - за вимірюваннями на ЛЕП ($h_{\text{оп}}$ до 45 м); 3 - за вимірюваннями на ЛЕП ($h_{\text{оп}}$ до 20 м).

Імовірність появи струмів блискавки з амплітудою, яка рівна або перевищує деяке значення I_M описується виразом [1]:

$$P(I_M) = \int_{\lg I_M}^{\infty} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp(-[\lg I_M - (\lg I_M)_{cp}]^2 / 2\sigma_a^2) d(\lg I_M), \quad (1.1)$$

де $(\lg I_M)_{cp}$ і $\sigma_a = \sigma_{\lg I}$ - відповідно середнє значення і стандартне відхилення логарифму струму блискавки. Для першого розряду $(\lg I_M)_{cp} = 1,48$ та $\sigma_a = 0,27$.

Імовірність крутизни струму окремих розрядів блискавки розподілена за аналогічним законом [1]:

$$P(a) = \int_{\lg a}^{\infty} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp(-[\lg a - (\lg a)_{cp}]^2 / 2\sigma_a^2) d(\lg a), \quad (1.2)$$

де $(\lg a)_{cp}$ - середнє значення логарифму крутизни струму блискавки; σ_a - стандартне відхилення логарифму крутизни. Для першого розряду $(\lg a)_{cp} = 1,1$ та $\sigma_a = 0,26$.

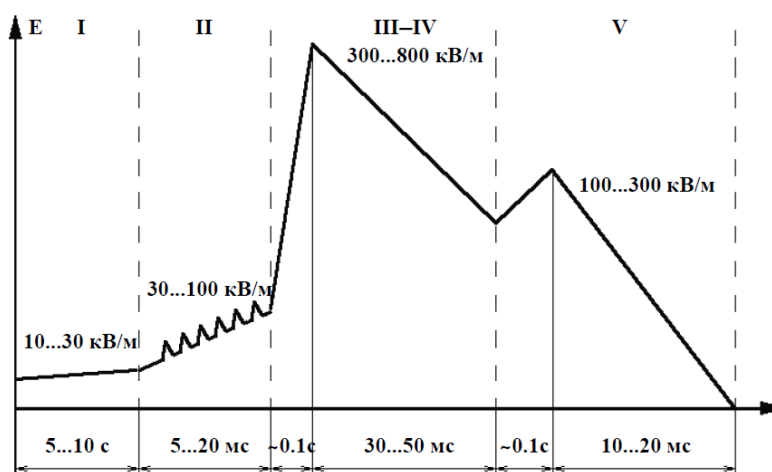
В практичних розрахунках використовують усереднені розподіли I_M та a [1]:

$$P(I_M) = \exp(-0.04I_M); \quad (1.3)$$

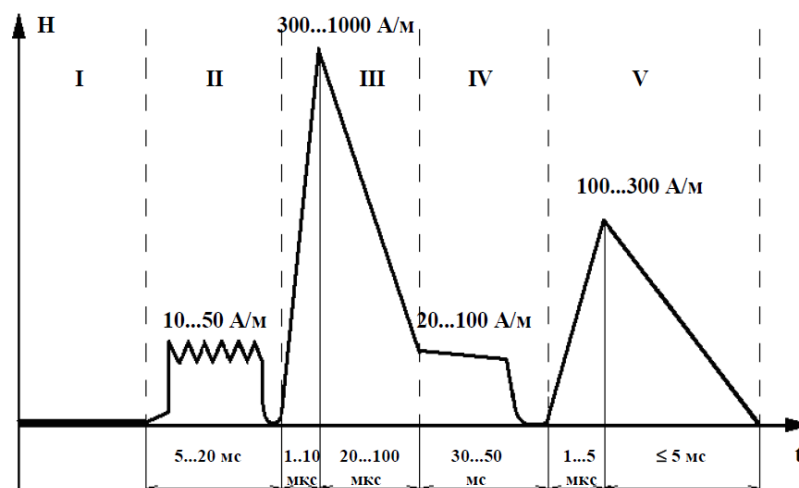
$$P(a) = \exp(-0.08 \cdot a), \quad (1.4)$$

де $P(I_M)$ і $P(a)$ - імовірності того, що амплітуда (або крутизна) за одного удару блискавки перевищить задане значення.

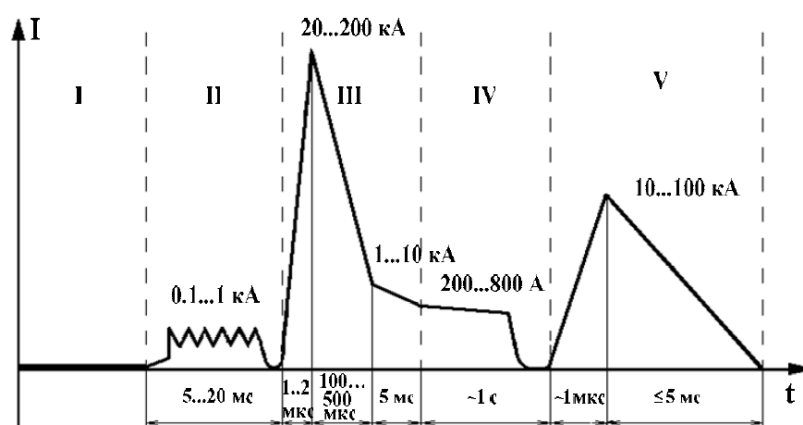
На рисунку 1.6 представлені якісні графічні залежності зміни в часі параметрів електромагнітного поля, яке формується розрядом блискавки «хмара-земля» негативної полярності в ближній зоні та базові значення їх усереднених амплітудних значень [21].



Напруженість електричного поля



Напруженість магнітного поля



Струм в каналі розряду блискавки

Рисунок 1.6 - Якісні графічні залежності зміни в часі основних параметрів електромагнітного поля, яке формується розрядом блискавки «хмара-земля» негативної полярності (I - передгрозовий період; II - лідерна стадія; III - головна стадія; IV - фінальна стадія; V - повторний розряд)

1.1.2 Нормовані значення розрахункових форм хвилі імпульсної напруги блискавки

Основний вид напруги, впливу якого піддаються об'єкти електроенергетичних систем в процесі їх прямого ураження блискавкою, має швидко наростаючу форму. Швидкість наростання цієї напруги залежить від процесів формування розряду

блискавки. Як показує аналіз процесів формування грозового розряду, ця швидкість відповідає величинам 102-104 кВ / мкс [1, 21].

На рисунку 1.7 наведені три форми імпульсної напруги, що застосовуються для грозових випробувань [21]. Сюди відноситься імпульс напруги (основна хвиля, (рисунок 1.7 а)), зрізаний на фронті, і той, який має швидкість наростання 103 кВ / мкс ($\pm 50\%$), що відповідає середнім значенням швидкостей наростання грозових перенапруг.

Другий імпульс випробувальної напруги (модельна хвиля (рисунок 1.7. б)) відрізняється від першої жорсткою прив'язкою по часу до виникнення перекриття проміжку між випробуваним об'єктом і високовольтним електродом моделювальної установки, яке має відбутися через 2 мкс ($\pm 50\%$).

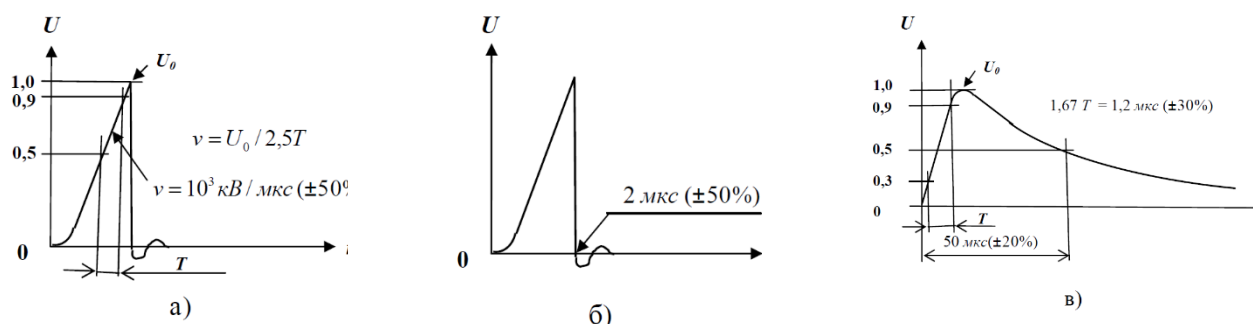


Рисунок 1.7 - Форми імпульсних напруг, що застосовуються для грозових випробувань а) - основна; б) - модельна; в) - повна.

Для випробувань імпульсної електричної міцності ізоляції застосовується імпульс напруги 1,2 / 50 мкс, форма якого наведена на рисунку 1.7 в. Така форма грозової перенапруги була визначена на основі численних досліджень і спостережень і рекомендована Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) в якості повної хвилі напруги для випробувань імпульсного пробою діелектричних елементів та ізоляційних конструкцій [1,25,36,138].

1.1.3 Інтенсивність грозових уражень ліній електропересилання

Інтенсивність грозової діяльності прийнято характеризувати числом грозових днів у році N_{gd} або середньою річною тривалістю гроз в годинах N_{g2} , що визначається за допомогою карти грозової діяльності (рисунок 1.8), по можливості з корегуванням за даними місцевих метеорологічних станцій [1,4].

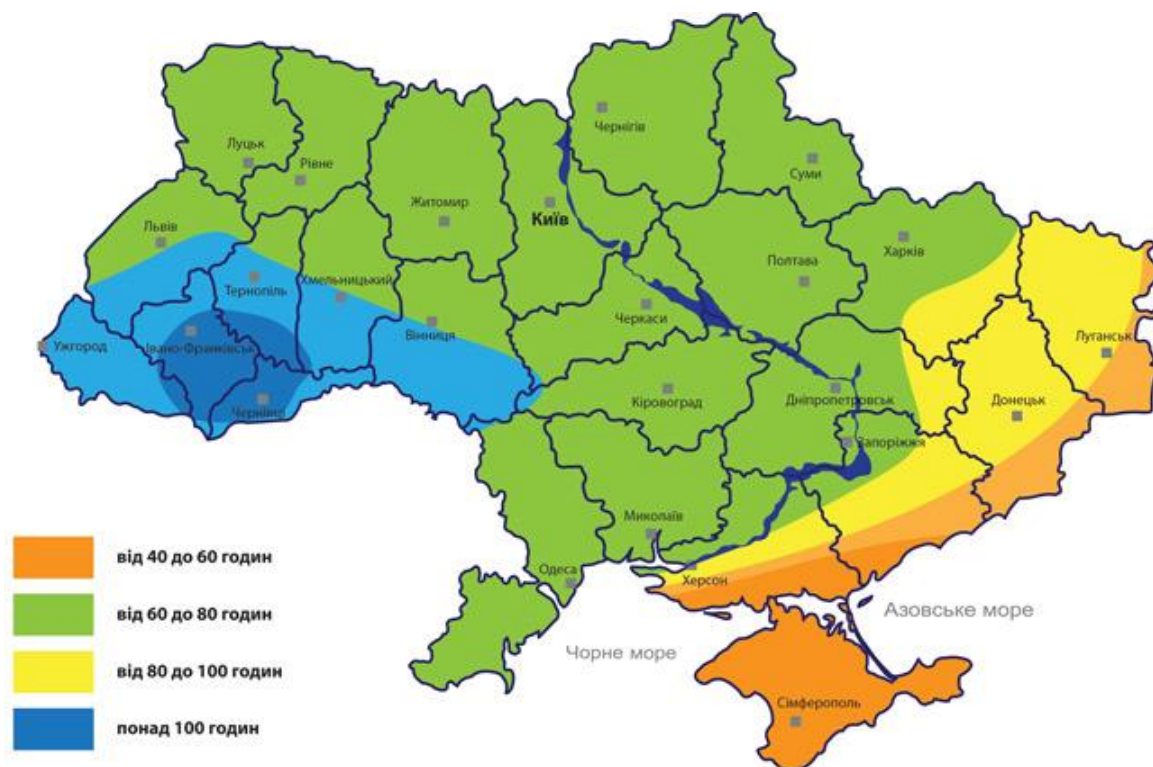


Рисунок 1.8 - Карта грозової діяльності для території України

Число ударів блискавки на 100 км повітряної лінії і 100 грозових годин розраховується за формулою [1]:

$$N = (4..6) \cdot h_{cp} \text{ для } h_{cp} < 40\text{м}, \quad (1.5)$$

де h_{cp} - середня висота кріплення тросу (чи верхнього проводу, за відсутності тросу), що визначається за формулами [1]:

$$h_{cp.tr} = h_{tr} - \frac{2}{3} f_{tr}, \quad (1.6)$$

$$h_{cp.np} = h_{npв} - \frac{2}{3} f_{np}, \quad (1.7)$$

де h_{np} - висота точки кріплення тросу на опорі, м;

$h_{npв}$ - висота точки кріплення верхнього проводу на опорі, м;

f_{np} і f_{np} - стріла провисання, відповідно, тросу і проводу в умовах

грозового сезону, м.

Для ліній з високими опорами ($h_{cp} > 40\text{м}$) можна застосувати формулу, що враховує більш швидке порівнянно з лінійною залежністю збільшення числа ударів блискавки зі зростанням висоти лінії h_{cp}

$$N \cong 5h_{cp} + \frac{1}{30} h_{cp}^2 + b, \quad (1.9)$$

де b – відстань між тросами або верхніми фазними проводами (за відсутності тросів), м.

Як видно з формул (1.5) і (1.9), удар блискавки в лінію електропередавання не можна розглядати як рідкісне явище. Наприклад, лінія 500 кВ з $h_{cp} = 20\text{м}$ і $b = 20\text{м}$ на місцевості, де спостерігається 30 грозових годин в рік, відбувається згідно формули (1.9) в середньому 40 ударів блискавки в рік на кожні 100 км довжини. Тому без спеціальних засобів з грозозахисту така лінія нормально працювати не зможе.

1.2 Моделі та засоби грозозахисту ліній електропередавання класу напруги 6 – 35 кВ

1.2.1 Загальні положення

Аварійні вимкнення ЛЕП 6 - 35 кВ через грозові перенапруги складають до 40% від загального числа їх вимкнень. Грозові впливи викликають пошкодження

ізоляторів, опор, проводів, призводять до замикань на землю, дугових перенапруг та автоматичних відключень. Внаслідок низького рівня імпульсної міцності лінійної ізоляції, ЛЕП 6-35 кВ піддаються грозовим вимкненням, оскільки практично всі випадки грозових перенапруг призводять до перекриття ізоляторів з великою ймовірністю переходу в силову дугу напруги промислової частоти [3,5].

Крім того, впровадження в нашій країні розподільних ЛЕП з проводами із захисним покриттям (ПЛЗ), які мають порівняно з ЛЕП з неізольованими проводами ряд експлуатаційно – технічних переваг, таких як: менша пошкоджуваність, надійність електропостачання споживачів, безпека, габарити, тощо зумовлює необхідність застосування певної системи грозозахисту для попередження пробойів ізоляції та перепалювання проводів силовим струмом короткого замикання [3,5].

Особливістю проблеми грозозахисту ПЛЗ є те, що у випадку відсутності спеціальних заходів, за грозового перекриття ізоляторів лінії, який супроводжується пробоем твердої ізоляції проводу, виникає з великою ймовірністю дуга промислової частоти, яка не має можливості переміщатись проводом і горить в місці пробоею ізоляції до моменту вимкнення лінії. Це може призвести до обпалювання ізоляції проводу, ізоляторів лінії, а у випадку великих струмів короткого замикання – до перепалювання проводів (рисунок 1.9) [3,5].

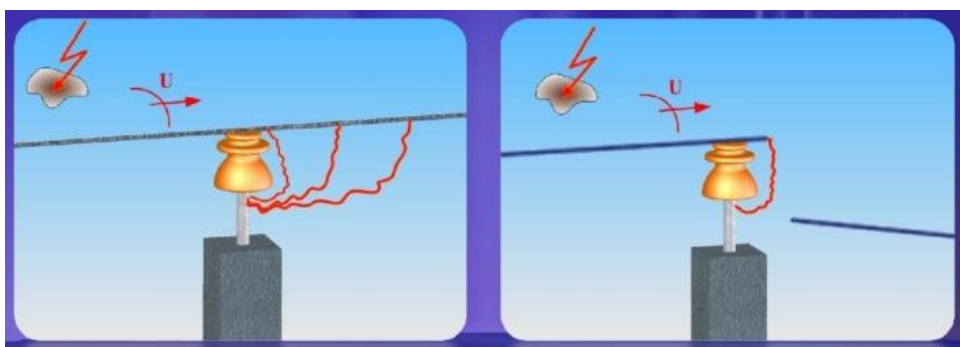


Рисунок. 1.9 - Особливості переміщення дуги проводом ЛЕП та проводі ПЛЗ

Розглядаючи питання грозозахисту ПЛЗ необхідно виділити існуючі моделі захисту, а саме: американську, фінську, японську системи грозозахисту, а також засоби грозозахисту, передбачені згідно чинних нормативних актів [3,5,8].

Особливості встановлення грозозахисту ПЛЗ регламентуються [35] з дотриманням вимог [4]. Відповідно до [26] на опорах ПЛЗ 6-35 кВ зі штирьовою та опорно-стрижневою ізоляцією для захисту проводів від перегорання в разі грозового перекриття ізоляції в якості захисних апаратів (ЗА) в Україні застосовують:

- довго-іскрові розрядники (РДІ);
- розрядники мультикамерного типу (РМК);
- обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН) з іскровим проміжком (ІП).

1.2.2 Американська система грозозахисту

Американська система грозозахисту передбачає зняття ізоляції на ділянці проводу коло ізолятора та встановлення дугостійких зажимів. За перекриття ізолятора загоряється дуга, яка рухається ділянкою, обмеженою зажимами, на яких в подальшому дуга горить до вимкнення лінії (рисунок 1.10) [3,5,8].

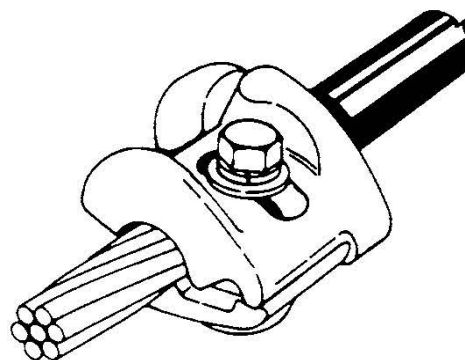
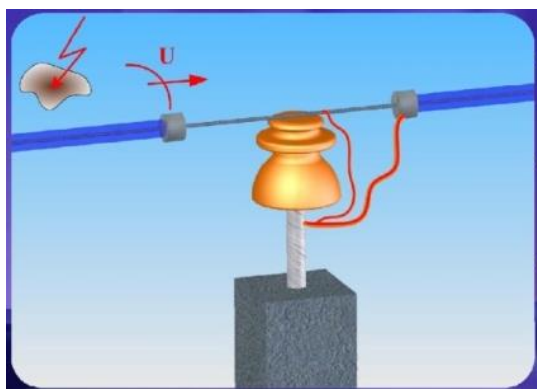


Рисунок 1.10 - Схема роботи дугостійких зажимів

Пристрій захищає ізольований провід, захищаючи його від концентрації дугової енергії, що виробляється під час удару блискавки. Для того, щоб запобігти пошкодженню, ПЛЗ повинен бути захищений шляхом встановлення пристроїв дугового захисту у відповідних місцях. Вони створюють безпечний маршрут для проходження дуги без ушкодження провідника. [3,5,8].

Пристрої захисту пропонуються в двох моделях - APD-80 і APD-57, різниця між якими полягає в кількості енергії, яку вони можуть витримати. Модель APD-80 призначена, щоб витримати кілька операцій за струму короткого замикання 21 кА

протягом десяти циклів без пошкодження провідника. Модель APD-57 доступна для застосувань, де запобіжники обмежують руйнівну енергію, вимикаючи несправність швидше автоматичних вимикачів. APD57 виготовляють з оцинкованої сталі, а APD80 з нержавіючої сталі.

Недоліком американської системи захисту є необхідність вимкнення ліній, електродинамічний удар по обладнанню, обгорання проводів за великих струмів, а також обмежений захисний ресурс дугостійких зажимів.

1.2.3 Фінська система грозозахисту

Фінська система грозозахисту передбачає встановлення на всі три проводи поблизу ізоляторів дугозахисних «рогів» разом зі спіральною арматурою, які повинні забезпечувати відвід від кожного з проводів палаючої дуги після грозового перекриття та сприяти переходу можливих однофазних дугових замикань, щонайменше, у двофазні к.з. Тим самим, проводи повинні захищатися від перепапу за рахунок обгорання «рогів» і за рахунок того, що гарантується гасіння дуги після вимкнення лінії (рисунок.1.11) [3,5,8].

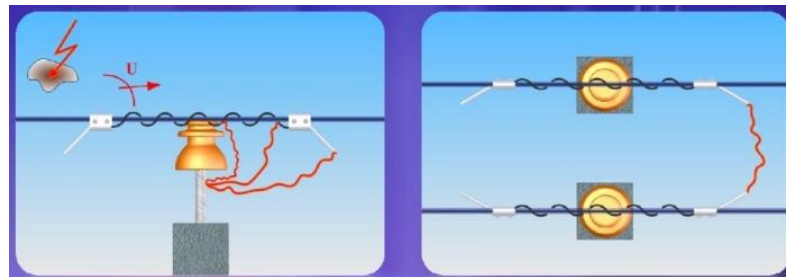


Рисунок 1.11 - Схема роботи дугозахисних «рогів»

Перешкоджаючи перегоранню проводів, система не захищає ізоляцію від перенапруг і не виключає можливості виникнення коротких замикань і вимкнення лінії після грозових впливів. Більше того, вона розрахована на те, щоб за рахунок спеціального розташування дугозахисних «рогів» однофазні замикання переводити у багатофазні к.з. тільки для того, щоб добитися вимкнення лінії. Такий принцип її дії ніяк не узгоджується з основною ідеєю функціонування електричних мереж з ізольованою нейтраллю, для яких однофазне замикання не є аварійним режимом, що

вимагає обов'язкового вимкнення. В даному випадку одна проблема, пов'язана з захистом від перепалу проводів, вирішується за рахунок створення інших проблем.

В процесі захисту відбувається інтенсивне вигорання «рогів», що вимагає їх періодичної заміни. Але, крім завідомо очевидних проблем, є одна технічна обставина, яка ставить під сумнів працездатність даної системи навіть у початковому варіанті. Дюгові замикання можуть супроводжуватися струмами різної величини, а можливість виходу дуги на «роги», в силу електродинамічних закономірностей і конструктивних параметрів системи, з'являються лише за струмів, що перевищують 1-2 кА. Відповідно, за менших струмів дуга не виходить на «роги», і це спричиняє небезпеку перепалу дроту [3,5,8].

Недоліками даної системи є: перепалювання проводів за горіння дуги на спіралі, електродинамічний удар по обладнанню, вимкнення ліній та обгорання рогів, що зумовлює подальшу їх заміну.

1.2.4 Японська система грозозахисту

Японська система грозозахисту передбачає встановлення ОПН, розрахованих на струм блискавки 2,5 кА, паралельно кожному ізолятору ПЛЗ з підключенням їх до проводу через іскровий проміжок, що не тільки ефективно запобігає дюговим замиканням, а й відключає лінію під час індукованих перенапруг (рисунок 1.12).

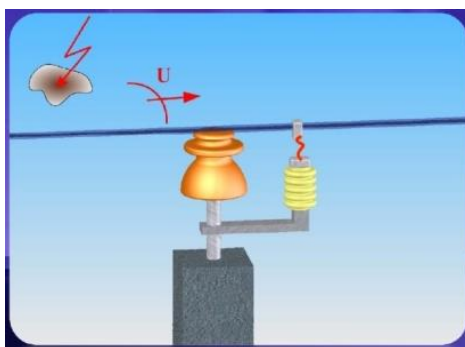


Рисунок 1.12 - Схема встановлення ОПН на ПЛЗ

Для зменшення грозових вимкнень ще в 1970 р. в Японії стали встановлювати ОПН на ЛЕП 6,6 кВ, які є основними розподільними мережами в цій країні [3,5,8,56]. Спочатку ОПН встановлювалися без іскрового проміжку між проводом і заземленою

опорою. Досвід експлуатації показав, що внаслідок великого числа апаратів, встановлених паралельно до ізоляторів, знизилась надійність роботи ліній через вихід ОПН з ладу на робочій напрузі і внутрішніх перенапругах.

Наступний етап розвитку цієї технології полягав в тому, що відносно малопотужні ОПН з номінальним розрядним струмом грозового імпульсу 2,5 кА встановлювалися на ЛЕП 6,6 кВ з повітряним проміжком. Завдяки наявності іскрового повітряного проміжку ОПН перестали піддаватися впливу внутрішніх перенапруг, і надійність роботи ЛЕП в нормальному експлуатаційному режимі підвищилася.

ОПН успішно захищали ЛЕП від індукованих грозових перенапруг і число грозових вимкнень істотно знизилося. Однак, за прямого удару блискавки (ПУБ) в провід ЛЕП відбувалося руйнування ОПН на ураженій і сусідніх опорах. Для виключення руйнувань ОПН від ПУБ була зроблена спроба збільшення енергоємності ОПН. На ряд ліній були встановлені ОПН з номінальним струмом 5 кА, і протягом декількох років здійснювалося спостереження за цими лініями. Моніторинг показав, що за збільшення номінального струму ОПН з 2,5 кА до 5 кА число відключень і руйнувань ОПН внаслідок ПУБ в ЛЕП практично не змінилося [3,5,8,57]. Цей результат пояснюється тим, що реальні струми блискавки істотно більші, ніж 5 кА. Вони лежать у діапазоні від 2 до 200 кА. Середнє значення струму блискавки становить близько 30 кА [58].

В результаті було прийнято рішення обладнати ЛЕП 6,6 кВ грозозахисними тросами та ОПН з номінальним струмом 2,5 кА з повітряними проміжками. В даний час практично всі лінії цього класу захищені тросами і ОПН. Завдяки цим двом дуже дорогим заходам грозові вимкнення були суттєво скорочені. Проте, відзначаються поодинокі випадки виходу з ладу ОПН навіть на ЛЕП, захищених тросами, під час ПУБ вельми потужних зимових позитивних блискавок, які можуть мати струми більше 100 кА з тривалістю імпульсу близько тисячі мікросекунд.

Таким чином, міжнародний досвід експлуатації ОПН на ЛЕП показує, що вони можуть успішно працювати лише в поєднанні з грозозахисним тросом, але це занадто дороге рішення [59].

Основними недоліками даної системи є те, що за прямого розряду блискавки в провід вона пошкоджується і підлягає заміні, а також висока вартість устаткування.

1.2.5 Грозозахист ліній довго – іскровими розрядниками

Довго-іскрові розрядники (РДІ) - особливий клас грозозахисних пристроїв, які за своїми конструктивними параметрами, технічними характеристиками та функціональними можливостями становлять особливий клас пристроїв грозозахисту [3,5,60,62].

Принцип дії всіх видів РДІ полягає в обмеженні грозових перенапруг на ПЛЗ за рахунок іскрового перекриття поверхнею ізоляційного тіла розрядника з довжиною каналу розряду, в кілька разів більшою ніж будівельна висота ізоляції, що захищається. Супроводжуючі струми промислової частоти гасяться під час цього процесу за рахунок забезпеченого таким чином зниження величини середнього градієнта робочої напруги вздовж каналу грозового перекриття.

Головною відмінністю класу РДІ є неможливість їх руйнувань і пошкоджень грозовими та дуговими струмами, оскільки вони протікають поза апаратами вздовж поверхні РДІ. Це унікальна для грозозахисних апаратів особливість поєднується з конструктивною простотою.

Розрядний проміжок РДІ в декілька разів довший, ніж будівельна висота ізоляції і має нижчу імпульсну електричну міцність, ніж міцність ізоляції. Це пояснюється особливостями “ковзного” розряду, який розвивається по поверхні ізоляційного проміжку. Напруга ковзного розряду слабо залежить від відстані між електродами, тому великі проміжки можуть бути перекриті відносно малими напругами. Цей ефект ковзного розряду покладено в основу конструкцій довго-іскрових розрядників.

Розрядник типу РДІ-П (петлевий) виконано (рисунок 1.13а) з металевого стрижня, покритого шаром поліетиленової ізоляції і зігнутого в петлю, який за допомогою затискача кріпиться до заземленого електроду опори. В середній частині петлі надіта металева трубка, а між нею і проводом лінії встановлено іскровий проміжок. Внаслідок великої ємності між металевою трубкою і стрижнем, вся

напруга виявляється прикладеною між проводом та трубкою. Під час пробою іскрового проміжку перенапруга прикладається між трубкою та металевим стрижнем, внаслідок чого з трубки вздовж поверхні ізоляції розвивається ковзний розряд до замикання його через вузол кріплення на заземлення [27].

Різновидом такого розрядника є РДІ-М (модульний), який складається з двох відрізків кабелю з корделем, в якості якого використано напівпровідниковий матеріал. Відрізки кабелю з'єднані таким чином, що утворюють три розрядні модулі (рисунок 1.13 б). Відрізки напівпровідникового корделя приєднані до металевих електродів через внутрішні іскрові проміжки. За появи грозового імпульсу вони перекриваються і напівпровідниковий кордель верхнього відрізка кабелю, який має опір R , виносить високий потенціал U на поверхню нижнього відрізка кабелю в його середній частині. Аналогічно напівпровідниковий кордель нижнього відрізка кабелю виносить низький потенціал «0» на поверхню верхнього відрізка кабелю в його середній частині. Тому до кожного розрядного модуля одночасного прикладена повна напруга U , і для усіх 3-х розрядних модулів створюються умови для одночасного розвитку ковзних розрядів, які утворюють єдиний довгий канал перекриття [61].

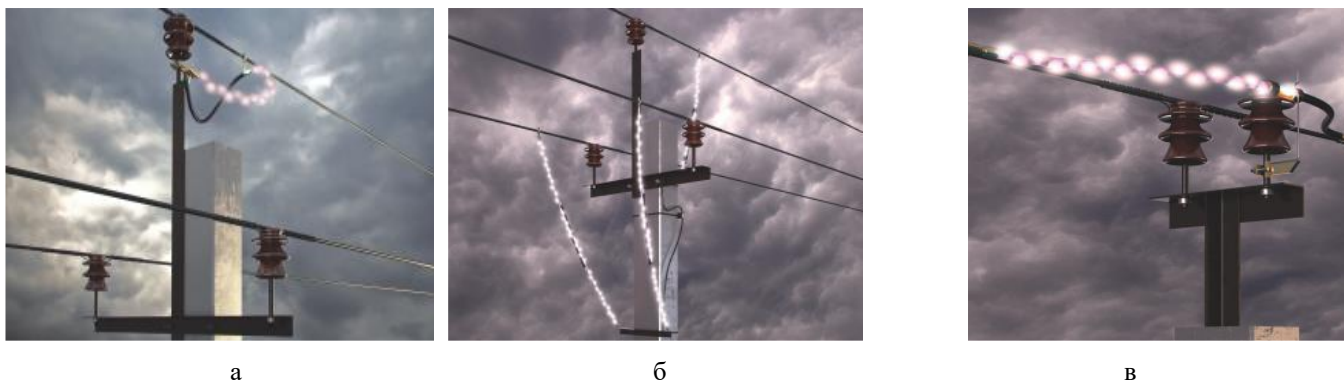


Рисунок 1.13 - Фото випробувань: РДІ – П(а), РДІ – М (б), РДІ – Ш (в)

Основним елементом розрядника РДІ-Ш є відрізок спеціального кабелю з алюмінієвою монолітною жилою і тришаровою ізоляцією зі зшитого поліетилену (ПЕ). На одному з трьох плечей відрізка кабелю встановлені проміжні кільцеві електроди, що забезпечують розбиття каналу перекриття на окремі відрізки (рисунок 1.13 в). За виникнення на проводі ЛЕП грозової перенапруги металева трубка на

кабелі розрядника набуває того ж високого потенціалу, що й провід. Тому спочатку практично вся грозова перенапряга стає прикладеною до іскрового повітряного проміжку між трубкою і заземленим стрижневим електродом. За напруги близько 50-70 кВ проміжок пробивається, і металева трубка на поверхні кабелю набуває нульового потенціалу землі. Таким чином, перенапряга стає прикладеною між жилою кабелю і металевою трубкою на його поверхні. Під впливом цієї перенапруги вздовж поверхні ізоляції розрядника розвивається ковзний розряд. Провід ЛЕП пов'язується з заземленою опорою через дуговий канал розряду, який розбитий на окремі відрізки кільцевими електродами. За першого переходу імпульсного струму через нуль розряд гасне, не переходячи в силову дугу, що запобігає виникненню короткого замикання та вимкнення ЛЕП.

Відповідно до [26] РДІ-М застосовують для захисту ПЛЗ 6-10 кВ з розташуванням проводів, відстань між якими не перевищує 0,5 м. РДІ-Ш застосовують для захисту ПЛЗ 6-10 кВ у місцях подвійного кріплення проводів замість РДІ-П.

Однак період експлуатації показує, що такого типу захист не завжди повністю виконує свої функції. На деяких ЛЕП число однофазних КЗ може навіть збільшитися. Крім того, випробування підтверджують що не завжди РДІ - П може захистити ізоляцію на сусідніх опорах, тобто на наступних двох опорах, де він не встановлений на цій фазі.

1.2.6 Грозозахист мультикамерними розрядниками

В результаті вдосконалення систем захисту від блискавок розроблено розрядники для ЛЕП 6-35 кВ і вище з так званою мультикамерною системою (МКС). Запропоновано також принципово новий апарат: ізолятор-розрядник з мультикамерною системою (ІРМК), який поєднує в собі властивості ізолятора та розрядника одночасно [3,8,27,63,64].

Основа ІРМК складають звичайні ізолятори (скляні, порцелянові чи полімерні), на яких відповідним чином встановлена МКС. Причому установка МКС не призводить до погіршення ізоляційних властивостей ізолятора, але завдяки МКС, він

набуває властивостей розрядника. Тому в разі застосування ІРМК на ПЛ не потрібно застосування грозозахисного троса. При цьому знижується висота, маса і вартість опор, а також вартість всієї ПЛ в цілому і забезпечується надійний грозозахист ліній, тобто різко скорочується число відключень ліній і зменшуються експлуатаційні витрати та збитки від недовідпуску електроенергії [27].

Основним елементом мультикамерного розрядника (РМК) та гірлянд ізоляторів з РМК (ГІРМК) в тому числі і ІРМК є мультикамерна система (рисунок 1.14), яка складається з великої кількості електродів, вмонтованих в профіль із силіконової гуми. Між електродами виконані отвори, що виходять назовні профілю. Ці отвори утворюють мініатюрні газорозрядні камери. За впливу на розрядник грозового імпульсу пробиваються проміжки між електродами.

Завдяки тому, що розряди між проміжними електродами відбуваються всередині камер, обсяги яких дуже малі, за розширення каналу створюється високий тиск, під дією якого канали іскрових розрядів між електродами переміщуються до поверхні ізоляційного тіла і далі - видувуються назовні в навколишній розрядник - повітря.

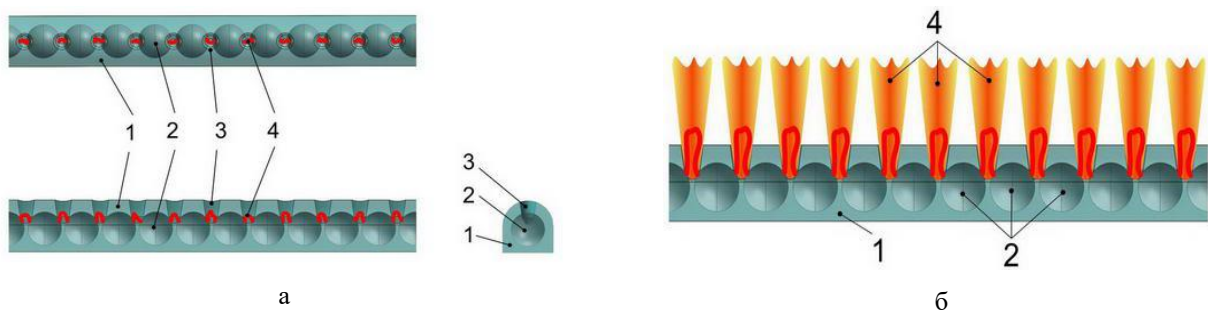


Рисунок 1.14 - Мультикамерна система (МКС): схема, яка пояснює початковий момент розвитку розрядів (а); схема, яка пояснює завершальний момент розвитку розрядів (б); 1 - профіль із силіконової гуми; 2 - проміжні електроди; 3 - дугогасні камери; 4 - канал розряду

Внаслідок цього виникає дугтя та подовження каналів між електродами, канали розрядів охолоджуються, сумарний опір всіх каналів збільшується, тобто загальний опір розрядника зростає, і відбувається обмеження імпульсного струму грозової перенапруги.

Після закінчення грозової перенапруги, до розрядників залишається прикладеною напруга промислової частоти. Як показали проведені дослідження, в розрядниках з МКС можливі два типи гасіння іскрового розряду:

- за переходу супроводжуючого струму 50 Гц через нуль;
- за зниження миттєвого значення імпульсу грозової перенапруги до певного значення, більшого чи рівного миттєвому значенню напруги промислової частоти, тобто здійснюється гасіння струму перенапруги без супроводжуючого струму мережі.

Відповідно до [26] вибір типу захисного апарату (ЗА) виконують на стадії проектування ПЛЗ 6-35 кВ за узгодженням з замовником лінії, з урахуванням їх технічних характеристик. ЗА треба встановлювати:

- по одному на опорі (для кожного кола) з чергуванням фаз;
- на двоколових ПЛЗ напругою від 6 кВ до 10 кВ ЗА треба встановлювати на обидва кола таким чином, щоб на кожній з опор було захищено тільки одну пару однойменних фаз, з тим самим принципом чергування, що й для одноколових ПЛЗ.

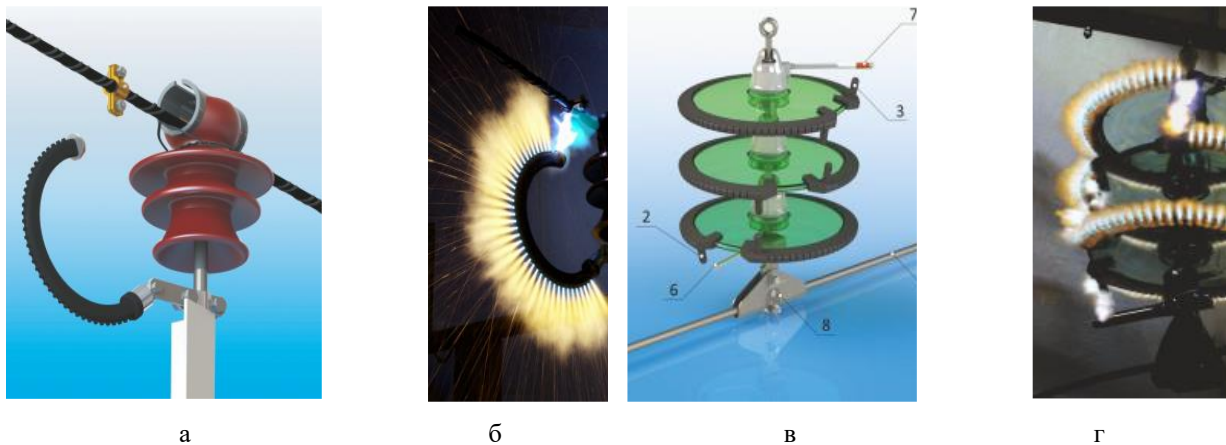


Рисунок 1.15 - Установка на лінії РМК-20-IV-УХЛ1(а); фотографія випробування РМК-20-IV-УХЛ1(б); загальний вигляд ГРМК – 35-3(в); фотографія випробування ГРМК – 35-3(г)

Аналізуючи наведені вище рисунки (рисунок 1.13 - 1.15), необхідно зазначити відносну складність конструкції (порівняно з ОПН, ІП тощо) РДІ та мультикамерних

розрядників (велика кількість отворів, електродів, розрядних проміжків тощо, на які впливає навколишнє середовище). Особливістю таких розрядників є застосування в якості ізоляції силіконової гуми. Все це, очевидно, призводитиме до зниження надійності роботи таких конструкцій за тривалого впливу атмосферних забруднень, вологи, опадів дощу та снігу, різких змін температури навколишнього середовища, впливу сонячного проміння (нагрів, ультрафіолетове випромінювання). Необхідно також зазначити, що мультикамерна система допускає об'єднання окремих розрядів, що відбуваються між суміжними електродами, в єдиний канал, а це негативно позначається на електрообладнанні лінії електропередавання, в якій використовується ізолятор, а також знижується термін експлуатації самого ізолятора. Ці особливості іскрових та мультикамерних розрядників слід враховувати для розрахунків надійності систем захисту з такими розрядниками.

1.3 Засоби та пристрої грозозахисту ліній електропередавання класів напруг 110 – 750 кВ

1.3.1 Захисні троси (линви)

Грозозахисний трос - провідник, заземлений безпосередньо чи через іскрові проміжки, розміщений над фазними проводами повітряної лінії електропередавання чи підстанції і призначений для захисту їх від ураження блискавкою. Грозозахисний трос заземлюється на кожній опорі. ЛЕП напругою 110-750 кВ повинні бути захищені від прямих ударів блискавки грозозахисними тросами по всій довжині лінії [10].

Залежно від розташування, кількості проводів на опорах повітряної лінії, електричного опору ґрунту, класу напруги повітряної лінії, необхідного ступеня грозозахисту монтують один чи кілька тросів. Висота підвісу грозозахисних тросів визначається залежно від кута захисту, тобто кута між вертикаллю, що проходить через трос, й лінією, що з'єднує трос з крайнім проводом, який може змінюватися в широких межах і навіть бути від'ємним [10].

Зазвичай грозозахисний трос роблять зі сталевих оцинкованих жил перетином від 50 до 70 мм². Захищеність лінії залежить від кута захисту, який за значень більших за 20° робить ураження блискавкою малоймовірним. У лініях на металевих опорах з напругою 110 кВ і вище грозозахисний трос підвішують зазвичай по всій довжині лінії, на лініях нижчої напруги — лише на підходах до електричних підстанцій [10].

Грозозахисний трос містить сталеві з покриттям дроти: центральний та навиті одинарною звивкою з точковим торканням щонайменше в один шар периферійні дроти. При цьому покриття використане алюмінієве, виконане способом плакування [10].

Для грозозахисних тросів, як правило, застосовують сталеві линви, виготовлені з оцинкованого плакованого алюмінієм дроту для особливо жорстких агресивних умов роботи (ОЖ) і стійких до розкручування за способом звивання (Н), перерізом не менше ніж [4]:

- 35 мм² - на ЛЕП 35 кВ без перетинів і в прогонах перетинів із залізницями загального користування та електрифікованими в районах за ожеледдю 1–2 (ТК 35);
- 50 мм² - в інших районах і на ЛЕП, що споруджуються на двоколових і багатоколових опорах та на ЛЕП 110-150 кВ (ТК 50);
- 70 мм² - на ЛЕП 220 кВ і вище (ТК 70).

Сталеалюмінієві проводи або проводи з термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осердям як грозозахисні троси рекомендується застосовувати [4]:

а) на особливо відповідальних переходах через інженерні споруди (електрифіковані залізниці, автомобільні дороги категорії ІА, судноплавні перешкоди тощо);

б) на відрізках ЛЕП, які проходять у районах з підвищеною забрудненістю атмосфери (промислові зони з високою хімічною активністю викидів, землі із засоленими ґрунтами і водоймами, узбережжя морів тощо), а також тих, що проходять по населеній і важкодоступній місцевостях;

в) на ЛЕП з великими струмами однофазного короткого замикання за умовами термічної стійкості та для зменшення впливу ЛЕП на лінії зв'язку;

г) на великих переходах.

При цьому для ЛЕП, які споруджуються на двоколових чи багатоколових опорах, незалежно від напруги сумарний переріз алюмінієвої (чи алюмінієвого сплаву) і сталеві частини троса повинен бути не меншим за 120 мм^2 [4].

Відстані по вертикалі між тросом і проводом ЛЕП всередині прогону без урахування відхилення їх вітром за умовами захисту від грозових перенапруг повинні бути не меншими від поданих у [4] і не меншими від відстані по вертикалі між тросом і проводом на опорі. Кріплення тросів на всіх опорах ЛЕП 220–750 кВ потрібно виконувати за допомогою ізоляторів, які шунтуються ІІІ розміром, не меншим ніж 40 мм. На кожному анкерному відрізку довжиною до 10 км троси повинні бути заземленими в одній точці шляхом влаштування спеціальних перемичок на анкерній опорі. За більшої довжини анкерних прогонів кількість точок заземлення в прогоні вибирається такою, щоб у разі найбільшого значення повздовжньої електрорушійної сили, яка наводиться в тросі під час короткого замикання на ЛЕП, не виникло перекриття ІІІ. Ізольоване кріплення троса рекомендується виконувати скляними підвісними ізоляторами [4].

З огляду на охоплення великих ділянок земної поверхні самими лініями електропередач та наявність майже в кожній країні мережі високовольтних ліній, грозозахисті троси можуть використовуватись з метою зв'язку [10].

Грозозахисний трос може містити вбудований оптоволоконний кабель. Можливі конструкції оптичних кабелів, вбудованих у грозозахисний трос, коли оптичні волокна знаходяться в полімерних трубках, що вміщені в поліетиленову оболонку, навколо діелектричного оптичного сердечника в поліетиленовій оболонці — алюмінієва трубка і зовнішній повив з круглих дротів [10,37,135].

Основна перевага комбінованих ЛЕП з лінією зв'язку перед підземними кабельними магістралями зв'язку проявляється тоді, коли траса лінії проходить через важкодоступні чи неможливі для підземної прокладки місцевості, наприклад, зони

вічної мерзлоти, болота, скельні породи. Така технологія знаходиться в процесі становлення, зазнаючи чисельних змін та вдосконалень [37].

У разі використання грозозахисних тросів для організації багатоканальних систем високочастотного зв'язку за необхідності використовують одиночні чи здвоєні ізолювані один від одного троси або троси з вбудованим оптичним кабелем зв'язку. Між складниками здвоєного троса в прогонах і петлях анкерних опор необхідно встановлювати дистанційні ізолювальні розпірки. Відстані між розпірками в прогоні не повинні перевищувати 40 м [4].

Відсутність блискавкозахисного тросу призводить до підвищення числа коротких замикань на лінії внаслідок грозових перекриттів. При цьому часто спрацьовують пристрої АПВ і збільшується кількість небезпечних впливів на лінії зв'язку та кількість дій струмів коротких замикань на електроустаткування мережі. Зростає також і ймовірність протікання великих струмів через заземлювальні пристрої підстанції [7].

1.3.2 Зменшення опору заземлення опор

Заземлюючим пристроєм називається конструкція з електропровідних матеріалів, яка служить для відводу струму в землю. Основна функція, яку виконує заземлюючий пристрій опори ЛЕП - відведення в землю струму блискавки, тобто зменшення можливості (ймовірності) зворотних перекриттів під час удару блискавки в опору та грозозахисний трос [6].

На ЛЕП підлягають заземленню [4]: опори, які мають грозозахисний трос чи інші пристрої грозозахисту; залізобетонні та сталеві опори ЛЕП напругою 0,4-35 кВ; опори, на яких встановлені силові чи вимірювальні трансформатори, роз'єднувачі та інші апарати; сталеві та залізобетонні опори ЛЕП 110-500 кВ без пристроїв блискавкозахисту, якщо це необхідно з умов забезпечення надійної роботи релейного захисту та автоматики.

На відміну від звичайних перекриттів, викликаних зволоженням чи забрудненням ізоляції, струм блискавки створює на опорі електричний потенціал, набагато більший потенціалу фазного проводу, і, таким чином, перекриття

відбувається в зворотному напрямку. Чим менше опір заземлюючих пристроїв, тим менше можливість зворотного перекриття [6].

Зменшення опору заземлення опор ПЛ з тросом є одним з основних засобів зменшення ймовірності імпульсного перекриття ізоляції під час удару блискавки в трос чи опору.

У тих випадках, коли не вдається здійснити малий опір заземлення опор, тросовий захист може виявитись малоефективним, оскільки більшість ударів блискавки в трос чи опору будуть призводити до перекриття ізоляції [6].

Для ефективного відведення струму блискавки в землю і запобігання зворотним перекриттям ізоляції, опори лінії забезпечуються відповідними заземлювачами, що знижують імпульсний опір заземлення кожної опори до значення $<10...20$ Ом. Вищі значення опору заземлення опор допускаються лише для ліній, розташованих в районах з високим питомим опором ґрунту ($\rho > 1000$ Ом·м). У ґрунтах з $\rho > 1000$ Ом·м бажано застосовувати ефективні глибинні заземлювачі або, в крайньому випадку, багатопробеневи заземлювачі довжиною 20–30 м [6,15].

Щоб зменшити опір заземлюючих пристроїв, необхідно виконати електромонтаж додаткового заземлювача. Найбільш швидким і конструктивним рішенням є електромонтаж глибинного заземлювача (модульна штирвова система заземлення). Додатковим способом зменшення опору розтікання струму заземлюючих пристроїв є приєднання до контуру заземлення додаткових природних заземлювачів, наприклад: металеві стовпи забору; металеві конструкції будівлі, що мають з'єднання з землею; металеві труби водопроводів, які прокладені в землі тощо [4,6].

Загальний опір заземлення залежить, від опору прилеглих до заземлювачів шарів ґрунту. Тому можна домогтися зниження опору заземлення зниженням питомого опору ґрунту лише в невеликій області навколо заземлювача.

Штучне зниження питомого опору ґрунту досягається або хімічним шляхом за допомогою електролітів, або шляхом укладання заземлювачів в котловани з насипним вугіллям, коксом, глиною.

Досвід показав, що максимальне зменшення опору заземлення досягається за використання електролітів, деревного вугілля і коксового дріб'язку. Перший спосіб полягає в тому, що навколо заземлювачів ґрунт просочується розчинами хлористого натрію (звичайної кухонної солі), хлористого кальцію, сірчаноокислої міді (мідного купоросу) тощо [6,66,67]. Слід вказати, що зазначеним способом можна домогтися порівняно великого зниження величини опору заземлення, однак на нетривалий термін (2 - 4 роки), після чого потрібно знову просочувати ґрунт електролітом.

Практично можна рекомендувати такі два способи штучного зниження питомого опору ґрунту: створення навколо заземлювача зони зі зниженим питомим опором і обробка ґрунту сіллю.

Для створення навколо заземлювача зони зі зниженим питомим опором в ґрунті робиться виїмка (котлован) радіусом 1,5-2,0 м і глибиною, що дорівнює довжині стержня, який забивають. Після заповнення виїмки ґрунтом встановлюється заземлювач і ґрунт втрамбується.

В якості ґрунту-заповнювача може бути застосований будь-який ґрунт, що має питомий опір в 5-10 разів менший, ніж питомий опір основного ґрунту. Наприклад, якщо заземлення влаштовується в піщаному або кам'янистому (граніт) ґрунті, то наповнювачами можуть бути, глина, торф, чорнозем, суглинок, шлак тощо. Таким способом досягається зниження опору заземлення в середньому в 2,5-3 рази [6,28,65].

Ефективним і дешевим способом зниження опору заземлення є обробка ґрунту кухонною сіллю. Дія останньої зводиться не тільки до зниження питомого опору ґрунту, але й до зниження температури його замерзання.

Існують різні способи укладання солі поблизу заземлювача. У [18] розглянуто укладання близько трубчастого заземлювача солі шарами. Сіль може також укладатися на всю глибину біля трубчастого заземлювача або на невеликій відстані від нього. Останній спосіб є більш зручним у тому відношенні, що корозія заземлювача в цьому випадку буде мінімальною.

Кількість солі, що вимагається для обробки заземлення, залежить від довжини електрода: від 1,5 до 10 кг на 1 м заземлювача.

Іноді сіллю заповнюється простір всередині заземлювача, виконаного у вигляді порожнистої труби з отворами, через які розчин солі виходить в навколишній ґрунт.

Оскільки сіль з часом вимивається, то термін дії обробки ґрунту обмежений і через 2 - 4 роки її доводиться повторювати. Ефективність обробки неоднакова і з плином часу змінюється. У перший рік, коли сіль ще не встигає розповсюдитися навколо заземлювача, опір знижується порівняно мало. Оптимальні умови настають на другому-третьому році і потім починають йти на спад. Стійкість обробки залежить від складу ґрунту, вологості, кількості опадів [6,28].

До недоліків зазначених способів обробки ґрунтів відносяться: необхідність відновлення просочення ґрунтів приблизно через 2 - 4 роки і можливість руйнування заземлювачів від хімічного впливу на них солей або соляних розчинів, внаслідок чого потрібна заміна їх новими заземлювачами.

Робилися спроби усунути ці недоліки. Так, в Німеччині, наприклад, був запропонований спосіб, за яким в ґрунт навколо заземлювача вводяться метали в тонкоподрібненому вигляді, як, наприклад, в колоїдних розчинах, або у вигляді дрібної металевої стружки. Якщо при цьому тонко подрібнені метали обрані так, щоб не могли виникати гальванічні пари з самими заземлювачами, то останній кородувати не буде [6,68].

Однак колоїди не стійкіші в ґрунті, ніж солі і соляні розчини. Вони поступово вимиваються з навколишніх до заземлювачів шарів ґрунту дощовою водою, внаслідок чого досягнуте зменшення опору заземлювача з плином часу пропадає. У США запропонований спосіб затримання вимивання соляних розчинів з ґрунту шляхом змішування соляного розчину (наприклад, мідного купоросу) з нерозчинною у воді пластмасовою сумішшю і впорскування їх в ґрунт під великим тиском. Цей спосіб є дорогим і тривалість його дії не визначалася.

З інших способів штучного зниження опору заземлювачів, запропонованих в різних країнах, в першу чергу заслуговує на увагу шведський спосіб - обробка ґрунту навколо заземлювача за допомогою електrolітів, що утворюють гель.

В результаті змішування концентрованого розчину сірчаної кислоти міді з еквівалентною кількістю концентрованого розчину солі лужного ціаністого заліза

виходить нерозчинний у воді продукт реакції – з'єднання синильної кислоти і ціаніду заліза, який за певних умов утворює однорідний електропровідний гідрогель [6,69].

Електричні та фізичні властивості гідрогелю не змінюються скільки-завгодно істотно від тривалого впливу води і є стійкими при коливаннях температури в межах від -60 до $+60$ ° С. Однак він ефективний для зниження дуже високих опорів заземлювачів (близько 400 - 600 Ом) і малоефективний для величин опорів порядку 20-30 Ом.

1.3.3 Підвищення імпульсної міцності лінійної ізоляції

Оскільки струм блискавки досягає свого амплітудного значення (десятки кілоампер) за час порядку декількох мікросекунд, то на найближчій до точки удару блискавки гірлянді ізоляторів напруга починає швидко наростати. Гірлянда ізоляторів має імпульсну електричну міцність, значення якої має статистичний розкид. У розрахунках імпульсну міцність гірлянди приймають рівною 50%-ному значенню разрядної напруги $U_{50\%}$ - максимальному значенню стандартного грозового імпульсу напруги (1,2/50 мкс), за якого розряд настає в 50% всіх випадків подачі напруги. Як тільки напруга на гірлянді ізоляторів перевищить її імпульсну міцність, відбудеться перекриття гірлянди, і велика частина струму стече в землю заземлювачами опори. По лінії електропередавання почне рух хвиля, обмежена амплітудою імпульсної міцності гірлянди $U_{50\%}$. Під час удару блискавки в опору напруга на фазному проводі ЛЕП спочатку визначається тільки складовими, індукованими електромагнітним полем каналу блискавки. Велика частина струму блискавки протікає опорою, створюючи падіння напруги на індуктивності опори $L_{оп}$ і на імпульсному опорі її заземлювача $R_{оп}$. Якщо струм блискавки і крутизна його фронту виявляться досить великими, то різниця потенціалів між вершиною опори і фазним проводом перевищить імпульсну міцність гірлянди ізоляторів, що призведе до зворотного перекриття. При цьому на фазному проводі практично миттєво з'явиться напруга і по лінії відправиться хвиля з прямовисним фронтом. У всіх випадках грозового ураження ПЛІ від місця перекриття в бік підстанції рухається електромагнітна хвиля, амплітуда якої може бути прийнята рівною $U_{50\%}$. Якщо ця

хвиля утворилася в результаті зворотного перекриття, то її початкова тривалість фронту може бути в розрахунках прийнята рівною нулю [29].

Імпульсна міцність ізоляції ПЛ з тросом визначається типом ізоляторів, довжиною гірлянди, довжиною повітряних проміжків на опорі та проміжку трос-провід в прогоні. Збільшення довжини гірлянди відповідно повітряних проміжків на опорі підвищують капітальні затрати і практично не використовується як засіб грозозахисту.

1.3.4 Захист окремих опор і ділянок з ослабленою ізоляцією

На опорах з ослабленою ізоляцією або з підвищеною ймовірністю грозового ураження доцільно встановлювати вентиляльні розрядники або ОПН. Захист опор з ослабленою ізоляцією раніше здійснювався за допомогою трубчатих розрядників, що забезпечували гасіння дуги після імпульсного перекриття. Недоліком трубчатих розрядників є нестабільність їх характеристик, що часто призводило до розвитку аварій за відмови чи руйнування розрядників. Більш перспективним є використання ОПН [7,15].

Окремі місця ліній вимагають додаткових заходів захисту. До таких місць відносять [7]:

- перетини ліній електропередачі між собою;
- перетини ліній електропередачі з лініями зв'язку, трамвайними лініями і лініями електрифікованої залізниці;
- опори лінії електропередачі з пониженою електричною міцністю ізоляції;
- високі опори перехідних прогонів;
- відгалуження до підстанцій на відпайках і секційних роз'єднувачів на лініях;
- кабельні вставки на лініях.

Захист перетинів ліній електропередачі, викликаний необхідністю запобігти важким аваріям у разі грозового перекриття з верхньої лінії електропередачі на нижню лінію або лінію зв'язку. Такі перекриття можуть викликати помилкову роботу релейного захисту та системні аварії, пошкодження електроустаткування ліній нижчої напруги і навіть спричинити людські жертви. Найбільшу небезпеку несе удар

блискавки в прогін перетину. Відстань між проводами пересічних ліній в цьому прогоні повинна бути достатньо великою, а амплітуда перенапруг обмежена розрядниками, розташованими якомога ближче до місця перетину, тому в прогоні перетину доцільно зняти блискавкозахисний трос з нижньої лінії і вибрати точку перетину далі від середини прогону верхньої лінії. Якщо відстань від місця перетину до найближчої опори не перевищує 40 м, то розрядники можна встановлювати тільки на найближчій опорі [7,15].

Опір заземлення опор прогону перетину не повинен перевищувати 10...20 Ом. Якщо опори дерев'яні, то на них рекомендується встановлювати паралельно гірляндам ізоляторів розрядники або іскрові проміжки, з'єднані спусками із заземлювачами опори [7,15].

Необхідна відстань S по вертикалі між проводами пересічних ліній залежить від номінальної напруги верхньої лінії, опору заземлення опор, довжини прогону і відстані між місцем перетину і найближчою опорою. Встановлення захисних засобів дозволяє зменшити відстань S на 20–30% [7].

Окремі металеві та залізобетонні опори ліній, виконаних, головним чином, на дерев'яних опорах без тросів, є місцями з пониженою імпульсною електричною міцністю ізоляції. Ці місця доцільно захистити трифазними комплектами розрядників [43].

Високі перехідні прогони повітряних ліній електропередачі є джерелом підвищеного числа грозових уражень. Це пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею, що призводить до збільшення числа ударів блискавки в прогін, зниження ефективності захисту тросом, збільшення числа зворотних перекриттів через велику індуктивність опор. Зниження імпульсного опору заземлення перехідних опор в цьому випадку стає недостатнім [7].

Розрахунок очікуваного числа відключень ЛЕП з високими перехідними прогонами ускладнений необхідністю врахування складного рельєфу місцевості під прогоном і великою різницею висоти проводу над землею на окремих ділянках прогону, тому блискавкозахист відповідальних прогонів розглядається індивідуально. Як показують розрахунки, найбільш ефективним засобом захисту

високих переходів є встановлення вентиляльних розрядників або ОПН у верхній частині перехідних опор або на опорах, сусідніх з перехідними [7].

1.3.5. Обмежувачі перенапруг

Для захисту електроустаткування установок напругами 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від грозових та комутаційних перенапруг повинні застосовуватись *обмежувачі перенапруг*, які порівняно з вентиляльними розрядниками через відсутність іскрових проміжків і високу нелінійність вольтамперної характеристики їх елементів мають ряд переваг, а саме [16]:

- глибокий рівень обмеження всіх видів перенапруг;
- здатність до розсіювання великих енергій;
- стабільність характеристик і стійкість до старіння;
- відсутність супроводжуючого струму після загасання хвилі перенапруги;
- простота конструкції та висока надійність в експлуатації;
- стійкість до зовнішніх забруднень ізоляційного корпусу;
- здатність обмежувати внутрішні перенапруги;
- за використання полімерного корпусу висока вибухобезпечність;
- малі габарити та вага.

Використання ОПН на ПЛ найбільш ефективно в наступних випадках [16]:

- на одному з кіл двоколової ПЛ, що практично повністю запобігає грозовим вимкненням одночасно двох кіл;
- за високого опорного заземлення опор;
- на високих опорах, наприклад, на переходах через водянні перешкоди.

Вибір ОПН повинен здійснюватись за величиною номінального розрядного струму та пропускної здатності за прикладання до нього прямокутного імпульсу струму тривалістю 2000 мкс із визначеною питомою енергією, віднесеною до найбільш тривало допустимої робочої напруги [16].

У випадках коли потрібний клас пропускної здатності не може бути забезпечено застосуванням одного ОПН дозволено використовувати паралельне встановлення двох та більше ОПН. Під час будівництва та реконструкції

електроустановок напругами 35-750 кВ для їх захисту від перенапруг повинні застосовуватись тільки ОПН. Заміна ВР на ОПН повинна здійснюватись згідно з проектами [16].

Під час встановлення на ЛЕП ОПН кріпляться хомутами до спеціальної траверси або встановлюються на виносних кронштейнах-траверсах, які прикріплюються до опор, або на спеціальних площадках, змонтованих усередині опор, або на обгороджених стояках, розташовуваних безпосередньо біля опор. Для захисту лінійної ізоляції ПЛ від перенапруг застосовуються два типи ОПН: ОПН-Л без іскрового проміжку; ОПН-ЛІ із зовнішнім П. ОПН-Л та ОПН-ЛІ повинні застосовуватися відповідно до [16].

1.3.6 Визначення оптимального кута захисту

Захисний кут троса - це кут між прямою, що проходить через трос та провід, і вертикальною лінією. Кут захисту, залежно від висоти опор, підбирається так, щоб понизити число прямих ударів блискавки у фазні проводи приблизно на 2–3 порядки. Ця умова забезпечується, зазвичай, для кутів $20...30^\circ$. Проте, як показує досвід експлуатації, випадки прориву блискавки на проводи є визначальними в сумарному числі небезпечних грозових уражень ліній 330 кВ і вище, спостерігається збільшення їх числа зі зростанням номінальної напруги лінії. Це пов'язано зі збільшенням висоти опор і відповідним зниженням ефективності тросового захисту, а також зі зростанням впливу електричного поля фазних проводів на напрям розвитку лідера блискавки. З метою збереження високої надійності тросового захисту на лініях 220 кВ і вище рекомендовано застосування тросів з від'ємними кутами захисту [7,15].

Для зменшення грозових уражень лінії надвисокої напруги частіше монтують на опорах, які мають горизонтальне розташування фаз (наприклад, порталних). Це дозволяє понизити загальну висоту ліній. Додаткове зниження числа зворотних перекриттів дає використання опор, закріплених металевими відтяжками, які зменшують індуктивність шляху струму блискавки від вершини опори в землю, а також зменшення імпульсного опору заземлення. На порталних опорах, що мають велику відстань між крайніми фазами, достатньо малий кут захисту забезпечується

шляхом підвішування двох тросів, розташованих на однаковій висоті [7,15]. У разі виконання захисту ЛЕП тросами від грозових перенапруг необхідно керуватися настановами [4].

1.3.7 Використання АПВ, як методу грозозахисту ліній електропередачі

Пристрої автоматичного повторного включення (АПВ) застосовуються для швидкого відновлення живлення споживачів або міжсистемних і внутрішньосистемних зв'язків шляхом автоматичного включення вимикачів, відключених пристроями релейного захисту або з інших причин, не пов'язаних з оперативним впливом [70].

Автоматичне повторне включення лінії (АПВ, ОАПВ) працюватиме ефективно у блискавкозахисті, оскільки під час грозового вимкнення в 80-90% випадків електрична міцність ізоляції лінії повністю відновлюється після зняття з неї робочої напруги. Відповідно, резервним засобом підвищення надійності та безперервності роботи ЛЕП є АПВ, особливо швидкодіюче (ШАПВ) і однофазне (ОАПВ) [29].

Автоматичне повторне включення може утримати лінію в роботі, оскільки випадки пошкодження ізоляції на опорах дугою досить рідкісні. У цьому випадку грозове пошкодження не буде супроводжуватися перервою в електропостачанні. За неуспішного АПВ відбудеться повне вимкнення лінії електропередачі. Необхідно зазначити, що часте застосування АПВ ускладнює експлуатацію вимикачів, які вимагають в цьому випадку позачергової ревізії [29].

Коефіцієнт успішності АПВ за грозових відключень, за даними досвіду експлуатації, для ПЛ 110 – 500 кВ становить в середньому 0,6 – 0,8 , а для ПЛ 750 і 1150 кВ – 0,8 – 0,9. АПВ дозволяє частково компенсувати низьку грозостійкість ЛЕП якщо є складності встановлення відповідних заземлень.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Розглянуто статистичні характеристики та ймовірнісні показники параметрів розряду блискавки, що можуть використовуватися для розрахунків грозостійкості

ЛЕП. Рекомендовано для розрахунку грозостійкості ЛЕП та ймовірності появи струмів блискавки з відповідними параметрами використовувати розподіли струмів блискавки, отримані за даними реєстрацій на ЛЕП.

2. Проведено аналіз нових зарубіжних і вітчизняних систем та засобів грозозахисту ЛЕП 6 – 35 кВ з ізолюваними проводами. Встановлено, що поряд з перевагами таких систем (менші пошкоджуваність і габарити ліній, більші надійність електропостачання споживачів і безпека тощо), їм властиві і недоліки (більша вартість ліній, необхідність застосування певної системи грозозахисту для попередження пробоїв ізоляції і перепалювання проводів силовим струмом короткого замикання тощо).

3. Розглянуто особливості роботи систем грозозахисту ліній довго – іскровими розрядниками та мультикамерними розрядниками. Зазначено, що для таких розрядників характерна складність конструкції та застосовуваних матеріалів більш вразливих (порівняно з ОПН чи ІІІ) на тривалий негативний вплив зовнішнього середовища. Також необхідно зазначити, що мультикамерна система допускає об'єднання окремих розрядів, що відбуваються між суміжними електродами, в єдиний канал, що негативно позначається на електрообладнанні лінії електропересилання, в якій використовується ізолятор, а також знижує термін експлуатації самого ізолятора. Ці особливості іскрових та мультикамерних розрядників слід враховувати для розрахунків надійності систем захисту з такими розрядниками.

4. Проведено аналіз заходів для підвищення ефективності грозозахисту ЛЕП за рахунок зменшення опору заземлення опор, застосування грозозахисного троса та обрання оптимального кута захисту грозо-захисного троса. Зазначено, що штучне зменшення опору заземлення опор хімічним методом відносно не довготривале

5. Розглянуто основні переваги та особливості застосування обмежувачів перенапруг для захисту ЛЕП з номінальними напругами 6-750 кВ. Зазначено, що для зменшення грозових уражень ліній надвисокої напруги, як правило, ОПН монтують на порталних опорах, що мають горизонтальне розташування фаз.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ МЕТОДИКИ ЧИСЕЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ ФАКТОРІВ

2.1 Загальні положення

Надійність грозозахисту повітряних ліній електропересилання тим вища, чим менша кількість аварійних відключень ліній через грози за певний період часу. Характерною особливістю систем грозозахисту ЛЕП є повне відновлення їх захисних властивостей після успішної ліквідації аварій, викликаних грозою. Тому в грозозахисті інтенсивність грозових пошкоджень визначається тільки частотою грозових впливів і здатністю об'єкта протистояти кожному удару блискавки.

Основним показником надійності грозозахисту прийнято ймовірну кількість випадків β виникнення аварійного результату [11,17,38]:

$$\beta = N \cdot P_{ав}, \quad (2.1)$$

де N - кількість ударів блискавки в об'єкт протягом року;

$P_{ав}$ - ймовірність аварійного результату під час одного удару блискавки.

Для ЛЕП ймовірну кількість відключень β згідно з (2.1) визначають як [11]:

$$\beta = N_0 \cdot L_n \cdot P \cdot \eta_D = N \cdot P_{ав}, \quad (2.2)$$

де N_0 - кількість ударів, що припадають на 1 км лінії за рік;

L_n - довжина лінії;

P - ймовірність імпульсного розряду на лінії для одного удару блискавки;

η_D - коефіцієнт переходу імпульсного перекриття в силову дугу.

Частота грозових впливів залежить від особливостей місцевості та конструктивного виконання об'єкта. Для її розрахунку є певні рекомендації в

керівних вказівках щодо захисту від перенапруг [4,30,71]. Методика визначення цієї величини вдосконалюється в міру накопичення даних досліджень грозової діяльності і вивчення механізму грозових розрядів. В даний час детальнішого вивчення вимагає друга складова показника надійності - ймовірність P імпульсного розряду на лініях і підстанціях за одного їх ураження блискавкою.

Ймовірність імпульсного розряду на об'єкті під час грозового ураження визначається сукупністю випадкових факторів: параметрами хвилі струму блискавки, станом ізоляції, параметрами атмосферного повітря, віддаленням місця удару блискавки від об'єкта тощо. Ці випадкові фактори можна розглядати як багатовимірний вектор випадкових величин $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Оскільки розряд в ізоляції настає за різних поєднань координат цього вектора, то може бути виділена n -мірна область D і подія, яка визначається тим, що вектор випадкових величин \vec{x} опиниться в межах цієї області та буде відповідати виникненню розряду.

Для визначення ймовірності P імпульсного розряду необхідно мати вираз густини розподілу $f(\vec{x})$ багатовимірного вектора \vec{x} і знати межі інтегрування за координатами x_k , тобто межі області інтегрування D , яку надалі ми будемо називати областю небезпечних параметрів [38].

2.2 Особливості визначення області небезпечних параметрів

Область небезпечних параметрів D - це сукупність поєднань координат багатовимірного вектора \vec{x} , за яких настає порушення міцності ізоляції. Виявлення меж цієї області необхідно не тільки для встановлення меж інтегрування за координатами x_k вектора \vec{x} , а й для якісного аналізу впливу окремих факторів на грозостійкість об'єкта.

Зі сукупності координат вектора \vec{x} виділимо ті, що залежать від факторів, які впливають на формування на ізоляції об'єкта перенапруг випадкової форми. Це параметри хвилі струму блискавки (амплітуда I , крутизна фронту a , довжина хвилі τ), миттєве значення робочої напруги u_p в момент удару, відстань b від місця удару

блискавки в землю до осі лінії, що враховується за впливу індукованих напруг. Всі ці величини згрупуємо в окремий вектор

$$\vec{x}' = (b, u_p, I, a, \tau). \quad (2.3)$$

Решта факторів, що впливають тільки на розподіл розрядних напруг ізоляції $u_{розр}$ і враховують метеорологічні умови - m , стан ізоляції - c , природну зміну розрядних напруг - $\dot{u}_{розр}$ для нормальних метеорологічних умов і станів ізоляції (зведених розрядних напруг) згрупуємо у вектор

$$\vec{x}'' = \left(m, c, \dot{u}_{розр} \right). \quad (2.4)$$

Надалі слід чітко розрізняти реальні розрядні напруги $u_{розр}$ і розрядні напруги, зведені до нормальних метеорологічних умов і стану ізоляції $\dot{u}_{розр}$.

Розглянемо спосіб визначення області D для випадку, коли ізоляція характеризується допустимим рівнем впливу $u_{дон}$ [38,72]. Зафіксувавши значення розрядної напруги ізоляції величиною $u_{дон}$, ми тим самим розподіл випадкових факторів \vec{x}'' замінюємо їх математичним сподіванням. Тому формула (2.1) зводиться до вигляду [73]:

$$P = \int \int_D \dots \int f(\vec{x}') \prod_{k=1}^m dx_k'. \quad (2.5)$$

Для обґрунтування вибору області D в розглянутій задачі необхідно користуватися поняттями функцій випадкових величин.

Нехай є двомірний вектор випадкових величин $\vec{x} = (x_1, x_2)$ з густиною розподілу $f = f(x_1, x_2)$. Випадкова величина Y пов'язана з вектором \vec{x} функціональною

залежністю $Y = y(x_1, x_2)$. Визначимо ймовірність того, що функція Y прийме значення $Y \geq y_k$.

Побудуємо поверхню $Y = y(x_1, x_2)$ і прийнявши ряд значень функції Y , проведемо ряд площин Q , паралельних площині $x_1 O x_2$ на відстанях від неї, рівних прийнятим значенням Y . Нехай k -та площина Q_k перетне поверхню $Y = y(x_1, x_2)$ по деякій кривій $y(x_1, x_2) = y_k$, проекції якої на площину $x_1 O x_2$ поділяють цю площину на дві області D і D' . Для області D відстань між площинами Q і $x_1 O x_2$ менше y_k , для області D' - більше y_k . Якщо площину розподілу $f(x_1, x_2)$ проінтегрувати по області D' , то отримаємо ймовірності значень функції Y , що перевищують y_k [73]:

$$p(Y \geq y_k) = \iint_{(D')} f(x_1, x_2) dx_1, dx_2. \quad (2.6)$$

Межі області D' визначає крива $y(x_1, x_2) = y_k$ яка називається лінією рівня.

Визначаючи ймовірність імпульсного розряду за формулою (2.5), ми тим самим фактично визначаємо ймовірність перевищення виникаючих на ізоляції напруг u відносно величин допустимого рівня $u_{дон}$. Внаслідок цього в нашому випадку області D і D' збігаються. Оскільки напруга на ізоляції u є функцією ряду випадкових аргументів (параметрів хвилі струму блискавки, віддалення місця удару тощо) то за аналогією з залежністю, яка визначає область D' , можна написати залежність для визначення області D :

$$y(\vec{x}') = u_{дон}. \quad (2.7)$$

Для випадку двомірного вектора $\vec{x}' = (I, a)$ крива рівня (2.7) отримала в енергетиці назву кривих небезпечних параметрів [11].

Аналітичне вираження області небезпечних параметрів можна отримати тільки в деяких окремих випадках. У більшості ж задач зв'язок між параметрами хвилі струму блискавки (I, a, τ) , віддалення b від місця удару і параметрами хвилі напруги

на ізоляції внаслідок впливу ряду факторів не може бути представлений за допомогою аналітичних виразів. Це вимагає застосування чисельного інтегрування виразу (2.5).

У розглянутому вище випадку чисельне інтегрування виразу (2.5) пропонуємо здійснювати за елементами $\Delta\bar{x}'$ простору \bar{x}' , що належить області небезпечних параметрів. Очевидно, що кожному елементу простору відповідає певне значення вектора \bar{x}' . Для виявлення приналежності розглянутого елемента до області небезпечних параметрів необхідно для заданого поєднання координат вектора \bar{x}' обчислити значення напруги u на ізоляції і порівняти його з $u_{дон}$. Умова $u \geq u_{дон}$ є ознакою приналежності розглянутого елемента до області небезпечних параметрів.

З метою здійснення чисельного інтегрування вираз (2.5) представимо у вигляді:

$$P = \sum_{x_m} \Delta F(x_m) \cdot \sum_{x_{m-1}} \Delta F(x_{m-1}) \dots \sum_{x_2} \Delta F(x_2) \cdot \sum_{x_1} \Delta F(x_1) = \prod_{k=1}^m \sum_{x'_k} \Delta F(x'_k), \quad (2.8)$$

де $\Delta F(x'_k)$ - ймовірність потрапляння k -того параметра в заданий інтервал, що рівна $f(x_k) \Delta x_k$ або різниці значень функції розподілу $F(x_k)$ по краях інтервалу.

Формула (2.8) справедлива для незалежних випадкових величин, однак, як буде показано нижче, вона може бути застосована і для корельованих величин, якщо користуватися умовними законами розподілу.

Надавши у формулі (2.8) максимальні значення тим чинникам, зі збільшенням яких напруга u на ізоляції збільшується і мінімальні значення тим чинникам, зі зростанням яких напруга u зменшується та прийнявши відповідні прирости всіх параметрів Δx_k на першому кроці інтегрування ми обов'язково будемо знаходитися в межах області D . Змінюючи значення першого фактора x_1 і розраховуючи на кожному кроці напругу u , яка буде зменшуватися, відзначимо момент, коли u стане рівна допустимій нарузі на ізоляції $u_{дон}$. Це означає, що досягнута межа області інтегрування.

Оскільки процес інтегрування поширюється тільки на область D , то після досягнення її межі, тобто умови $u = u_{дон}$, слід відновити початкове значення першого

фактора, змінити на Δx_2 значення другого і знову варіювати по першому фактору до повторного досягнення умови $u = u_{дон}$. Пройшовши таким чином весь або частину діапазону зміни другого чинника, слід змінити на Δx_3 значення третього і т.д. Отже, ознакою межі області D , а також ознакою необхідності зміни на величину Δx_{k+1} фактора x_{k+1} і відновлення початкового значення фактора x_k є досягнення умови $u = u_{дон}$.

Очевидно, що фіксація значень параметрів, відповідних межі області D , в процесі обчислення ймовірності P необов'язкова. Проте у ряді випадків для отримання наочної картини, тобто для оцінки ступеня впливу на грозостійкість об'єкта окремих факторів, доцільно отримати окремі криві або поверхні (сімейства кривих) небезпечних параметрів.

Нехай, наприклад, напруга на ізоляції визначається тільки двома чинниками - амплітудою та крутизною струму блискавки. Якщо під час обчислення ймовірності P фіксувати значення I, a , відповідні умові $u = u_{дон}$, то одержимо криву небезпечних параметрів (КНП) (рисунок 2.1).

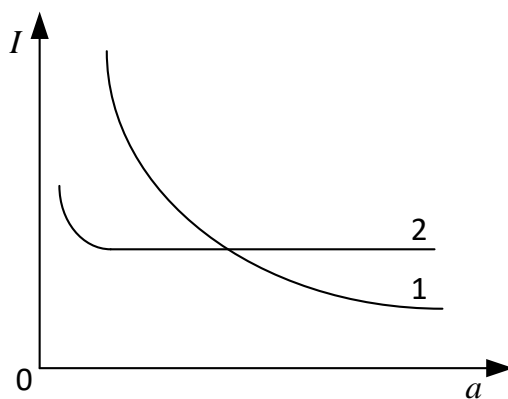


Рисунок 2.1 – Крива небезпечних параметрів струму блискавки

Крива 1 свідчить про значний вплив на грозостійкість об'єкта розподілів і амплітуди, і крутизни струму блискавки. Крива 2 показує, що розрахунки можна спростити шляхом врахування середнього значення крутизни замість реального її розподілу.

Припустимо, що амплітуда напруги на ізоляції залежить і від третього чинника - відстані b до місця удару блискавки. У даному випадку для оцінки впливу окремих факторів на грозостійкість об'єкта необхідно побудувати поверхню небезпечних параметрів. Однак і побудова, і аналіз розташування поверхні стосовно осей I, a, b становлять певні труднощі.

Більш доцільно виділити окремі розрізи поверхні, відповідні різним значенням одного з параметрів, наприклад, b_1, b_2, b_3, \dots і нанести в площині двох решту параметрів кривих, відповідні виділеним перерізам (рисунок 2.2). Отримане таким чином сімейство кривих небезпечних параметрів досить зручно використовувати для аналізу. Виділення сімейства кривих в процесі розрахунку ймовірності P здійснюється за умовою $u = u_{\text{дон}}$ для заданих значень параметра b і різних значень параметрів I та a .

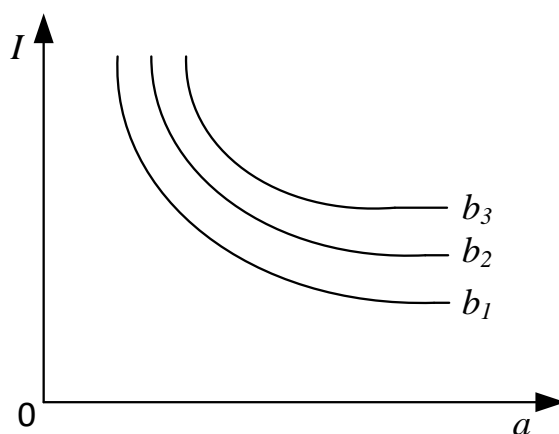


Рисунок 2.2 – Сімейство кривих небезпечних параметрів струму блискавки

Розглянемо особливості визначення області D для випадку врахування чинників \vec{x}'' . Представимо формулу (2.2) аналогічно (2.8) у розгорнутому вигляді

$$P = \sum_b \Delta F(b) \dots \sum_{\tau} \Delta F(\tau) \cdot \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot \sum_{\substack{\dot{u}_{\text{розр}} \\ u_{\text{розр}}}} \Delta F \left(\dot{u}_{\text{розр}} \right). \quad (2.9)$$

Розрахунок за цією формулою слід починати з таких значень факторів \vec{x}' , що формують на ізоляції напругу u максимальної амплітуди і таких значень факторів \vec{x}''

за яких розрядна напруга ізоляції $u_{розр}$ стає мінімальною. Відповідно до викладеного вище алгоритму розрахунку, перш ніж змінити Δx на значення наступного чинника, необхідно варіювати попередній фактор по всьому діапазону його зміни, або до значення, за якого досягається умова $u = u_{доп}$. В даному випадку значення $u = u_{розр}$. Воно змінюється залежно від значень $m, c, \dot{u}_{розр}$ і на кожному кроці розрахунку може бути обчислено для заданих $m, c, \dot{u}_{розр}$. Будучи розрядною напругою ізоляції, напруга $u_{доп}$ має межі зміни $u_{розр.мін} \leq u_{доп} \leq u_{розр.макс}$.

Надавши координатам вектора \vec{x}' значення, що визначають $u = u_{макс}$ і факторам $m, c, \dot{u}_{розр}$ значень, що визначають $u_{розр.мін}$ процес розрахунку починаємо зі збільшення $\dot{u}_{розр}$ від $\dot{u}_{розр.мін}$, паралельно обчислюючи значення $u_{розр}$ і порівнюючи його з u . Якщо за досягнення $\dot{u}_{розр.макс}$ все ж $u > u_{розр}$, то слід відновити $\dot{u}_{розр.мін}$ і замінити на Δc фактор c . Може статися так, що після варіювання по всьому діапазону фактора c , а потім і фактора m значення напруги u все ж перевищує верхню межу розрядних напруг $u_{розр.макс}$.

Така ситуація можлива і для інших, не обов'язково визначаючих $u = u_{макс}$ координатах вектора \vec{x}' . Це означає, що вектор \vec{x}' знаходиться в межах області небезпечних параметрів, ще не досягнувши її межі. При цьому значення виразу

$$P = \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot \sum_{\dot{u}_{розр}} \Delta F(\dot{u}_{розр}). \quad (2.10)$$

дорівнює одиниці, оскільки досліджено повний діапазон кожного з факторів вектора \vec{x}'' . Оскільки сформованій факторами вектора \vec{x}' напрузі u протиставляється певна розрядна напруга ізоляції з діапазону $u_{розр.мін} \div u_{розр.макс}$, то можна говорити про ймовірність розряду $P(u)$. В даному випадку ця ймовірність дорівнює одиниці, тому, що $u > u_{розр.макс}$.

Припустимо, що певні значення факторів вектора \vec{x}' дозволяють досягти рівності $u = u_{розр}$. Тепер варіювання виконується не по всьому діапазону розподілу вектора \vec{x}'' і значення виразу (2.10) стає менше одиниці. В даному випадку вектор \vec{x}' розташований також в області небезпечних параметрів, оскільки удар блискавки здатний викликати аварійний результат.

І, нарешті, якщо сформована факторами \vec{x}' напруга $u \leq u_{розр.мін}$, то ймовірність розряду і значення виразу (2.10) дорівнює нулю. Вектор \vec{x} розташований за межами області небезпечних параметрів.

Отже, за врахування факторів \vec{x}'' умова $u = u_{дон}$ може бути досягнутою і за допомогою зміни факторів \vec{x}' , що формують u . Область небезпечних параметрів визначається в даному випадку всіма факторами багатовимірного вектора \vec{x} та оскільки цих факторів більше, ніж під час розрахунків по заданому імпульсному рівню, то можливості оцінки впливу кожного з них на величину P за допомогою кривих або сімейств кривих небезпечних параметрів різко обмежується.

Як зазначалось вище, у виразі (2.10) $P(u)$ - ймовірність порушення міцності ізоляції, за впливу напруги u , сформованої факторами вектора \vec{x}' . Тому можна цю ймовірність обчислювати окремо на кожному кроці розрахунку як :

$$P(u) = \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot \sum_{u_{розр}} \Delta F\left(\dot{u}_{розр}\right). \quad (2.11)$$

В процесі обчислення цієї ймовірності на межі області небезпечних параметрів можна буде фіксувати тільки координати вектора \vec{x}' . При цьому для факторів вектора \vec{x}' можна буде будувати криві або сімейства кривих небезпечних параметрів з урахуванням ймовірності $P(u)$. Вплив цієї ймовірності, як показують викладені вище міркування, проявляється в тому, що біля межі області небезпечних параметрів виникає зона, в якій $P(u) < 1$. Для двовимірного вектора \vec{x}' ця зона обмежується двома кривими, які можуть бути отримані в процесі обчислень за формулою (2.9) і фіксації значень параметрів на межі зон $P(u) = 1$ і $P(u) = 0$, а також за допомогою обчислень

по допустимому імпульсному рівню за $u_{\text{дон}_1} = u_{\text{розр.мін}}$ і $u_{\text{дон}_2} = u_{\text{розр.макс}}$ (рисунок 2.3). У виділеній зоні можна нанести криві, що відповідають певним значенням ймовірності $P(u)$.

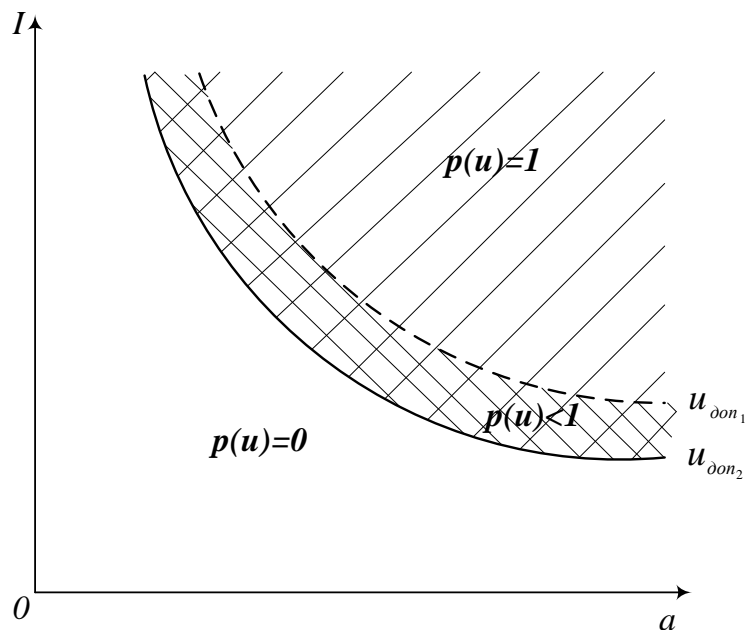


Рисунок 2.3 – Область небезпечних параметрів струму блискавки з врахуванням факторів вектора \vec{x}''

Під час обліку факторів \vec{x}'' межа області небезпечних параметрів опускається нижче межі області, отриманої заміною розподілів \vec{x}'' їх математичними сподіваннями, тобто під час розрахунку по рівню $u_{\text{дон}}$. Однак розрахункова грозостійкість об'єкта за рахунок наявності зони $P(u) < 1$ знижується, при цьому не пропорційно збільшенню області небезпечних параметрів.

Окреме обчислення ймовірності $P(u)$ не тільки розширює можливості аналізу впливу на грозостійкість об'єкта окремих факторів, але і є необхідним для раціональної побудови алгоритму розрахунку ймовірності P .

У зв'язку з цим представимо формулу (2.9) у вигляді

$$P = \prod_{k=m}^n \sum_{x'_k} \Delta F(x'_k) \cdot \prod_{k=1}^m \sum_{x''_k} \Delta F(x''_k) = \prod_{k=1}^{n-m} \sum_{x'_k} \Delta F(x'_k) \cdot P(u). \quad (2.12)$$

Таким чином, процес обчислення ймовірності P з урахуванням факторів \vec{x}'' відрізняється від процесу розрахунку за заданим рівнем імпульсних впливів $u_{\text{дон}}$ визначенням на кожному кроці величини $P(u)$. Ймовірність $P(u)$ стає рівною нулю, якщо амплітуда сформованої факторами \vec{x}' напруги u виявиться меншою або рівною нижній межі розрядних напруг ізоляції. Ця ознака ($P(u) = 0$) дозволяє встановити межі інтегрування по окремих координатах вектора \vec{x}' області небезпечних параметрів.

2.3 Характеристики випадкових факторів, що впливають на ступінь грозостійкості об'єктів системи

2.3.1 Параметри хвилі струму блискавки

Параметри хвилі струму блискавки I, a, τ є предметом багаторічних досліджень. У роботах [11,36,74,75] наведено узагальнені результати досліджень амплітуд і крутизи фронту хвиль струмів блискавки. В [11] рекомендують для практичних розрахунків користуватись експоненційними законами розподілу цих параметрів

При цьому передбачається, що взаємний зв'язок між I, a проявляється слабо.

$$F(I) = 1 - e^{(-I/26)}; f(I) = \frac{1}{26} \cdot e^{(-\frac{I}{26})}. \quad (2.13)$$

$$F(a) = 1 - e^{(-a/16)}; f(a) = \frac{1}{16} \cdot e^{(-\frac{a}{16})}. \quad (2.14)$$

Автори ряду робіт [39,76-78], базуючись на даних спільних реєстрацій амплітуд і крутизи фронту хвиль струму блискавки, вказують на наявність досить тісного кореляційного зв'язку між I, a (коефіцієнт кореляції дорівнює $0,6 \div 0,64$) і зроблено спроби його врахування для практичних розрахунків грозостійкості об'єктів енергосистем [12,79].

За необхідності врахування кореляційного зв'язку між параметрами I, a формулу (2.9) слід записати у вигляді

$$P = \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_\tau \Delta F(\tau) \cdot \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_a \Delta F\left(\frac{a}{I}\right) \dots \sum_{i_{розр}} \Delta F\left(\dot{i}_{розр}\right), \quad (2.15)$$

де $F\left(\frac{a}{I}\right)$ - умовна функція розподілу крутизни фронту хвилі струму блискавки.

У розглянутому випадку необхідно мати сімейство умовних функцій розподілу $F\left(\frac{a}{I}\right)$, побудованих для значень амплітуд струмів $I > I_k$, де I_k - межі інтервалів ΔI , на які розбивається діапазон зміни амплітуд струмів блискавки. Кількість кривих сімейства має дорівнювати або бути кратною кількості інтервалів ΔI з тим щоб під час переходу від одного інтервалу струму до іншого або через n інтервалів здійснювався перехід на відповідну новому струму криву сімейства $F\left(\frac{a}{I_k}\right)$. На рисунку 2.4 наведено сімейство кривих $F\left(\frac{a}{I}\right)$, побудованих через 10 кА за результатами спільних реєстрацій [77,78,80] амплітуд і крутизн фронту хвиль струмів блискавки, зведених нами в таблицю 2.1.

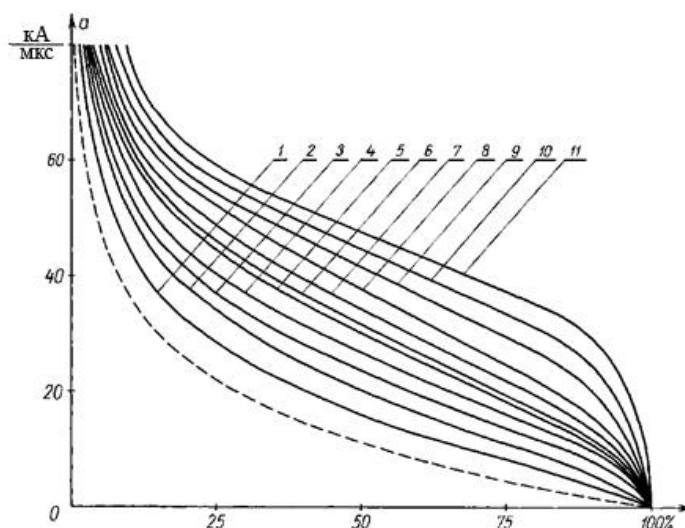


Рисунок 2.4 – Сімейство ймовірнісних кривих розподілу крутизн струмів для ударів блискавок зі струмами: 1- $I < 10\text{кА}$; 2- $I > 10\text{кА}$; 3- $I > 20\text{кА}$; 4- $I > 30\text{кА}$; 5- $I > 40\text{кА}$; 6- $I > 50\text{кА}$; 7- $I > 60\text{кА}$; 8- $I > 70\text{кА}$; 9- $I > 80\text{кА}$; 10- $I > 90\text{кА}$; 11- $I > 100\text{кА}$.

Порівняльні розрахунки ймовірності перекриття ізоляції повітряної лінії електропередавання 330 кВ без урахування взаємного зв'язку між амплітудою та крутизною струму блискавки $P_{I_a} = 0,35$ і з урахуванням кореляційного зв'язку амплітуди й крутизни фронту хвиль струмів блискавки, що відносяться до одного і того ж розряду $P_{I_a} = 0,013$ підтверджує необхідність врахування взаємного зв'язку між амплітудою і крутизною.

Таблиця 2.1- Кореляційна залежність між амплітудою I та крутизною фронту a хвиль струму блискавки, які відносяться до одного і того ж розряду.

$I, \text{кА}$ $a, \text{кА}/\text{мс}$	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 80	80 - 90	90 - 100	100 - ∞
0 - 10	93	54	30	18	7	3	0	2	0	2	0
10 - 20	39	50	60	40	28	18	9	6	3	0	0
20 - 30	11	14	23	13	11	11	11	5	2	0	0
30 - 40	3	7	14	7	9	5	7	6	4	3	8
40 - 50	0	0	3	4	5	1	1	1	2	1	4
50 - 60	0	0	0	1	1	1	1	2	0	2	5
60 - 70	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
70 - 80	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
80 - 90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90 - 100	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

Статистичні дані результатів дослідження довжини хвилі струму блискавки узагальнені в [39]. Функція розподілу для довжини хвилі струму блискавки (рисунки 2.5) дуже близька до нормального закону розподілу.

Тому можна записати

$$F(\tau) = 1 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\tau - \tau_{cp})^2}{2\sigma^2}} d\tau,$$

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\tau - \tau_{cp})^2}{2 \cdot \sigma^2}}. \quad (2.16)$$

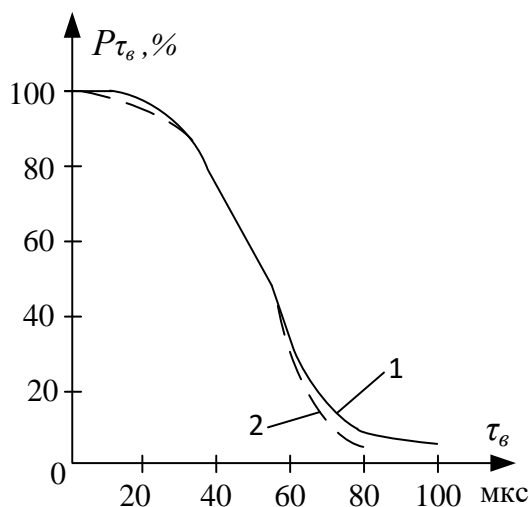


Рисунок 2.5 – Статистична (1) та апроксимована нормальним законом розподілу (2) функції розподілу довжини хвилі струму блискавки

У відомих джерелах відсутня інформація про наявність взаємного зв'язку між довжиною хвилі струму блискавки, її амплітудою та крутизною фронту, проте формула (2.9) дозволяє врахувати його аналогічно врахуванню кореляційного зв'язку між параметрами хвилі I, a струму блискавки.

2.3.2 Миттєве значення робочої напруги в момент удару

Для електричних мереж середнього, високого та надвисокого класів напруг значний вплив на надійність грозозахисту має миттєве значення робочої напруги u_0 в момент розряду блискавки [81,82].

Згідно з [1,31] приймають, що в момент удару блискавки, на проводі наявна робоча напруга, протилежна по знаку імпульсній напрузі на опорі, яка збільшує величину перенапруги та сприяє перекриттю ізоляції. Перекриття виникає за умови, коли сума імпульсних і робочого значень напруги проводу досягає розрядної напруги лінійної ізоляції, яка визначається вольт – секундною характеристикою для розрядів на фронті імпульсу перенапруги, тобто коли:

$$U_{имн}(t) + u_0(\varphi) \geq U_{розр}^+(t). \quad (2.17)$$

Під час врахування миттєвого значення u_0 робочої напруги лінії електропередавання в момент розряду блискавки приймають деякі спрощення. В існуючих моделях вплив напруги u_0 на ймовірність порушення грозостійкості об'єктів еквівалентують шляхом збільшення напруги на ізоляції $u(t)$, (розрахованої без врахування робочої напруги) на величину u_{cp} - середнього за півперіод значення фазної робочої напруги. Відповідно до [1,31] $u_0 = 0,655 \cdot u_{роб.нб}$. Такий спосіб врахування u_0 є штучним.

Для забезпечення адекватної відповідності природнім процесам, під час врахування робочої напруги, у випадку розміщення траверс на різній висоті, слід досліджувати, на наш погляд, перекриття ізоляційних проміжків не лише для верхньої (геометрично) фази, а й для інших фаз (середньої та нижньої). Досвід експлуатації показує, що біля 35% зворотніх перекриттів виникають на нижніх фазах. Під час удару блискавки в опору ЛЕП, фази якої мають різну висоту підвісу проводів, значення функції $u(t)$ завжди є найбільшим для ізоляції верхньої фази. Очевидно, що перекриття ізоляції нижніх фаз стає можливим, якщо миттєве значення u_0 робочої напруги на одній з цих фаз разом з напругою на ізоляції $u(t)$ за удару блискавки в опору викликають напругу $u'_c(t)$ або $u'_н(t)$, яка буде більшою ніж відповідна напруга $u_e(t)$. Отже, робоча напруга викликає перерозподіл перекриттів між фазами, збільшує їх кількість і, таким чином, знижує грозостійкість об'єкта.

Нами запропонований наступний метод врахування впливу напруги u_0 . Розділимо період зміни миттєвого значення робочої напруги на n інтервалів. Збільшення кількості інтервалів поділу збільшує час розрахунку, але й підвищує точність розрахунку. Розрахуємо для всіх n інтервалів миттєве значення робочої напруги u_0 , напруги на ізоляції $u'(t) = u_0 + u(t)$ та ймовірність u_0 для кожної із трьох фаз. Якщо для m інтервалів $P(u)'$ стає рівною одиниці хоча б для однієї з фаз, то

ймовірність порушення міцності ізоляції об'єкта з врахуванням впливу робочої напруги $P(u, u_0)$ буде рівна відношенню m/n . При цьому можна визначити також імовірність перекриття ізоляції в кожній фазі окремо.

Викладені вище міркування відобразимо під час виконання розрахунків на прикладі ЛЕП, напругою 220 кВ, яка виконана опорами типу П-220-2.

Розділяємо період робочої напруги $u_0 = u_{роб}$ на 9 інтервалів та визначаємо її значення в кожному інтервалі за формулою:

$$u_{роб_i} = u_{роб.нб} \cdot \cos \left[(n-i) \cdot \Delta\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right], \quad (2.18)$$

де $u_{роб}$ - значення найбільшої робочої напруги;

n - кількість інтервалів поділу; i - номер інтервалу;

$\Delta\varphi$ - градусна міра відповідного сектору.

Рівняння, яке визначає можливість перекриття ізоляційних проміжків має вигляд:

$$U_{всх}(t_i) = A_i \cdot f(t_i) + U_{роб}, \quad (2.19)$$

де A_i – крутизна фронту блискавки для i -го часу її фронту;

$U_{роб} = 0,655 \cdot U_{роб.нб}$ - значення робочої напруги за [2,31];

$f(t_i)$ – закон розподілу часу фронту блискавки для i -го інтервалу.

За формулами [1,2,31] обчислюємо закони розподілу часу фронту блискавки – залежності $f_e(t_i), f_c(t_i), f_n(t_i)$. Результати розрахунків закону розподілу часу фронту блискавки відображено на рисунку 2.6.

Алгоритм розрахунку ймовірностей $P(u, u_0)$ для ЛЕП базується на використанні n -кратного інтегралу по області D від густини розподілу $f(\vec{x})$ n -мірного вектора \vec{x} випадкових величин [7].

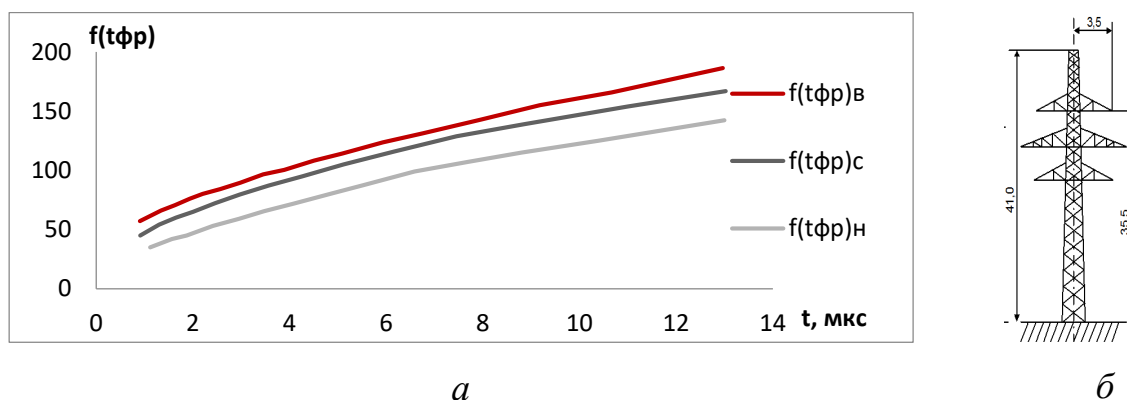


Рисунок 2.6 - а - Закони розподілу часу фронту блискавки для трьох фаз;
б - ескіз опори типу П-220-2

$$P = \oint \dots \oint f(\vec{x}) \prod_{k=1}^n dx_k. \quad (2.20)$$

В (2.20) в якості (\vec{x}) необхідно прийняти вектор випадкових величин, який визначає грозостійкість об'єкту, а в якості області D (замкнутий контур інтегралу) - область значень цих величин, за яких настає порушення міцності ізоляції (область небезпечних параметрів).

З метою реалізації чисельного інтегрування, у відповідності з (2.20), ймовірність P порушення міцності ізоляції за одного удару блискавки і випадкових значеннях всіх величин, які визначають надійність грозозахисту об'єкта, представимо як:

$$P = \sum_{x_n} \Delta F(x_n) \dots \sum_{x_2} \Delta F(x_2) \cdot \sum_{x_k} \Delta F(x_k) = \prod_{k=1}^n \sum_{x_k} \Delta F(x_k), \quad (2.21)$$

де $\Delta F(x_k)$ - імовірність попадання k -ї випадкової величини в заданий інтервал, яка відповідає значенню функції розподілу $F(x_k)$ по краях заданого інтервалу.

Чисельно інтегрування згідно з (2.21) реалізується шляхом варіювання величини x_k по елементах Δx_k , які належать до області небезпечних параметрів. Формула (2.21) справедлива для незалежних випадкових величин, проте її можна застосовувати і для корельованих величин, якщо використовувати умовні закони розподілу.

Виділимо з координат вектора \vec{x} величини, які формують на ізоляції об'єкту перенапругу $u(t)$ випадкової форми. Це параметри хвилі струму блискавки I, A, τ , миттєве значення робочої напруги u_0 в момент розряду блискавки, відстань b від місця удару блискавки в землю до осі лінії, яке враховується під час взаємодії індукованих напруг. Згрупуємо їх в окремий вектор і запишемо формулу наступним чином:

$$P = \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_A \Delta F(A) \cdot \sum_\tau \Delta F(\tau) \cdot P(u, u_0) \quad (2.22)$$

Під час виконання розрахунків за врахування реального значення u_0 достатньо враховувати лише три випадкових фактори: I, A, u_0 . Враховуючи твердження, що перекриття ізоляційного проміжку (гірлянди) відбувається на фронті хвилі, амплітуда та крутизна фронту хвилі струму блискавки пов'язані залежністю $I = A_i \cdot t_{\text{фр}i}$ формулу (2.22) можна записати у вигляді:

$$P = \sum_A \Delta F(A) \cdot P(u, u_0). \quad (2.22)$$

Для вибраних значень A_i беремо значення u_0 для найнесприятливішого випадку, коли u_0 зменшує величину перенапруги, прикладеної до ізоляційного проміжку (гірлянди ізоляторів). Для прискорення розрахунків можна використати формулу:

$$A_i = \frac{U_{\text{всх}}(t_i) - u_{0i}}{f(t_i)}. \quad (2.23)$$

Звідси для найнесприятливішого значення u_0 (для кутів 170° або 190°) визначаємо A_i . За таких значень A_i та u_0 (для кутів 170° або 190°) перекриття ізоляційного проміжку становить 100%. Змінюємо значення u_0 і визначаємо чи за таких значень A_i є можливим перекриття ізоляційного проміжку на середній та

нижній фазах. Після розрахунку масиву значень A_i отримуємо сімейство кривих та будуємо криві небезпечних параметрів (рисунок. 2.7).

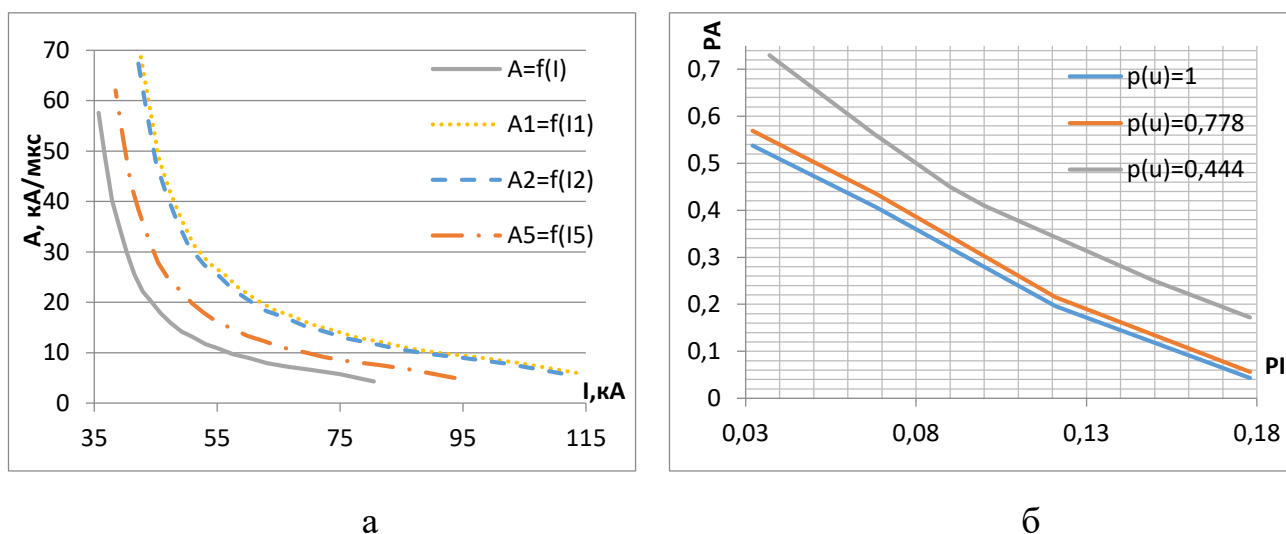


Рисунок 2.7 - КНП для 1,2 та 5 інтервалів і КНП за врахування середнього за півперіод значення фазної робочої напруги побудовані в: а - абсолютних координатах; б - ймовірнісних координатах

Імовірність перекриття для цього значення A_i знаходимо як відношення $\frac{m}{n}$.

Масив розрахованих значень A_i перетворюємо в ймовірнісні значення та розраховуємо значення I_i для побудови КНП в ймовірнісних координатах. Розраховуємо значення площ обмежених сімейством кривих та осями для розрахунку загальної ймовірності перекриття ізоляції (за рисунком 2.7) -

$$P = \sum S_{p_i} \cdot P_i = 0,0575 \cdot 1 + 0,0065 \cdot 0,788 + 0,0325 \cdot 0,444 = 0,077.$$

Результати розрахунків відтворюємо у вигляді діаграм (рисунок 2.8), на яких відображено розподіл кутів пробою для кожного проводу. Діаграма відтворює період робочої напруги, який поділено на n інтервалів та містить вектори фаз відносно яких розподілено сектори поділу для кожної з фаз. Сектори симетричні відповідно до вектора конкретної фази для руху за і проти годинникової стрілки. На рисунку. 2.8а відображено можливий розподіл пробитих секторів фаз. На рисунку. 2.8б відображено розподіл пробитих секторів для $A_i = 7,14 \frac{\text{kA}}{\text{mks}}$ за якого верхня фаза

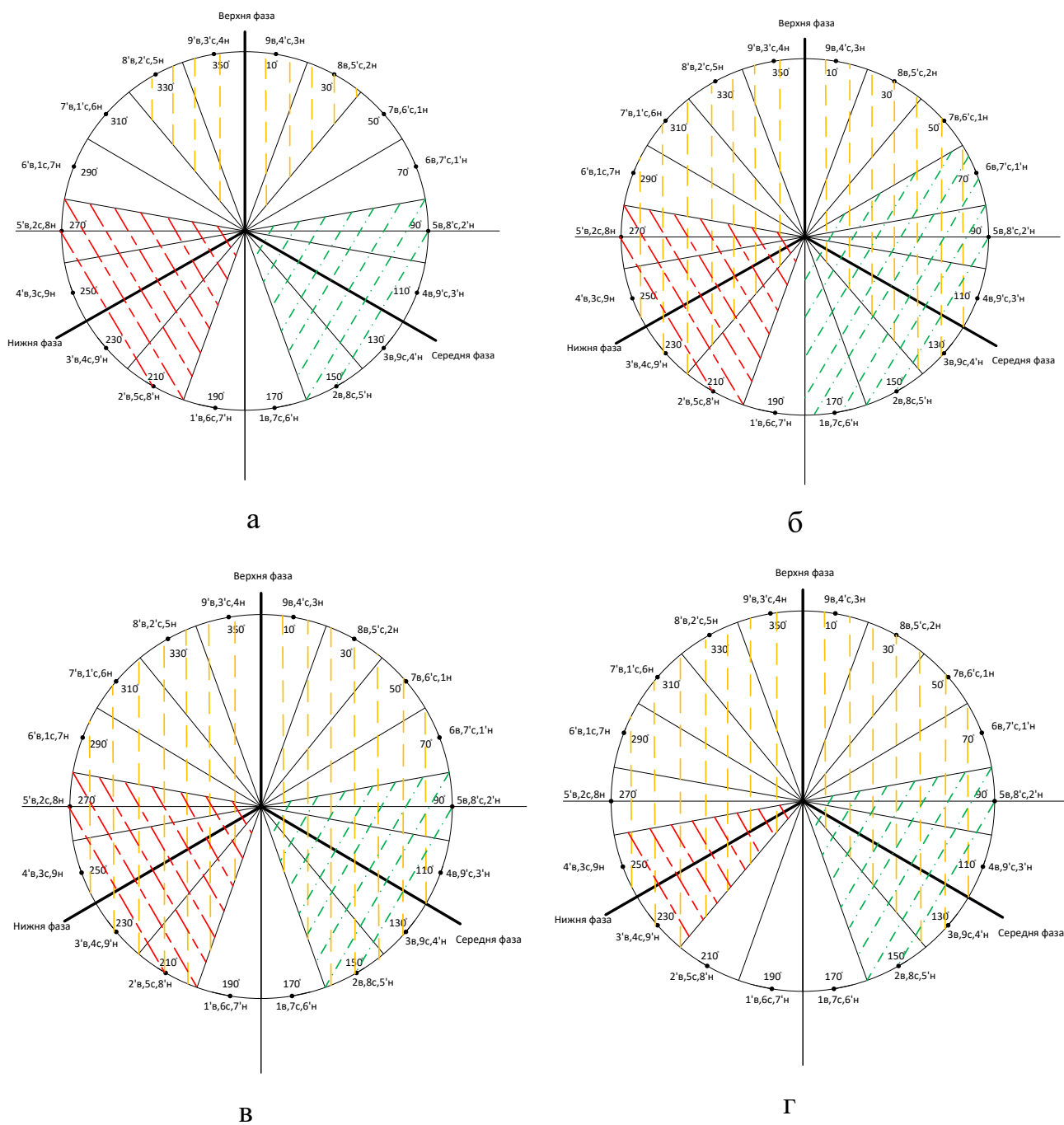


Рисунок 2.8 - Діаграми розподілу кутів пробую для різних проводів ЛЕП

пробивається в 4-9 секторах, середня в 7-9 секторах та нижня у 8-9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,94. На рисунку. 2.8в відображено розподіл пробитих секторів для $A_i = 5,905 \text{ кА/МКС}$, за якого верхня фаза пробивається в 2-9 секторах, середня в 8-9 секторах та нижня у 8-9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,88. На рисунку. 2.8г відображено розподіл пробитих секторів для $A_i = 5,667 \text{ кА/МКС}$ за якого верхня фаза пробивається в 3-9

секторах, середня в 8-9 секторах та нижня у 9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,83.

Аналізуючи КНП в абсолютних одиницях варто зазначити, що використання запропонованого методу збільшує площу безпечних параметрів порівняно з існуючими методиками та зменшує ймовірність перекриття ізоляції.

2.3.3 Імпульсний опір заземлення

Величина імпульсних опорів заземлюючих пристроїв (ЗП) підстанцій та опор ліній електропередач є важливим фактором, що впливає на надійність захисту електроустановок. Під локальним імпульсним опором заземлення розуміється розрахункова величина, рівна відношенню миттєвих значень імпульсної напруги на заземлювачі та імпульсного струму через нього. Імпульсний опір визначається для часів, що не перевищують перших одиниць мікросекунд, коли розтікання відбувається лише з ближньої зони заземлювального пристрою апарату і не охоплює всі заземлюючі пристрої електроустановки [4]. Імпульсний опір заземлювача - величина комплексна, тому в схему заміщення ЗП входять також реактивні елементи. Оскільки під час імпульсних дій не існує такої загальноприйнятої характеристики заземлюючих пристроїв, як поняття стаціонарного опору R за низькочастотних впливів, то для визначення імпульсних характеристик заземлюючих пристроїв необхідно мати криві струму і напруги на ЗП, які потім можуть оброблятися за допомогою різних алгоритмів [40].

Діючими Правилами улаштування електроустановок [4] нормуються найбільші допустимі значення опору заземлення опор повітряних ліній електропередач залежно від питомого опору ґрунту вздовж траси ПЛ (таблиця 2.2).

Такий підхід спрощує проектування, але не відповідає на питання достатності прийнятого технічного рішення.

Розглядаючи питання обсягу випробовувань та вимірювань [30,65,66,68,84,137,139], зазначимо, що вимірювання слід проводити на: всіх опорах з розрядниками, ОПН, захисними проміжками, роз'єднувачами, електрообладнанні з повторними заземлювачами PEN (PE) проводів (у разі використання

заземлювального пристрою одночасно для електроустановок напругою до 1 кВ) – після монтажу, переобладнання, ремонтів, а також в експлуатації не рідше ніж один раз на 6 років; на ПЛ, які відпрацювали 25 років і більше, – за рішенням технічного керівника споживача; на тросових опорах ліній напругами 110 ÷ 150 кВ у разі виявлення на них слідів перекриття або руйнування ізоляторів електричною дугою.

На інших опорах вимірювання слід проводити вибірково на 2 % від загальної кількості опор, особливо на ділянках з найбільш агресивними, зсувними ґрунтами і такими, що видуваються або мають погану провідність, після монтажу, переобладнання, ремонтів, а також в експлуатації не рідше ніж один раз на 12 років [30].

Таблиця 2.2 - Найбільші допустимі значення опору заземлювальних пристроїв повітряних ліній

Характеристика електроустановки та заземлювального об'єкта	Величина, що вимірюється	Значення опору, Ом, не більше
Опори залізобетонні, металеві та дерев'яні, на яких підвішений трос або встановлені пристрої грозозахисту; опори залізобетонні та металеві ПЛ напругою 35 кВ і такі ж опори ПЛ напругами 3÷20 кВ у населеній місцевості, а також заземлювачі електрообладнання, встановленого на опорах ПЛ 110 кВ і вище	Опір заземлювача за питомого опору ґрунту, Ом·м: до 100	10
	більше 100 до 500	15
	більше 500 до 1000	20
	більше 1000 до 5000	30
	більше 5000	$6 \cdot 10^{-3}$
Опори залізобетонні та металеві ПЛ напругою 6 (10) кВ у ненаселеній місцевості	Опір заземлювача за значення питомого опору ґрунту, Ом·м: До 1000 Більше 1000	Забезпечується природною провідністю підземної частини опори 500

Варто також відзначити методи досягнення нормативних значень опору заземлення під час проведення контрольних випробувань в процесі експлуатації. Ґрунти будь-якого роду – пісок, глина, чорнозем – в абсолютно сухому стані мають великий питомий опір (понад 10^4 Ом·м), тобто практично є непровідниками струму. Таким чином, проблема зниження питомого опору ґрунту, який значною мірою визначається властивостями його неоднорідного середовища, є важливою задачею.

Загальний опір заземлення залежить від опору прилеглих до заземлювача шарів ґрунту. Тому можна добитися зниження опору заземлення зниженням питомого опору ґрунту лише в невеликій області навколо заземлювача [41,69].

Сьогодні з цією метою, в місцях з високим питомим опором ґрунту ρ , застосовують різні методи штучного зниження його.

Штучне зниження питомого опору ґрунту досягається або хімічним шляхом за допомогою електролітів, або шляхом укладання заземлювачів в котловани з насипним вугіллям, коксом, глиною [40].

Досвід показав, що максимальне зменшення опору заземлення досягається використанням різних електролітів. Такий спосіб полягає в тому, що навколо заземлювачів ґрунт просочується різними розчинами електроліту: хлористого натрію, хлористого кальцію, сірчаноокислої міді (мідного купоросу) тощо [41].

Недоліком даних способів є коротка тривалість ефекту за використання електролітів, а опір заземлювача зростає в процесі експлуатації.

Контроль опору заземлюючих пристроїв грозозахисту ліній виконується вимірюванням їх стаціонарного опору R . Перехід від вимірюваної величини R до імпульсного опору здійснюється використанням імпульсного коефіцієнта [83].

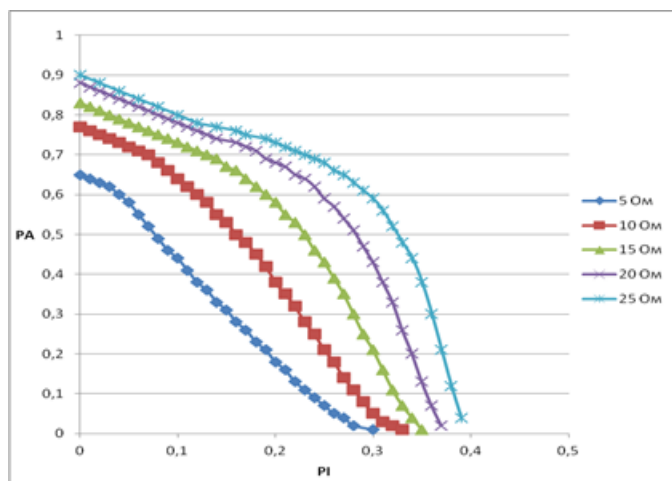


Рисунок 2.9 - КНП для опоры типу ПБ-110-1 напрягою 110 кВ

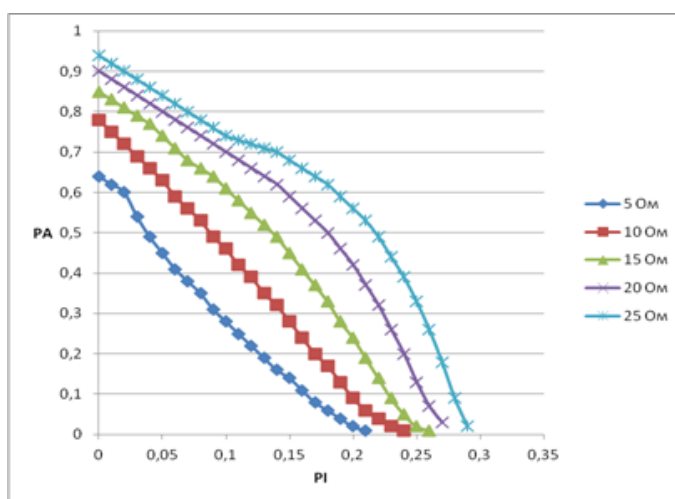


Рисунок 2.10 - КНП для опоры типу П-220-2 напрягою 220 кВ

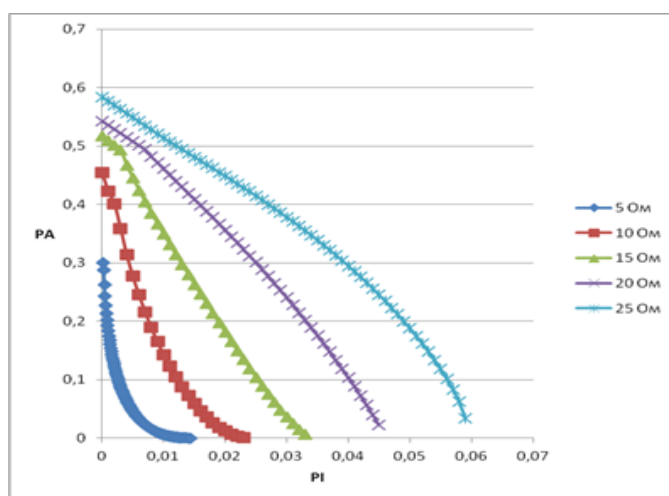


Рисунок 2.11 - КНП для опоры типу П-330-5 напрягою 330 кВ

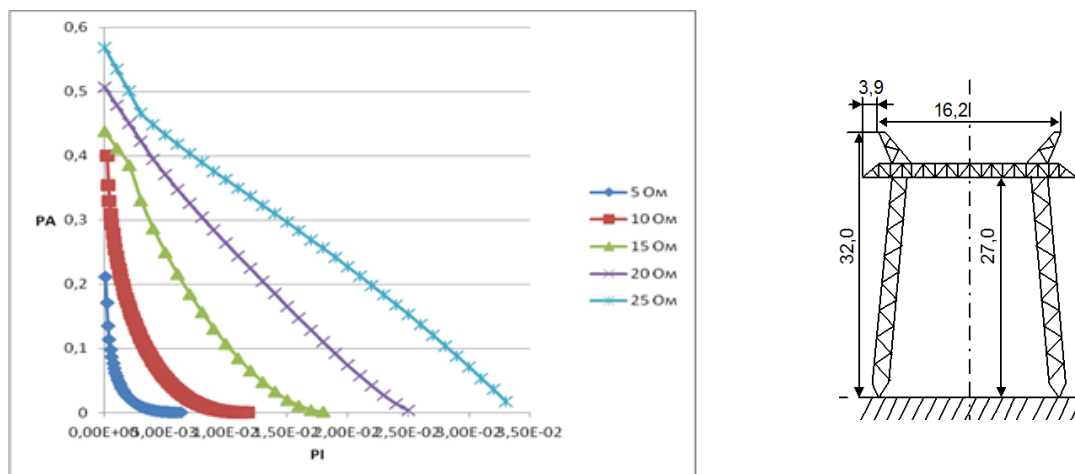


Рисунок 2.12 - КНП для опори типу ПБ-2 напругою 500 кВ

Аналізуючи отримані КНП для окремих типів опор різних класів напруг (рисунки 2.9 – 2.12) були розраховані ймовірності появи небезпечних атмосферних перенапруг від величини імпульсного опору заземлення опори. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.3 та на рисунку 2.13.

Таблиця 2.3 - Результати розрахунків ймовірностей появи небезпечних для ізоляції ПЛ атмосферних перенапруг від величини опору заземлення опори

U, кВ	110	220	330	500	750
R, Ом	P(A,I)	P(A,I)	P(A,I)	P(A,I)	P(A,I)
5	0,112	0,0705	0,00177	0,0007	0,00003
10	0,167	0,1085	0,0054	0,003	0,00015
15	0,186	0,1375	0,0108	0,0043	0,00075
20	0,253	0,169	0,0172	0,0075	0,0015
25	0,28	0,1935	0,0248	0,012	0,0036

Аналізуючи результати необхідно зазначити, що за збільшення імпульсного опору заземлення в 2 рази ймовірність появи небезпечних для ізоляції ЛЕП атмосферних перенапруг для класу напруг 110 ÷ 220 кВ зростає в 1,5 ÷ 1,65 рази, а для класу напруг 330 ÷ 750 кВ зростає ще істотніше.

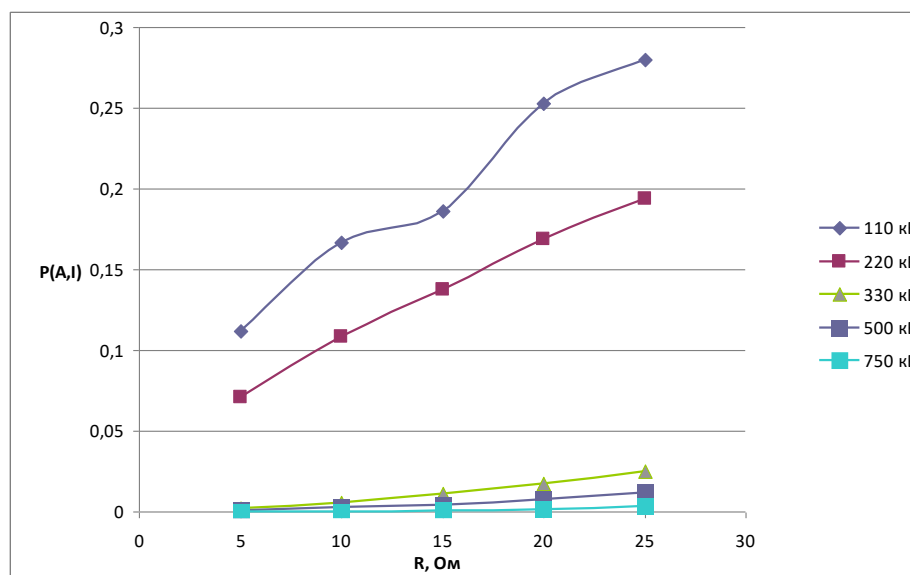


Рисунок 2.13 –Залежності ймовірностей пошкодження ізоляції ЛЕП від величини опору заземлення опори

Величини імпульсних опорів заземлення опор вздовж траси ЛЕП можуть суттєво варіюватись. Зменшуючи величини опорів деяких з опор ЛЕП можна збільшити надійність грозозахисту даних ЛЕП.

2.3.4 Відстань від місця удару блискавки в землю до осі ліній

Оскільки удар блискавки в лінію з однаковою ймовірністю може відбутися на довільній відстані b від осі лінії, то й величина b підпорядкована рівномірному розподілу. Величина b змінюється в межах $b_{\min} \div b_{\max}$. Величину b_{\max} визначають з умови, що удари блискавки з найбільшими значеннями параметрів хвилі струму за межами b_{\max} не викликають на ізоляції об'єкта небезпечних перенапруг, тобто ця відстань являє собою довжину зони небезпечних ударів. Тому, згідно [11], маємо

$$F(b) = \frac{b - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}}, \quad (2.24)$$

$$f(b) = \frac{1}{b_{\max} - b_{\min}}.$$

$$b_{\min} = 4 \cdot h, \quad (2.25)$$

де h - висота підвісу троса.

Враховуючи те, що надійність грозозахисту об'єкта визначається частотою гроз та ймовірністю аварійного результату для одного ураження об'єкта блискавкою, запишемо

$$\begin{aligned}
 \beta &= n_0 \cdot k \cdot (b_{\max} - b_{\min}) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \dots \sum_{i_{\text{розр}}} \Delta F(\dot{i}_{\text{розр}}) = \\
 &= \frac{n_0 \cdot k \cdot (b_{\max} - b_{\min})}{(b_{\max} - b_{\min})} \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \dots \sum_{i_{\text{розр}}} \Delta F(\dot{i}_{\text{розр}}) = \\
 &= n_0 \cdot k \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \dots \sum_{i_{\text{розр}}} \Delta F(\dot{i}_{\text{розр}}),
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

де n_0 - число ударів блискавки, що припадає на 1 км²;

k - коефіцієнт, що враховує вид ураження.

У разі обчислення окремо ймовірності аварійного результату для одного ураження об'єкта блискавкою значення b_{\max} можна не визначати, а задатися такими їх значеннями, які дають впевненість у тому, що удари за їх межами безпечні для об'єкта.

2.3.5 Метеорологічні умови

Грозові розряди впливають на об'єкти електричних систем за певного (в даний момент) стану атмосфери та ізоляції. Стан атмосфери характеризується певними метеорологічними умовами - тиском, температурою, вологістю повітря, а також силою вітру, наявністю або відсутністю дощу тощо. Стан зовнішньої ізоляції характеризується ступенем її забруднення, наявністю або відсутністю зволоження і дощу (мається на увазі, що грозові розряди виникають не тільки в момент випадання дощу, але й перед дощем за сухого стану ізоляції або в перервах між дощами). Перераховані фактори впливають на імпульсну міцність зовнішньої ізоляції ліній та апаратів, а тим самим на грозостійкість різною мірою [9,12,13,17,18,22,32,85-88,134].

Електрична міцність гірлянд ізоляторів, введів, опорної ізоляції апаратів, які працюють на відкритому повітрі, змінюється зі зміною параметрів атмосферного повітря: атмосферного тиску p , температури t° , абсолютної вологості g . Міцність ізоляції зазвичай задається для нормальних метеорологічних умов ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.}, t^\circ = 20^\circ \text{C}, g = 11 \text{ г/м}^3$). Для оцінки міцності ізоляції в експлуатації слід враховувати відхилення тиску, температури та вологості від своїх стандартних значень. Перерахунок напруг u_0 , які ізоляція витримує в нормальних атмосферних умовах, на напруги u , які вона може витримувати реально, відповідно до [18] здійснюється за формулою:

$$u = u_0 \cdot \frac{\delta}{k}, \quad (2.27)$$

де δ - відносна густина повітря, що дорівнює

k - поправочний коефіцієнт на абсолютну вологість повітря, який визначається за рисунком 2.13 [18].

$$\delta = \frac{0,386 \cdot p}{273 + t^\circ}, \quad (2.28)$$

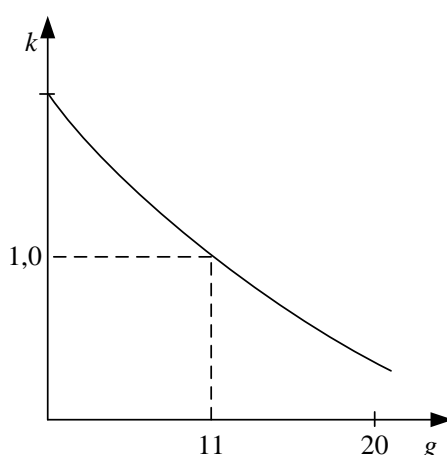


Рисунок 2.13 – Графік залежності $k = f(g)$ для всіх класів напруг за позитивної полярності імпульсів напруг

Формула (2.27) справедлива для всіх класів напруг для імпульсів позитивної полярності, для яких здійснюється координація ізоляції. Рекомендації [18] з врахування впливу на розрядну напругу вологості повітря (коефіцієнт k) і його відносної густини δ базується на узагальненнях МЕК, отриманих в різних країнах розрядних напруг повітряних проміжків довжиною до 1 м [89].

Проведені останнім часом дослідження міцності повітряних проміжків довжиною більше 1 м виявили непридатність поправочних коефіцієнтів $\frac{\delta}{k}$ для робочої напруги та імпульсів, що відповідають внутрішнім перенапругам. Помилки, викликані зведенням напруг по $\frac{\delta}{k}$, настільки суттєві, що розкид розрядних напруг, виміряних для різних значень p, t, g виявляється менше розкиду отриманого після зведення всіх виміряних розрядних напруг до нормальних атмосферних умов [12,13]. Отже введення поправок на густину й абсолютну вологість повітря не тільки не сприяє зближенню наведених розрядних напруг, але й збільшує розкид порівняно з розкидом неприведених розрядних напруг. У зв'язку з цим автори [12,13] ґрунтуючись на виявленій особливості компенсації впливу вологості зміною температури (ці величини мають досить жорстку позитивну кореляційну взаємозалежність), рекомендують розрядні напруги довгих повітряних проміжків для робочої частоти 50 Гц та імпульсах внутрішніх перенапруг, наводити тільки для зміни атмосферного тиску.

Дослідження довгих повітряних проміжків для імпульсів грозових перенапруг показали, що вплив вологості не послаблюється зі збільшенням довжини проміжків. Наведені на рисунку 2.15 криві поправочного коефіцієнта по абсолютній вологості повітря для довгих повітряних проміжків мало відрізняються від кривих, рекомендованих [18]. Тому прийняту в [18] поправку для імпульсних розрядних напруг ми можемо вважати цілком правомірною.

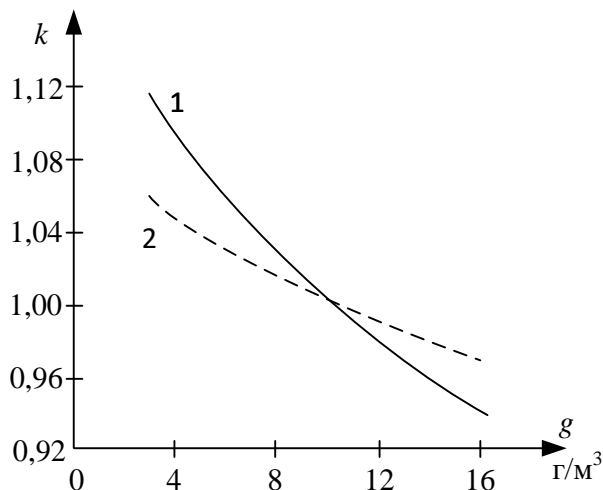


Рисунок 2.14 – Залежність поправочного коефіцієнта від абсолютної вологості за імпульсної напруги 1/50 мкс. для проміжку стержень – стержень довжиною 2,03 м: 1 - для позитивної полярності ; 2 – для негативної полярності

Величина $\frac{\delta}{k}$ є випадковою величиною, що підпорядкована нормальному закону розподілу. Числові характеристики розподілу $\frac{\delta}{k}$: математичне сподівання - $M_{\frac{\delta}{k}}$ і середньоквадратичне відхилення - $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ можуть бути визначені на основі дослідних даних. Маючи характеристики розподілу $\frac{\delta}{k}$ можна оцінити вплив цієї величини на розподіл розрядних напруг ізоляції $u_{розр}$. Розрядні напруги для нормальних метеорологічних умов $u_{нр0}$, так звані зведені розрядні напруги, розподілені також за нормальним законом. Оскільки $u_{нр}$ дорівнює добутку величин $u_{нр0}$ і $\frac{\delta}{k}$, то закон розподілу цієї величини також нормальний, а умовні характеристики її можна визначити з виразів [11,17]

$$M_{u_{нр}} = M_{u_{нр0}} \cdot M_{\frac{\delta}{k}}, \quad (2.29)$$

$$\sigma_{u_{np}} = \sqrt{\sigma_{u_{np0}}^2 + \sigma_{\frac{\delta}{k}}^2}.$$

Розрядні напруги електроізоляційних конструкцій залежать від впливу метеорологічних умов у двох напрямках. З одного боку ці умови в певній місцевості призводять до істотних змін середньорічних розрядних напруг $M_{u_{np}}$ порівняно з середніми розрядними напругами $M_{u_{np0}}$, отриманими для нормальних умов. Зазначені зміни залежать в основному від висоти розташування електричної ізоляції над рівнем моря – і зі зростанням висоти імпульсна міцність зменшується. З іншого боку випадкові коливання метеорологічних умов у даній місцевості $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ призводять до збільшення області розкиду пробивних напруг порівняно з розкидом за постійних p, t, g . Зміна середніх розрядних напруг і розширення їх області розкиду в кінцевому результаті призводить до зміни електричних характеристик, які слід враховувати для визначення надійності грозозахисту. Для оцінки впливу на надійність грозозахисту об'єкта висоти його розташування над рівнем моря і коливання метеорологічних умов на даній висоті необхідно знати функції розподілу поправки $\frac{\delta}{k}$ для різних висот. В роботі [9] на основі обробки даних реєстрації протягом 30 років метеорологічних умов по 17 пунктам, розташованим в різних кліматичних районах колишнього СРСР на різних висотах прямих ударів блискавки, отримані усереднені криві розподілу ймовірності $\frac{\delta}{k}$. Однак ми не можемо скористатися зазначеними кривими, оскільки параметри повітря p, t, g в роботі [9] вимірювалися цілорічно за будь-якої погоди. У зв'язку з цим під час гроз розподіли $\frac{\delta}{k}$ можуть помітно відрізнятися від отриманих. В роботі [32] наведені криві середніх значень величин δ, t, g залежно від H , тобто криві M_{δ}, M_t, M_g , а також криві, що обмежують основний діапазон змін зазначених величин (80% вимірів), які дозволяють визначити дисперсію випадкових величин δ, t, g - D_{δ}, D_t, D_g на різних висотах.

Поправочний коефіцієнт $\frac{\delta}{k}$ виражається функціонально через величини відносної густини повітря δ та абсолютної вологості g , оскільки $k = y(g)$. В роботі [90] наведені формули для наближеного визначення математичного сподівання й дисперсії функції двох випадкових величин. Для $z = f(x, y)$:

$$M_z = f(M_x; M_y), \quad (2.30)$$

$$D_z = \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x}\right)_0^2 \cdot D_x + \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right)_0^2 \cdot D_y + 2 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_x}\right)_0 \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right)_0 \cdot k_{xy}, \quad (2.31)$$

де k_{xy} - кореляційний момент випадкових величин x, y . Індекс "0" вказує, що часткові похідні беруться в точці $(M_x; M_y)$.

Формули (2.30), (2.31) для визначення числових характеристик випадкової величини $\frac{\delta}{k}$, по числових характеристиках величин δ, g не можуть бути використані, оскільки не відома кореляційна взаємозалежність зазначених величин. Коефіцієнти кореляції r_{tg} можна встановити на основі наявних дослідних даних [12,13] тільки для величин g і t причому не тільки для періоду гроз, а й для будь-якої погоди. Тому ми можемо визначити $M_{\frac{\delta}{k}}$ і $\sigma_{\frac{\delta}{k}}$ або допускаючи некорельованість величин δ і g , або виразивши $\frac{\delta}{k}$ через p, t, g , враховуючи наближене значення коефіцієнта кореляції r_{tg} . Коефіцієнт кореляції, необхідний для визначення кореляційного моменту k_{tg} , за даними [78] дорівнює 0,887. Для більшої достовірності результату ми усунули з дослідного поля значень g і t за будь-якої погоди точки, що виходять за межі g і t для періоду гроз. Ці точки встановлені за даними роботи [32].

Встановимо функціональні залежності випадкової величини $\frac{\delta}{k}$ від параметрів атмосферного повітря. Апроксимуємо криву поправочного коефіцієнта на вологість (рисунок 2.13) виразом

$$k = \frac{1}{0,0075 \cdot g + 0,918}. \quad (2.32)$$

Для першого випадку (за неврахування кореляційного зв'язку між випадковими величинами δ і g):

$$\delta/k = \delta(0,0075 \cdot g + 0,918). \quad (2.33)$$

Для другого випадку (за врахування кореляційного зв'язку між випадковими величинами δ і g):

$$\delta/k = \frac{0,386 \cdot p}{(273 + t) \cdot k} = \frac{0,0029g + 0,354}{273 + t} \cdot p = \gamma \cdot p. \quad (2.34)$$

Наведемо приклад розрахунку, виконаного за формулами (2.30), (2.31) для $H = 0$ м. Під час визначення числових характеристик розподілу $\frac{\delta}{k}$ для першого випадку використовуючи безпосередньо формули (2.30), (2.31) отримаємо:

$$M_{\frac{\delta}{k}} = M_{\delta} \cdot (0,0075 \cdot g + 0,918) = 1,037;$$

$$D_{\frac{\delta}{k}} = \left[\frac{\sigma(\delta/k)}{\sigma\delta} \right]_0^2 \cdot D_{\delta} + \left[\frac{\sigma(\delta/k)}{\sigma g} \right]_0^2 \cdot D_g = (0,0075 \cdot g + 0,918)_0^2 \cdot D_{\delta} + (0,0075 \cdot g)_0^2 \cdot D_g = 9,86 \cdot 10^{-4};$$

$$\sigma_{\frac{\delta}{k}} = \sqrt{D_{\frac{\delta}{k}}} = 0,0314; \quad \sigma_{\frac{\delta}{k}}, \% = \frac{\sigma_{\frac{\delta}{k}} \cdot 100}{M_{\frac{\delta}{k}}} = 3,03.$$

В другому випадку, враховуючи відсутність у [22] даних по тиску повітря, спочатку визначимо числові характеристики випадкової величини γ , а тоді випадкової величини p .

$$M_{\gamma} = \frac{0,0029 \cdot M_g + 0,354}{273 + M_t} = 1,35 \cdot 10^{-3};$$

$$D_\gamma = \left(\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_g}\right)_0^2 \cdot D_g + \left(\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_t}\right)_0^2 \cdot D_t + 2 \cdot \left(\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_g}\right)_0 \cdot \left(\frac{\sigma_\gamma}{\sigma_t}\right)_0 \cdot k_{tg} \cdot \sqrt{D_g D_t} = \left(\frac{0,0029}{273+t}\right)_0^2 \cdot D_g +$$

$$+ \left(\frac{0,0029g + 0,354}{(273+t)^2}\right)_0^2 \cdot D_t + 2 \cdot \left(\frac{0,0029}{273+t}\right)_0 \cdot \left(\frac{0,0029g + 0,354}{(273+t)^2}\right)_0 \cdot k_{tg} \cdot \sqrt{D_g D_t} = 2 \cdot 10^{-10}.$$

Для формули (2.34) запишемо:

$$D_\delta = \left(\frac{\sigma_\delta}{\sigma_p}\right)_0^2 \cdot D_p + \left(\frac{\sigma_\delta}{\sigma_t}\right)_0^2 \cdot D_t.$$

Звідки отримаємо:

$$D_p = \frac{D_\delta - \left(\frac{\sigma_\delta}{\sigma_t}\right)_0^2 \cdot D_t}{\left(\frac{\sigma_\delta}{\sigma_p}\right)_0^2} = \frac{D_\delta - \left(\frac{0,386p}{(273+t)^2}\right)_0^2 \cdot D_t}{\left(\frac{0,386p}{273+t}\right)_0^2} = 141;$$

$$\sigma_p = \sqrt{D_p} = \sqrt{141}; \quad M_\delta = \frac{0,386 \cdot M_p}{273 + M_t}; \quad M_p = \frac{M_\delta \cdot (273 + M_t)}{0,386} = 770.$$

Знайдемо числові характеристики випадкової величини:

$$M_{\delta/k} = M_p \cdot M_\gamma = 1,039; \quad \sigma_{\delta/k} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_\gamma^2} = 11,9; \quad \sigma_{\delta/k}, \% = \frac{\sigma_{\delta/k} \cdot 100}{M_{\delta/k}} = 3,03 = 1,9.$$

Великі розбіжності в результатах обчислень середньоквадратичного відхилення випадкової величини $\frac{\delta}{k}$ отримані внаслідок неврахування в першому випадку кореляційного зв'язку між випадковими величинами δ і g . Надалі розрахунки проводилися тільки для другого випадку, тобто з врахуванням кореляційного зв'язку. Результати розрахунків зведені в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 - Результати розрахунків числових характеристик випадкових величин.

Висота над рівнем моря H	0	150	500	1000	1500	2000
Мат. сподів. за температурою M_t	21,5	21	20	18	15,5	12,5
Мат. сподів. за вологістю M_g	14,5	14,1	13,1	11,6	10,2	8,8

Мат. сподів. за тиском M_p	770	760	731	690	649	607
Мат. сподів. за відн. густиною пов. M_δ	1,01	0,996	0,963	0,915	0,868	0,820
Мат. сподів. за поправочним коеф. $M_{\delta/k}$	1,037	1,019	0,988	0,920	0,863	0,801
Мат. сподів. за випадковою вел. γ M_γ	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$
Дисперсія за температурою D_t	20	20	20	20	20	20
Дисперсія за вологістю D_g	8	9	12	12,7	10,7	8
Дисперсія за тиском D_p	141	146	156	140	97	64
Дисперсія за відн. густиною пов. D_δ	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Дисперсія за випадковою вел. γ D_γ	$2 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
Середньоквадрат. відхилення $\sigma_p, \%$	1,55	1,59	1,71	1,71	1,51	1,63
Середньоквадрат. відхилення $\sigma_\gamma, \%$	1,1	1,1	1,4	1,5	1,3	1,1
Середньоквадрат. відхилення $\sigma_{\delta/k}, \%$	1,9	1,94	2,2	2,27	2,0	1,72

2.3.6 Стан ізоляції

Спроба систематизувати дані досліджень впливу забруднення на імпульсну міцність зовнішньої ізоляції зроблена в [9]. Там зазначено, що забруднення практично не впливає на сухорозрядну напругу ізоляторів в районах, де ступінь забруднення невелика і шар забруднення змивається дощем, а тому можна знехтувати впливом забруднення. Однак у районах, що характеризуються інтенсивним забрудненням з високою питомою провідністю забруднюючого шару, необхідно враховувати навіть в областях з досить малими передрозрядними годинами. Останнє положення базується на даних досліджень В.Г.Кожухова [22], правильність яких в теперішній час можна ставити під сумнів. Оскільки нами не виявлено більш пізніх робіт, виконаних з урахуванням діючих в даний час вимог щодо методики проведення експерименту, то вплив забруднення на імпульсні характеристики ізоляції ми змушені оцінювати також на основі даних роботи [22].

Розряд блискавки в об'єкті може мати місце, коли його ізоляція суха, зволожена краплями передгрозового дощу, омивається струменями інтенсивного грозового дощу і після дощу. Вплив забруднення на грозостійкість необхідно враховувати не за всіх ударів блискавки в об'єкт, а тільки для тієї частини ударів, які співпадають з

краплями передгрозового дощу, який змиває забруднення і зволожує ізоляцію, або за часом змиву забруднення з ізоляції; для забруднення, яке не змивається - із зволоженням ізоляції краплями передгрозового дощу або після дощовим часом. Отже, у розрахунках грозостійкості вплив забруднення слід враховувати тільки для частини ударів.

Особливий випадок являє собою перекриття лінійної ізоляції. Відомо, що перекриття гірлянд ізоляторів відбувається або по повітрю, або по поверхні, залежно від амплітуди напруги впливу. За хвили 1,5/40 і 50%- ій розрядній напрузі на гірляндах без захисної арматури розряди відбуваються по повітрю. З підвищенням напруги канал розряду наближається до поверхні ізоляторів, розряди починають відбуватися по верхній частині тарілок і далі по повітрю на шапки ізоляторів - при цьому вони утворюють каскади. Під час значного підвищення напруги канал розряду щільно облягає поверхню фарфору (скла). Захисна апаратура сприяє утворенню розрядів по повітрю. За даними дослідів, виконаних у НППТ [91] розряди відбувалися по повітрю за 50% -ої розрядної напруги лише у гірлянд коротше 2,5 м і тільки за наявності захисної арматури. За часу розряду, меншому 8-10 мкс вони завжди каскадувались.

Під час розрядів по повітрю розрядна напруга гірлянд перестає залежати від типу ізоляторів і, мабуть, від стану їх поверхні. Очевидно, що під час каскадних розрядів стан ізоляції впливає на розрядні напруги. Але оскільки під час визначення грозостійкості об'єктів нас цікавлять тільки розрядні напруги, що лежать в діапазоні, який визначає крива ефекту, центром якої є 50% розрядна напруга, то щонайменше для половини ударів, які формують перенапруги зазначеного діапазону, не слід враховувати стан ізоляції.

На рисунку 2.15 наведено криву ефекту - залежність ймовірності розряду P від амплітуди напруги $u_{вл}$, що впливає на ізоляцію. Весь діапазон напруг, що впливають на ізоляцію від нуля до $u_{вл.макс.}$ можна розділити на кілька областей:

- $0 \div u_{розр.мін.}$ - область відсутності розрядів;
- $u_{розр.мін.} \div u_{50\%}$ - область розрядів по повітрю;
- $u_{50\%} \div u_{розр.макс.}$ - область зниження розрядних напруг за рахунок забруднення;

- $u_{розр.макс.} \div u_{впл.макс.}$ - область напруг, що викликають розряд з імовірністю $P=1$ незалежно від наявності або відсутності забруднення.

Вплив забруднення викликає звуження області $u_{50\%} \div u_{розр.макс.}$ деформуючи певним чином симетричну криву ефекту незабрудненої ізоляції. При цьому значення $u_{50\%}$ не зміщується. Для симетричної кривої ефекту розрахунки надійності грозозахисту можна вести за умови $u_{дон} = u_{50\%}$, порушення симетрії за рахунок забруднення буде викликати деяку похибку обчислень.

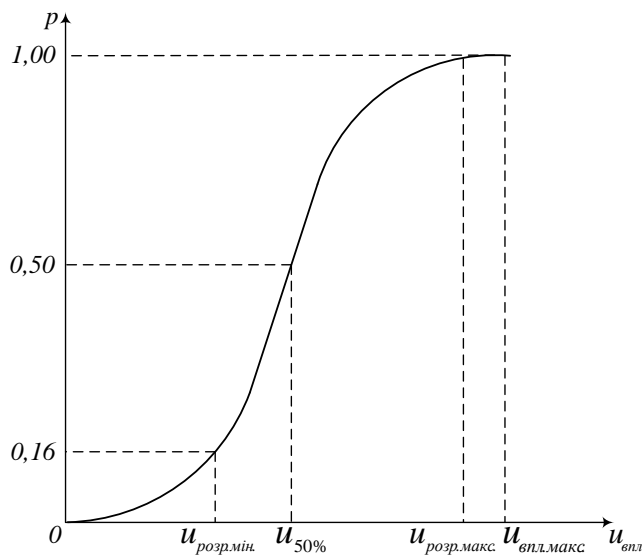


Рисунок 2.15 – Крива ефекту зовнішньої ізоляції

Однак ця похибка невелика і якщо врахувати всі зазначені вище обмеження, то слід очікувати мінімальний вплив забруднення на грозостійкість об'єктів електроенергетичних систем і не враховувати його в розрахунках. Таку можливість підтверджує і досвід експлуатації.

У зв'язку з тим, що грози завжди супроводжуються зливами, представляє інтерес зниження імпульсної міцності зовнішньої ізоляції в умовах дощу. У роботі [9] на основі аналізу даних [17] зазначено, що зі зменшенням часу впливу напруги, вплив дощу на розрядні напруги ізоляторів швидко зменшується і тому 50% імпульсні розрядні напруги знижуються незначно, лише на 5-10%. Посилаючись на невисоку точність розрахунків грозостійкості ліній електропередавання, автори [9] вважають прийнятною усталену практику нехтування впливом дощу.

У роботі [13] зазначено, що зливовий дощ не знижує імпульсних розрядних напруг гірлянд. При цьому автори посилаються на дані дослідів, проведених в НШПТ і за кордоном без зазначення місця опублікування результатів цих дослідів. Надалі ми будемо дотримуватися положень, висунутих в роботах [9,13].

Розглянемо характеристики розподілу наведених розрядних напруг ізоляції $u_{розр}$, які необхідні для визначення ймовірності $P(u)$.

Якщо на ізоляцію впливає напруга заданої форми, наприклад, стандартної хвилі 1,5 / 40 мкс, то розподіл розрядних напруг підпорядкований нормальному закону і характеризується кривою ефекту, яка може бути отримана дослідним шляхом. Після зміни форми хвилі напруги, що впливає на ізоляцію, змінюється і розподіл розрядних напруг. Розмаїття форм напруг, які впливають на ізоляцію викликають труднощі їх групування за окремими ознаками та не дозволяють встановити з достатньою точністю навіть сукупності розподілів $u_{розр}$. Це змушує або відмовитися від врахування залежності значень розрядних напруг від форми імпульсів впливу, або шукати інші способи врахування цієї залежності, за яких для визначення ймовірності $P(u)$ виключається пряме використання формули (2.11).

Перший шлях лежить в основі всіх існуючих методів визначення грозостійкості ліній. Він виправданий для внутрішньої ізоляції, для якої не можна отримати статистичних розрядних характеристик [17]. Що стосується робіт [92-94], то автори досить переконливо доводять доцільність врахування під час визначення грозостійкості об'єктів реальних форм напруг, що впливають на ізоляцію і реальних розрядних характеристик ізоляції. В якості одного із способів такого врахування в роботі [95] рекомендується використовувати огинаючі розрядні напруги заданої ймовірності для імпульсів різної довжини.

2.3.7 Перерахунок вольт – секундних характеристик

Вольт-секундні характеристики (ВСХ) широко використовуються для здійснення координації ізоляції високовольтного обладнання, тобто для захисту від впливу грозових і комутаційних перенапруг. Для експериментального визначення

вольт-секундної характеристики до досліджуваного проміжку прикладаються імпульси стандартної форми. Для кожного значення максимальної напруги імпульсу проводиться серія дослідів. В силу статистичного розкиду часу розряду вольт-секундна характеристика виходить у вигляді області точок (рисунок 2.16), для якої вказуються середня крива і границі розкиду часу розряду [42,96].

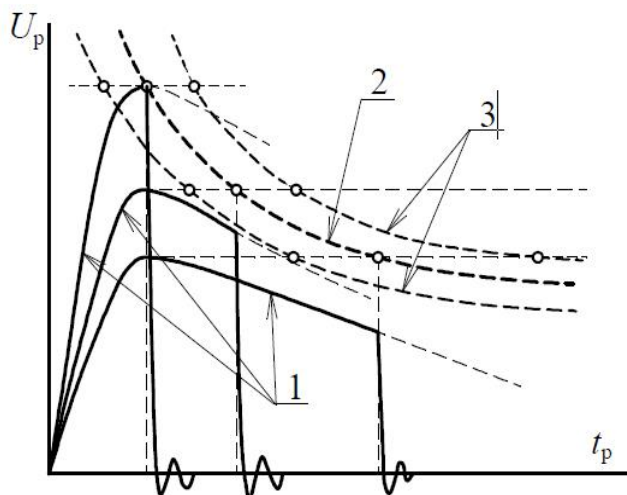


Рисунок 2.16 - Побудова вольт-секундної характеристики ізоляції за дослідними даними (грозові імпульси): 1 - імпульс напруги, 2 - крива середніх значень пробивної напруги; 3 - межі розкиду пробивних напруг

З метою захисту від перенапруг паралельно до об'єкта, який захищається, включають захисний апарат (наприклад, розрядник чи ОПН) з пологою ВСХ. Надійний захист буде забезпечуватися, якщо ВСХ розрядника (рисунок 2.17, крива 1) лежить нижче ВСХ об'єкта (рисунок 2.17, крива 3) у всьому діапазоні часів напруги [42].

Експериментальний метод зняття ВСХ є дуже затратним та трудомістким процесом. Його можна застосувати лише тоді, коли до досліджуваного проміжку прикладаються імпульси стандартної форми. Для перерахунку вольт-секундних характеристик нестандартних імпульсів існують певні теорії та методи. Розглянемо деякі з них.

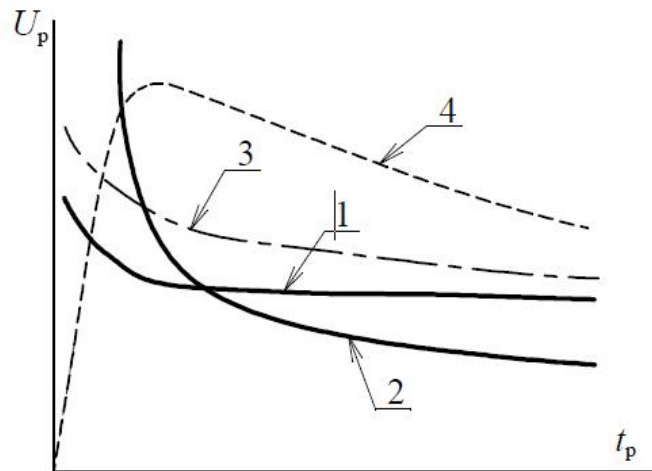


Рисунок 2.17 - ВСХ захисних розрядників та ізоляції: 1 - ВСХ вентиляного розрядника (однорідне поле), 2 - ВСХ трубчастого розрядника (різко неоднорідне поле), 3 - ВСХ об'єкта, який захищається; 4 - імпульс напруги

Модель постійності енергії розряду. F.W. Реек [19] вважав, що для пробою проміжку потрібна незмінна кількість енергії, яку можна підрахувати аналогічно втратам на корону. Тому, для визначення енергії, необхідної для пробою проміжка, він застосував формулу

$$W = (U - U_0)^2 \cdot m \cdot t, \quad (2.35)$$

де W - енергія, потрібна для пробою; U - напруга пробою; U_0 - напруга пробою тривалістю 60 періодів; m - коефіцієнт, який має розмірність провідності; t - час, необхідний для пробою.

Із формули (2.35) виводиться залежність пробивної напруги і часу [19]:

$$U = U_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{\sqrt{t}}\right), \quad (2.36)$$

де α - постійна для даного проміжку і хвилі прямокутної форми.

Аналогічним методом Реек отримав формули, які пов'язували амплітуду напруги і час пробою, для косокутної стандартної хвилі. Над даною гіпотезою

працювали також Бьюлі і Гаррард. Проте результати вивчення іскри дають можливість впевнитись, що ця гіпотеза суперчить теоретичному підґрунтю. А саме:

1. Фізичні процеси в короні та лідері мають різний характер.
2. Визначення втрат енергії на лідерну стадію іскри та встановлення залежності U_{t_m} суперчить припущенню Реека.
3. Те, що формула (2.36) давала у визначених умовах співпадіння результатів розрахунків з експериментом, вказує на те що Реек вдало підібрав емпіричну формулу у вузькому діапазоні.

Модель незалежності швидкості лідера від стану проміжку.

А.С. Зінгерман [19] запропонував метод накладання вольт-секундних характеристик, знятих для хвилі однієї форми, на характеристику іншої хвилі. Теоретичною основою методу служить, висунуте А. С. Зінгерманом положення, що з достатньою для практичних цілей точністю можна вважати миттєву швидкість лідера V залежною лише від величини напруги в проміжку на даний момент часу. При цьому V дорівнює швидкості розвитку лідера в проміжку S_0 за безконечної прямокутної хвилі з амплітудою, рівною даному миттєвому значенню напруги. Тоді

$$S_0 = \int_{t_0}^{t_p} v(u) dt, \quad (2.37)$$

де v -швидкість розвитку лідера; u -напруга в даний момент; t_0 -момент на фронті хвилі, коли $u = U_0 = 1,25 \cdot U_\infty = U_{\min}$ за безконечної прямокутної хвилі; t_p - повний час розряду.

Зводячи (2.37) до одиниці та замінюючи плавну криву хвилі $u_t(t)$ ступінчастою, де кожна сходинка має напругу u_k і тривалість T_k отримаємо формулу, яка є основою для перерахунку ВСХ

$$1 = \sum \frac{T_k}{\tau_{cpk}}. \quad (2.38)$$

Аналізуючи даний метод, насамперед варто відмітити повну невідповідність між припущенням автора і реальною картиною пробою. Замість швидкості лідера, яка постійно змінюється, береться якась середня швидкість. Вона визначається з ВСХ даного проміжку для заданої напруги. Даний метод є некоректним емпіричним прийомом перерахунку ВСХ і придатний лише для хвиль з майже однакою формою.

Модель незмінності заряду та експериментальні формули для визначення швидкості лідера. На відміну від гіпотези про незмінність енергії, яка використовується в лідерній стадії розряду в даному проміжку, Іцхокі Я.С. та Стальнов П.В. на основі експериментальних даних припустили [19], що для даного об'єкта незалежно від амплітуди та форми хвилі прикладеної напруги справедливе рівняння

$$\int_0^{t_p} i dt = const, \quad (2.39)$$

В подальшому розгляді Іцхокі припустив, що величина $M(t)$ характеризує «ступінь іонізації» розрядного проміжку

$$M(t) = A_1 \int_0^t i dt, \quad (2.40)$$

Далі враховуємо те, що для перекриття даного об'єкту, незалежно від форми хвилі напруги, необхідно і достатньо здійснити визначену іонізацію $M_0 = M(t_p)$, яка є постійною для даного проміжку. Це означає, що незмінність заряду q_0 забезпечується іонізацією M_0 .

В результаті для величини $M(t)$, яка характеризує ступінь іонізації, виводиться наступний вираз

$$M_0 = \int_0^{t_p} \left[u_t(t) - U_{0\phi}(M) \right] \cdot i_0 dt = \int_0^{t_p} \left[u_t(t) - U_{0\phi} \left(A \frac{M(t)}{M_0} \right) \right] i_0 dt, \quad (2.41)$$

де $i_0=1$, якщо різниця двох членів в квадратних дужках більша нуля; $i_0=0$ якщо ця різниця менша нуля.

Рівняння (2.41) повинне приводити до визначення часу пробою t_p для заданої форми хвилі по трьох довільних точках, будь-якої відомої ВСХ даного проміжку. Далі, методом операційного числення можна отримати рівняння ВСХ $U_{t_m} = f(t_p)$ для різних форм хвилі прикладеної напруги.

Аналізуючи даний метод потрібно відмітити наступні положення:

1. Дослідження довгої іскри в лабораторіях показали, що незмінність величини $\int_0^{t_p} i dt$ для проміжків, довжиною більшою ніж 1 м, не спостерігається.
2. Даний метод має вузьку область застосування через неврахування ряду факторів.

Модель "Руйнівного ефекту". Теоретичним підґрунтям даного методу є [19,97]:

1. Пробій ізоляції залежить не тільки від величини прикладеної напруги, а й від часу, на протязі якого відбувається вплив на ізоляцію.
2. Руйнуюча сила (жорсткість) хвилі залежить від напруги і в меншій мірі від часу.
3. Існує деяка напруга, яку може витримати ізоляція.

На рисунку 2.18 зображено імпульсну хвилю, яка моделюється серією імпульсів напруг, кожен з яких має ширину Δt .

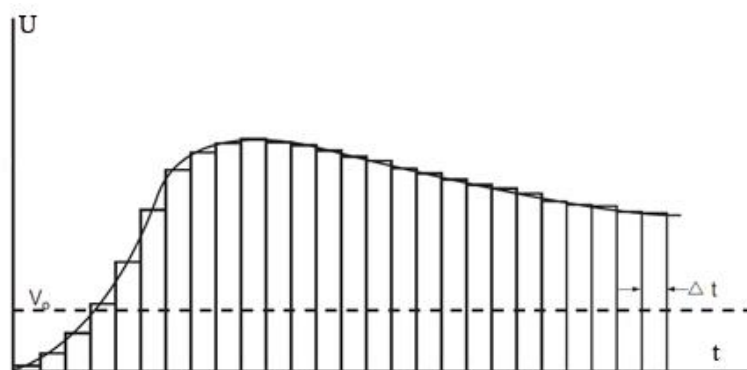


Рисунок 2.18 - Моделювання імпульсної хвилі

Нехай імовірність того, що ізоляція витримає імпульсну перенапругу апроксимується рівнянням:

$$P_N = \varepsilon^{-\alpha(U-U_0)\Delta t}, \quad (2.42)$$

де U_0 - мінімальна напруга, за якої може початися пробій ізоляції; U - імпульсна напруга на ізоляції; α - параметр, визначений експериментально залежно від типу хвилі. Тоді, повна ймовірність того, що не відбудеться пробій, є рядом ймовірностей кожної фігури імпульсної хвилі шириною Δt і вона рівна 0,5 для критичних перекриттів.

Згідно рівнянь (2.42), (2.43) запишемо:

$$0,5 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_N \quad (2.43)$$

$$0,5 = \varepsilon^{-\alpha(V_1-V_0)\Delta t} \cdot \varepsilon^{-\alpha(V_2-V_0)\Delta t} \dots \varepsilon^{-\alpha(V_N-V_0)\Delta t} \quad (2.44)$$

Спростивши рівняння (2.44) та беручи границю, отримаємо:

$$DE = \int_{V_1} (V(t) - V_0) dt. \quad (2.45)$$

Руйнівний ефект можна також подати, як модель руху стримера в проміжку. Відповідно, шлях, який проходить стример в проміжку за час t описується рівнянням:

$$\Delta x = \alpha(V(t) - V_0)^n \Delta t. \quad (2.46)$$

Розрив дуги повністю ліквідується, якщо :

$$S = \sum_{t_0}^{t_s} \alpha(V(t) - V_0)^n \Delta t, \quad (2.47)$$

де S - довжина розриву і t_s - час подолання розриву.

Взявши границю з (2.47), отримаємо :

$$DE = \int_{t_0}^{t_s} (V(t) - V_0)^n \Delta t, \quad (2.48)$$

$$\text{де } DE = S/\alpha .$$

У формулі (2.48) α є функцією довжини проміжку, як і DE . DE не змінюється настільки, як градієнт, який використовується в рівняннях з напругою.

Нижче наведено графіки ВСХ різних полів, побудованих за допомогою методу руйнівного ефекту [98]:

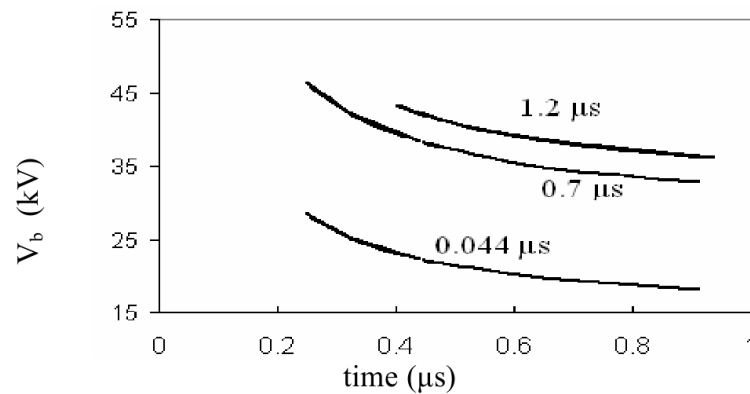


Рисунок 2.19 - ВСХ повітряної ізоляції за рівномірної конфігурації поля

Аналізуючи даний метод, варто зауважити, що:

1. Теоретичне підґрунтя автора не суперечить фізичним процесам в ізоляції;
2. ВСХ можна розраховувати як аналітичним, так і графічним методами;
3. Похибка між експериментальним зняттям ВСХ і теоретичними розрахунками становить не більше 5%.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Розглянуто основні випадкові фактори, що впливають на надійність грозозахисту повітряних ліній електропередавання. Запропоновано розраховувати ймовірність грозового ураження об'єкта, враховуючи сукупність поєднаних випадкових факторів, що дозволить адекватніше оцінити надійність грозозахисту та підвищити його ефективність.

2. За результатами проведених досліджень показано, що для розрахунків грозостійкості вплив забруднення ізоляції слід враховувати тільки для частини ударів блискавки в об'єкт.

3. Порівняльними розрахунками ймовірності перекриття ізоляції ЛЕП, показано необхідність врахування взаємного зв'язку між амплітудою та крутизною струму грозової хвилі.

4. Для забезпечення адекватної відповідності природнім процесам, запропоновано метод врахування робочої напруги шляхом поділу періоду робочої напруги на інтервали з подальшим розрахунком напруг на ізоляції на кожному інтервалі та визначення ймовірності пробою для кожної з фаз за удару блискавки в об'єкт.

5. Проведеними дослідженнями отримано залежності небезпечних параметрів за різних значень імпульсного опору заземлення, та розраховано ймовірність появи небезпечних перенапруг для ізоляції повітряних ліній залежно від нього.

6. Отримано аналітичні вирази для оцінки впливу на надійність грозозахисту об'єкта відстані від місця удару блискавки в землю до осі лінії електропередавання.

7. Отримано, з застосуванням чисельного інтегрування, вираз для розрахунку ймовірності імпульсного грозового розряду в об'єкт. Показано, що запропонований метод розрахунку справедливий як для незалежних випадкових факторів, так і для корельованих величин, якщо користуватися умовними законами розподілу.

8. Розглянуто відомі методи перерахунку вольт-секундних характеристик та показано доцільність використання методу «Руйнівного ефекту», який адекватно відтворює фізичні процеси та забезпечує малі похибки розрахунків

РОЗДІЛ 3

ЦИФРОВИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ ФАКТОРІВ

3.1 Моделі ймовірнісної оцінки інтенсивності вимкнень повітряних ліній електропересилання, спричинених розрядами блискавки

Удари блискавки у ЛЕП викликають електричні перекриття з проводу на землю або між проводами. Ці розряди за наявності робочої напруги лінії часто переходять в електричну дугу, що призводить до коротких замикань і вимкнення ЛЕП. Для об'єднаних енергетичних систем такі несанкціоновані вимкнення є небезпечним явищем, оскільки можуть призвести до випадання цих систем із синхронізму з катастрофічними наслідками. Крім цього, атмосферні перенапруги, потрапляючи з ЛЕП на обладнання електричних станцій і розподільних підстанцій, можуть викликати руйнування (пробої) ізоляції електричних машин та апаратів тощо, аж до виходу з ладу автоматизованих систем управління технологічними процесами [101,102,105,112].

Надійність грозозахисту повітряних ліній електропересилання та підстанцій тим вища, чим менша кількість аварійних відключень через грози за певний період часу. Ймовірність грозових пошкоджень залежить від частоти та параметрів грозових впливів і здатності об'єкта протистояти кожному удару блискавки, а також ряду інших факторів, що буде розглянуто нижче [104,110,111].

Розрахунок ризику відмов апаратів енергосистеми, пов'язаних з розрядами блискавки, є компонентом проблеми надійності, для якої формулювання ризику було запропоноване в стандарті координації ізоляції МЕК 71-2 [14,43] в такий спосіб:

$$P_f = \int_0^{\infty} f_u(u)F(u)du, \quad (3.1)$$

де $f_u(u)$ - функція густини ймовірності перенапруг, спричинених блискавкою, для зазначеного пристрою;

$F(u)$ - функція розподілу ймовірностей випробувальної напруги пристрою.

Даний стандарт може бути репрезентований з використанням певних концепцій. Формулювання ризиків може бути відтворене за концепцією інтерференції зусилля-міцності, де порівнюють зусилля, що впливає на компонент з його міцністю [14]. Збій (аварійна ситуація) відбувається, коли фактичне зусилля перевищує фактичну міцність. Нехай S – зусилля, яким випробовується апарат енергосистеми після удару блискавки в лінію електропересилання, а W – міцність апарату або здатність витримувати зусилля. Нехай $f_s(s)$ і $f_w(w)$ функції густини ймовірностей для випадкових величин S і W , відповідно. Крім того, нехай $F_s(s)$ і $F_w(w)$ будуть їхніми відповідними сукупними функціями розподілу. Тоді компонент ризику збою (аварійної ситуації), припускаючи, що зусилля S і міцність W є незалежними випадковими величинами, будуть такими як наведено в [14,44]:

$$P_f = P(S \geq W) = \int_0^{\infty} f_s(s) \left(\int_0^s f_w(w) dw \right) ds = \int_0^{\infty} f_s(s) F_w(s) ds. \quad (3.2)$$

Варто відзначити, що останнє рівняння має аналогічний вид як і запропоновано в стандарті МЕК 71-2 [43]. Ризик збою (аварійної ситуації) також може бути представлений у вигляді [14,44] :

$$P_f = \int \int_{w \leq s} f_s(s) f_w(w) ds dw = \int_0^{\infty} f_w(w) \left(\int_w^{\infty} f_s(s) ds \right) dw = \int_0^{\infty} f_w(w) (1 - F_s(w)) dw. \quad (3.3)$$

Оскільки зусилля S , пов'язане з ударом блискавки, впливає на апарати енергосистеми, то S є функцією різних вхідних випадкових величин, що визначають характеристики удару блискавки (амплітудно – часові параметри, віддаленість до точки удару тощо), то S також буде випадковою величиною. Розподіл ймовірностей

S , і його моментів будуть пов'язані функціонально та можуть бути отримані з основних випадкових величин [14].

Також можна сформулювати функцію ризику за допомогою концепції функції продуктивності та границі стану шляхом набору основних випадкових величин, для яких відомі функції розподілу. Цей набір випадкових величин включає будь-яку випадкову величину, що відіграє відповідну роль в механізмі виходу з ладу компонента. Ці випадкові величини пов'язані або із зусиллям, що впливає на компонент, або з його міцністю. Відповідно до даної концепції ризик збою (аварійної ситуації) може бути представлений у вигляді [14]:

$$P_f = \int_{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} \dots \int f_{x_1 \dots x_n} \cdot (x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = \int_{g(x) \geq 0} f_x(x) dx, \quad (3.4)$$

де $f_{x_1 \dots x_n}(\cdot)$ - спільна функція густини ймовірності випадкових величин x_1, \dots, x_n ;
 $f_x(x)$ - багатовимірна функція густини вектора \vec{X} .

Vernon Coogay зазначає, що термін «ризик» може бути використаний в сенсі ймовірності, з якою слід очікувати збитків. Для практичних цілей цей термін був замінений у недавньому стандарті [99] відповідним терміном для визначення втрат в результаті пошкодження блискавкою і виражається він NPL продуктом так, що вираз ризику може бути спрощено до вигляду [45]:

$$R \approx NPL = \sum_{X=A}^Z N_x P_x L_x = \sum_{X=A}^Z R_x, \quad (3.5)$$

де N – щорічне число небезпечних подій (блискавок), що впливають на обладнання; P – ймовірність пошкодження конструкції або її обладнання за одну небезпечну подію; L – втрати від пошкодження об'єкта, що підлягає захисту; $N_x P_x L_x$ – значення NPL , для зазначеного компонента ризику; R_x - загальний символ компонента ризику, а X , A і Z - символи для загальних відповідних компонентів ризику [45].

Аналіз ризиків також може бути сформований на основі повного заряду спалаху блискавки. Якщо припустити, що миттєве значення напруги $u_A(t)$ і миттєве значення струму $i_A(t)$ в терміналі розрядника під час розряду блискавки відомі, то енергія, що вивільняється в розряднику протягом часу t , може бути обчислена як [20,33]:

$$W = \int_0^t u_A(t) i_A(t) dt. \quad (3.6)$$

Порівнюючи енергію W , що вивільняється з енергією, яка може бути поглинена розрядником E_R , з'являється можливість визначення моменту часу t_a , коли W стає більше ніж E_R . Тоді сумарний заряд блискавки, поглинений розрядником до появи відмови може бути оцінений як [20]:

$$Q_a = \int_0^{t_a} i(t) dt, \quad (3.7)$$

де Q_a є електричним зарядом каналу блискавки, а $i(t)$ є струмом блискавки.

За пік величини струму однієї еквівалентної хвилі спалаху блискавки приймають пік струму першого удару I_p , тому Q_a також є функцією I_p . Якщо відмова розрядника, для будь-якого заданого значення I_p , відбулась в момент t_a , це буде відбуватися і для всіх більших значень величини I_p також. Після того, як визначено мінімальне значення електричного заряду, достатнє, щоб викликати відмову розрядника, яке обчислюється для кожної величини струму I_p , відповідно можна визначити граничну криву блискавки D , вище якої знаходиться регіон ймовірностей відмови розрядника [20,33]:

$$R = \int_D w(I_p, Q_a) dI_p dQ_a, \quad (3.8)$$

де $w(I_p, Q_a)$ є спільною функцією розподілу ймовірностей I_p і сумарного заряду Q_a та виражається [20,33]:

$$w(I_p, Q_a) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x^2 + y^2 - 2\rho xy}{2(1 - \rho^2)} \right], \quad (3.9)$$

$$\text{де } x = \frac{\ln(I/I_m)}{\sigma_{\ln I}} \quad \text{та } y = \frac{\ln(Q/Q_m)}{\sigma_{\ln Q}}.$$

Тут $I_m = 30$ кА і $\sigma_{\ln I} = 0,53$ в.о. є медіаною і логарифмічним значенням стандартного відхилення величини струму першого удару, відповідно $Q_m = 7.5C$ є значенням медіани повного заряду спалаху, $\sigma_{\ln Q} = 1,04$ в.о. - величина логарифмічного стандартного відхилення сумарного заряду спалаху і $\rho = 0,54$ в.о. є коефіцієнтом кореляції між величиною струму першого удару та сумарного заряду спалаху [20].

Ймовірність настання однієї небажаної події протягом заданого часу може бути також розрахована за формулою [100]:

$$P = \frac{1}{N_D T + 1}, \quad (3.10)$$

де T – час років, за який очікується одне перевищення струму блискавки над максимальним допустимим значенням;

N_D - кількість ударів блискавки за рік, 1 / рік

$$N_D = N_g S_{cб} C_D 10^{-6}, \quad (3.11)$$

де N_g - густина ударів блискавки в землю, 1 / (км² / рік);

$S_{cб}$ - площа збирання розрядів блискавки (collection area), що визначається, згідно ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010, м²;

C_D - коефіцієнт розташування, що враховує вплив інших об'єктів.

Використання цієї формули дозволить визначити як ймовірність того, що струм блискавки перевищить допустиме максимальне значення, так і ймовірність того, що

струм блискавки виявиться меншим допустимого мінімального значення. Це важливо для правильного визначення надійності захисту об'єкта від прямого удару блискавки.

Таким чином, знаючи кількість ударів блискавки в об'єкт (N_g) і прийнявши мінімально допустимий час (T) між двома небажаними подіями, ми визначаємо допустимі максимальний (I_{\max}) і мінімальний (I_{\min}) струми блискавки. Система блискавкозахисту повинна забезпечувати захист об'єкта за впливу блискавки зі струмами в діапазоні від I_{\min} до I_{\max} . Ймовірність появи струму блискавки в цьому діапазоні і є надійністю захисту.

Провівши аналіз існуючих моделей ймовірнісної оцінки інтенсивності відмов апаратів ЕЕС, необхідно зазначити, що істотним недоліком існуючих моделей є те, що вони можуть враховувати лише обмежену кількість випадкових факторів, які визначають грозостійкість об'єктів, а це впливає на точність показників надійності та ускладнює оптимізацію схем грозозахисту.

3.2 Показники грозостійкості повітряних ліній електропередавання

Нижче наведено показники грозостійкості повітряних ліній електропередавання, отримані з доступних джерел та нормативних документів [1,2,107,108]. Ці показники використовуватимуться в запропонованому нами цифровому комплексі для аналізу та оцінки надійності грозозахисту ЛЕП.

Показником грозостійкості ЛЕП є питома число її грозових відключень. В проектній та експлуатаційній практиці, залежно від розглядуваної задачі, можуть використовуватись:

- n_2 - питома число грозових відключень, розраховане для 100 км довжини і 100 грозових годин в рік працюючої ЛЕП. Цей показник, як правило, використовують для порівняння розрахункових та експлуатаційних показників грозостійкості ЛЕП, що відрізняються за конструктивним виконанням і класом номінальної напруги;

- n_2' - питома число грозових відключень для 100 км і одного року експлуатації ЛЕП. Цей показник зручний, наприклад, для порівняння грозостійкості ЛЕП в одній енергосистемі.

- N_z - абсолютне число грозових відключень, розраховане для фактичної довжини ЛЕП (l) і фактичної інтенсивності грозової діяльності, тобто число грозових відключень за аналізований період. Цей показник необхідний для вибору засобів грозозахисту або для співставлення розрахункових і експлуатаційних показників грозостійкості.

3.2.1 Вплив конструктивних параметрів ЛЕП на показники її грозостійкості

Нижче наведено вплив конструктивних параметрів ЛЕП на показники її грозостійкості, отримані з доступних джерел та нормативних документів [1,2,106,132]. Взаємозв'язок показників грозостійкості та конструкції ЛЕП найкраще проявляється для ЛЕП напругою 110 кВ і вище, виконаних на металевих і залізобетонних опорах, захищених тросом.

Для ЛЕП, що захищені тросом, числа можливих грозових відключень від ударів блискавки позначають: за ударів в опору - n_{on} , в трос - n_{mp} і прориву тросового захисту - n_{np} . За удару в опору відбувається зворотне перекриття лінійної ізоляції під дією перенапруги, що виникає від протікання струму блискавки через опору. За наслідками впливу на ізоляцію ЛЕП до цієї категорії відносяться і удари блискавки в трос поблизу опори. За удару блискавки в трос в середній частині прогону виникає перенапруга на повітряному проміжку трос-провід і, після пробігу хвилі струму по прогону та протіканні струму по опорі, також виникає перенапруга на лінійній ізоляції. Відстань по вертикалі між тросом і проводом в середині прогону нормується ПУЕ залежно від довжини прогону стосовно умов грозозахисту: до і після приходу в точку удару хвилі перенапруги, відбитої від опори з протилежним знаком; напруга на повітряному проміжку не повинна досягати його пробивного значення, тому кількість грозових відключень від ударів блискавки в середній частині прогону (n_{mp}) розраховується за ймовірністю зворотного перекриття лінійної ізоляції на опорі [1,2].

Критичні значення струму блискавки, що призводять до перекриття лінійної ізоляції ЛЕП за проривів блискавки до проводів відносно невеликі: ізоляція ЛЕП 110 – 330 кВ перебивається за амплітуди струму блискавки від 3 до 10 кА і вище, для

ізоляції ЛЕП 500 – 1150 кВ небезпечний струм блискавки становить 15 – 35 кА і вище. Практично кожен удар блискавки в провід ЛЕП 110 кВ викликає перекриття ізоляції, небезпечними за проривів на провід ЛЕП 1150 кВ є 30 – 40% розрядів блискавки. Таким чином, висока імпульсна міцність лінійної ізоляції ЛЕП 500 – 1150 кВ не забезпечує їх грозостійкості за проривів блискавки до проводів [1,2].

Зворотні перекриття виникають за значно більшої амплітуди струму блискавки. Наприклад, ізоляція ЛЕП 110 кВ перебивається за струмів удару блискавки в опору, які досягають декількох десятків кілоампер. За віддалення точки удару блискавки від опори до середини прогону ймовірність зворотного перекриття ізоляції зменшується через розподіл струму блискавки між двома опорами, зниження крутизни струму за рахунок втрат на імпульсну корону і віддаленість каналу блискавки .

Ймовірність прориву блискавки до проводів залежить від кількості і розміщення тросів відносно проводів (від кута захисту α та відстані по вертикалі між тросом і проводом Δh тощо) і висоти опори h_{on} . Ефективність тросового захисту від проривів зростає за зменшення h_{on} і α та зі збільшенням Δh . На ЛЕП 500 – 1150 кВ ймовірність прориву блискавки до проводів може зростати від впливу робочої напруги проводів, що сприяє виникненню і поширенню зустрічного лідера.

Розподіл ударів блискавки між опорою і тросом в прогоні залежить від співвідношення висоти опори та довжини прогону. За збільшення довжини прогону зменшується частка ударів блискавки в опори, тобто ударів з підвищеною ймовірністю зворотнього перекриття.

На ймовірність зворотнього перекриття ізоляції впливають наступні конструктивні параметри ЛЕП [1,2]:

- імпульсна міцність лінійної ізоляції, що визначається класом номінальної напруги ЛЕП. Вплив імпульсної міцності лінійної ізоляції виражений значно сильніше, ніж за проривів блискавки до проводів, оскільки зі збільшенням імпульсної міцності значення небезпечних для ізоляції амплітуд струму блискавки становлять від десятків кА (для ЛЕП 110 кВ), що мають ймовірність появи 0,3 - 0,4 до сотень кА (для ЛЕП 500 – 1150 кВ) – з ймовірністю появи 0,05 і менше;

- тип і розміри опори (зі збільшенням висоти опори зростає вразливість ЛЕП розрядами блискавки і зростає індуктивність опори; одностійкові залізобетонні та сталеві опори мають більшу індуктивність ніж порталні або опори з відтяжками; найбільшу індуктивність на одиницю довжини мають одностійкові залізобетонні опори, але такі опори мають, як правило, меншу висоту;

- тросовий захист (підвіска тросу за рахунок електростатичного екранування зменшує різницю потенціалів на лінійній ізоляції і зменшує частку струму блискавки, що протікає через опору, а це, в свою чергу, сприяє зменшенню спаду напруги на індуктивності та опорі заземлення опори; ефективність тросів збільшується за збільшення кількості тросів, розміщення їх на більшій відстані по горизонталі і наближення до проводів по вертикалі);

- стаціонарний та імпульсний опір заземлення опори - зменшення значення опору заземлення R_z сприяє зменшенню перенапруг на ізоляції ЛЕП; менші значення R_z потрібно забезпечити на ЛЕП, що виконані на одностійкових опорах, які мають вищу вразливість розрядами блискавки і велику індуктивність опор. Велику увагу потрібно звернути на ЛЕП 110 кВ, що виконуються в даний час на одностійкових опорах і мають порівняно невисоку імпульсну міцність лінійної ізоляції;

- миттєве значення робочої напруги.

Співвідношення числа відключень через зворотні перекриття ($n_{on} + n_{mp}$) і прориви n_{np} залежить від класу номінальної напруги і конструкції ЛЕП (типу опори, числа і розміщення тросів, опору заземлення тощо). І зі збільшенням номінальної напруги та підвищенням імпульсної міцності лінійної ізоляції підвищується загальна надійність грозозахисту ЛЕП і зменшується частка відключень від зворотних перекриттів.

3.2.2 Вплив природо-кліматичних умов та особливостей траси на надійність грозозахисту ЛЕП

Нижче наведено вплив природо-кліматичних умов і особливостей траси на показники надійності грозозахисту ЛЕП, отримані з доступних джерел та

нормативних документів [1,2,109,133]. Основними природо-кліматичними характеристиками, що впливають на показники грозостійкості ЛЕП, є інтенсивність грозової діяльності, амплітуди і крутизни струмів блискавки та електрофізичні характеристики ґрунтів в районі проходження траси ЛЕП (питомий опір, діелектрична проникність і пробивна електрична міцність ґрунту).

На показники грозостійкості можуть впливати такі особливості траси ЛЕП, як проходження ЛЕП в одному коридорі з іншими лініями, в тому числі і на вищих опорах, або екранування ЛЕП забудовами та лісовим масивом. У всіх вказаних випадках вразливість ЛЕП розрядами блискавки зменшується порівнянно з ЛЕП, що проходять по відкритій місцевості.

Показники надійності грозозахисту екранованих ЛЕП покращуються оскільки небезпечні для лінійної ізоляції розряди з великими значеннями струму I , що орієнтуються на наземні об'єкти з великої висоти, уражують, як правило, близько розміщені до ЛЕП високі об'єкти (будівлі чи лісовий масив). Дані обставини можуть бути причиною значного розходження розрахункових і експлуатаційних показників грозостійкості через неможливість врахування в існуючих методиках таких особливостей траси ЛЕП [1,2].

3.3 Математична модель для аналізу та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів

Під час створення математичної моделі для аналізу та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів було використано основні положення проекту керівних вказівок для захисту від атмосферних та внутрішніх перенапруг [1] та нормативних документів [2].

Оскільки основним недоліком існуючих математичних моделей розрахунку надійності грозозахисту є обмежені можливості врахування випадкових факторів (за п. 3.1 враховується такі випадкові фактори: функція густини ймовірності перенапруги або k -сть ударів блискавок з відповідною ймовірністю пошкодження обладнання, або заряд каналу блискавки, або k -сть ударів блискавок з відповідним часом перевищення

струму блискавки над допустимим значенням), які необхідно враховувати під час розрахунків для підвищення точності розрахунків, у пропонованій математичній моделі враховуються випадкові фактори (наведені в Розділі 2). Вагомим недоліком існуючих моделей є розрахунок напруг на ізоляції лише для верхньої фази, тому в пропонованій моделі проводяться розрахунки для всіх фаз, з врахуванням впливу миттєвого значення робочої напруги кожної з фаз.

3.3.1 Розрахунок параметрів блискавки та уражуваності лінії залежно від географічного розташування ЛЕП

Нижче наведено аналітичні вирази, отримані з відомих джерел [1,2], для застосування в розрахунках параметрів блискавки та уражуваності лінії залежно від географічного розташування ЛЕП. Ці співвідношення можна використовувати для математичного моделювання процесу розряду блискавки, як джерела перенапруг, відповідно до конкретного географічного розташування ЛЕП.

Розподіл амплітуд струму блискавки розраховують за формулою [1,2]:

$$\lg P_I = 0,666 - \sqrt{I/I_0}. \quad (3.12)$$

Середнє значення амплітуди струму блискавки I_0 для розподілу змінюється залежно від висоти місцевості H_0 над рівнем моря, в межах від $I_0 = 25$ кА на висоті $H_0 = 0$ м до $I_0 = 12,5$ кА на висоті $H_0 = 1000$ м. Значення I_0 для конкретного географічного розташування розраховують за допомогою інтерполяційної формули [1,2]:

$$I_0 = 18,75 + 6,25 \cdot \cos\left(\frac{H_0}{5,55}\right). \quad (3.13)$$

Розподіл крутизн фронту струму блискавки розраховують за формулою [1,2]:

$$\lg P_A = -A/A_0. \quad (3.14)$$

Величина крутизни фронту струму блискавки A_0 змінюється залежно від висоти місцевості H_0 над рівнем моря, в межах від $A_0 = 36 \text{ кА/мкс}$ на висоті $H_0 = 0 \text{ м}$ до $A_0 = 18 \text{ кА/мкс}$ на висоті $H_0 = 1000 \text{ м}$. Значення A_0 для конкретного географічного розташування розраховується за допомогою інтерполяційної формули [1,2]:

$$A_0 = 27 + 9 \cdot \cos\left(\frac{H_0}{5,55}\right). \quad (3.15)$$

Для оцінки уражуваності лінії необхідно враховувати рівні грозової діяльності, а саме середньорічну тривалість гроз, що визначається за допомогою карти грозової діяльності з можливістю коректування за даними місцевих метеорологічних станцій.

Відомо [1,2], що для ЛЕП розрізняють три основних розрахункових випадки грозових уражень (рисунок 3.1.):

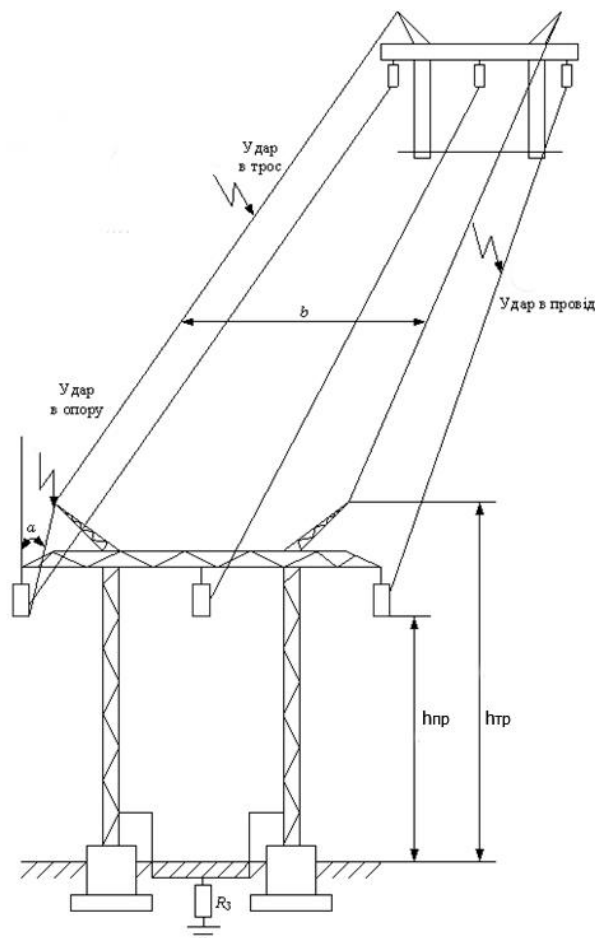


Рисунок 3.1 – Розрахункові випадки грозових уражень ЛЕП

1. Удар в опору чи удар в трос близько опори, що за своїми наслідками прирівнюється до удару в опору;
2. Удар в трос в середній частині прогону (за наявності тросового захисту);
3. Удар в провід або прорив через тросовий захист (за наявності тросового захисту).

Розрахункове число ударів для лінії на 100 км і 100 грозових годин розраховують залежно від висоти підвісу тросу (за наявності) або верхнього проводу за формулою [1,2]:

$$N = 4 \cdot h_{cp}, \quad (3.16)$$

де h_{cp} - середня висота підвісу тросу чи верхнього проводу.

Розрахункове число ударів блискавки в опору для 100 км ЛЕП і 100 грозових годин розраховують за формулою [1,2]:

$$N_{on} = 4 \cdot N \cdot \frac{h_{mp}}{l_{np}}, \quad (3.17)$$

де h_{mp} - висота підвісу тросу (за наявності тросового захисту) чи висота підвісу верхнього проводу;

l_{np} - довжина розрахункового прогону ЛЕП.

Розрахункове число ударів в провід для 100 км ЛЕП і 100 грозових годин розраховують залежно від ймовірності прориву блискавки до проводу за формулою [1,2]:

$$N_{np} = N \cdot 10^{\left(\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{mp}}}{75} - 3,95 \right)}, \quad (3.18)$$

де α - кут захисту на опорі ЛЕП (в градусах);

h_{mp} - висота підвісу тросу на опорі ЛЕП, м.

Розрахункове число ударів в середню частину тросу для 100 км ЛЕП і 100 грозових годин розраховують за формулою [1,2]:

$$N_{mp} = N - N_{on} - N_{np}. \quad (3.19)$$

Розрахункові кількості ударів в ЛЕП необхідно враховувати для оцінки надійності грозозахисту лінії, але, на наш погляд, найбільш достовірним показником кількості відключень є питома число відключень, оскільки для його визначення ми перераховуємо розрахункові кількості ударів, враховуючи ймовірності перекриття ізоляції для всіх розрахункових випадків. Тоді загальне питома число відключень для верхньої фази розраховуємо за формулою:

$$n_{в.ф} = N_{on} \cdot P_{on.в.ф.} \cdot \eta + N_{np} \cdot P_{np.в.ф.} \cdot \eta + N_{mp} \cdot P_{mp.в.ф.} \cdot \eta, \quad (3.20)$$

де N_{on}, N_{np}, N_{mp} - розрахункові кількості ударів в ЛЕП;

$P_{on.в.ф.}, P_{np.в.ф.}, P_{mp.в.ф.}$ - ймовірності перекриття ізоляції верхньої фази для розрахункових випадків

η - коефіцієнт переходу імпульсного перекриття в дугу промислової частоти.

Загальне питома число відключень для середньої та нижньої фаз розраховуємо за формулами:

$$n_{с.ф} = N_{on} \cdot P_{on.с.ф.} \cdot \eta + N_{np} \cdot P_{np.с.ф.} \cdot \eta + N_{mp} \cdot P_{mp.с.ф.} \cdot \eta \quad (3.21)$$

$$n_{н.ф} = N_{on} \cdot P_{on.н.ф.} \cdot \eta + N_{np} \cdot P_{np.н.ф.} \cdot \eta + N_{mp} \cdot P_{mp.н.ф.} \cdot \eta$$

3.3.2 Розрахунок параметрів ЛЕП

Для розрахунку геометричного коефіцієнта зв'язку та геометричного хвильового опору троса чи провода будемо використовувати ескіз проміжної опори та розрахункову схему розташування провода і одиничного троса двоколової ЛЕП, наведених на рисунку 3.2.

Розраховуємо відстань між тросом та проводом та відстань між проводом і дзеркальним відображенням троса за формулами:

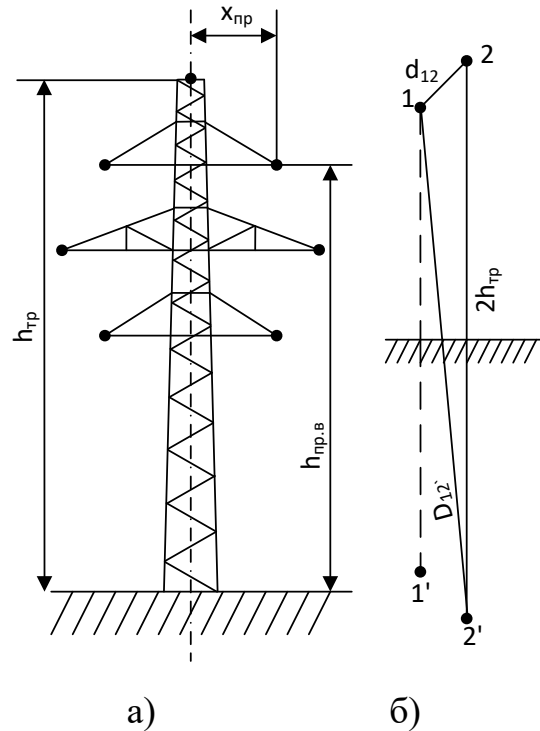


Рисунок 3.2 – Ескіз проміжної опори а); розрахункова схема розташування провoda та одиничного троса б) двоколової ЛЕП

$$D_{12'} = \sqrt{(x_{гр})^2 + (h_{гр} + h_{мп})^2}; \quad d_{12} = \sqrt{(x_{гр})^2 + (h_{мп} - h_{гр})^2}. \quad (3.22)$$

Розраховують геометричний хвильовий опір одиничного троса за формулою [1,2]:

$$z_{z,мп} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{ср.мп}}{r_{мп}}, \quad (3.23)$$

де $h_{ср.мп}$ - середня висота підвісу троса;

$r_{мп}$ - радіус троса.

Розраховують геометричний хвильовий опір проводів ЛЕП за формулами [1,2]:

$$z_{z,пр.в} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{ср.пр.в}}{r_{екв.пр}}, \quad z_{z,пр.с} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{ср.пр.с}}{r_{екв.пр}}, \quad z_{z,пр.н} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{ср.пр.н}}{r_{екв.пр}}, \quad (3.24)$$

де $h_{ср.пр}$ - середня висота підвісу проводу;

$r_{екв.пр}$ - еквівалентний радіус провода.

Розраховують значення геометричного коефіцієнту зв'язку між одиничним тросом та проводом за формулою [1,2]:

$$k_{зв.з} = \frac{\ln\left(\frac{D_{12'}}{d_{12}}\right)}{\ln\left(\frac{2 \cdot h_{мп}}{r_{мп}}\right)}. \quad (3.25)$$

Аналогічні параметри розраховуємо для двоколової ЛЕП з двома тросами (рисунок 3.3).

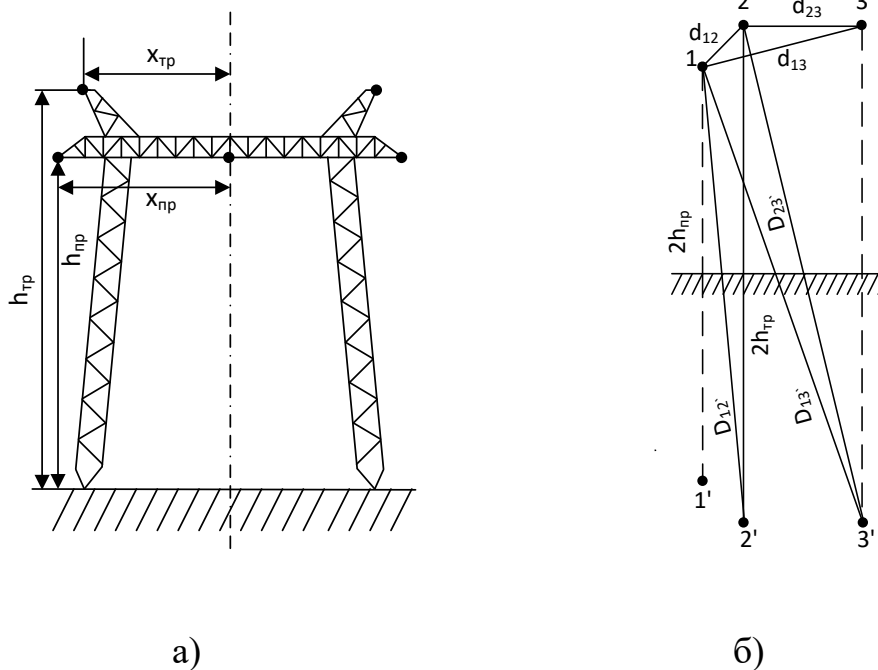


Рисунок 3.3 – Ескіз проміжної опори а) та розрахункова схема розташування проводів і двох тросів б) ЛЕП

Розраховуємо відстань між тросами та проводом та відстань між проводом і дзеркальним відображенням тросів за формулами:

$$D_{12'} = \sqrt{(x_{нп} - x_{мп})^2 + (h_{нп} + h_{мп})^2}; \quad D_{13'} = \sqrt{(x_{нп} + x_{мп})^2 + (h_{нп} + h_{мп})^2};$$

$$D_{23'} = \sqrt{(2 \cdot x_{мп})^2 + (2 \cdot h_{мп})^2}; \quad d_{12} = \sqrt{(x_{нп} - x_{мп})^2 + (h_{мп} - h_{нп})^2}; \quad (3.26)$$

$$d_{23} = 2 \cdot x_{mp}; \quad d_{13} = \sqrt{(x_{np} + x_{mp})^2 + (h_{mp} - h_{np})^2}.$$

Розраховують геометричний хвильовий опір тросів за формулою [1,2]:

$$z_{z.mp} = 30 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{mp} \cdot D_{23}}{r_{mp} \cdot d_{23}} \quad (3.27)$$

Розраховують геометричний хвильовий опір проводів ЛЕП за формулами [1,2]:

$$z_{z.np.g} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{cp.np.g}}{r_{екв.np}}; \quad z_{z.np.c} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{cp.np.c}}{r_{екв.np}}; \quad z_{z.np.n} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{cp.np.n}}{r_{екв.np}}; \quad (3.28)$$

Розраховують значення геометричного коефіцієнту зв'язку між двома тросами та проводом за формулою [1,2]:

$$k_{зв.з} = \frac{\ln \left(\frac{D_{12} \cdot D_{13}}{d_{12} \cdot d_{13}} \right)}{\ln \left(\frac{2 \cdot h_{mp} \cdot D_{23}}{r_{mp} \cdot d_{23}} \right)}. \quad (3.29)$$

Розраховуємо значення частоти перенапруг, що визначаються параметрами ЛЕП (з врахуванням стаціонарного та імпульсного опорів заземлення):

$$\lambda = \frac{R + R_{имн}}{\frac{L_{mp}}{2} + L_{он}^{mp}}, \quad (3.30)$$

де R - стаціонарний опір заземлення опори ЛЕП;

$R_{имн}$ - імпульсний опір заземлення опори ЛЕП;

$\frac{L_{mp}}{2}$ - еквівалентна індуктивність троса для однакових довжин прогону, що

відходять в дві сторони від пошкодженої опори;

$L_{он}^{mp}$ - індуктивність опори від основи до точки підвісу троса (за наявності тросового захисту) чи до вершини опори.

3.3.3 Розрахунок складових перенапруг на ізоляції ЛЕП

В Розділі 2 було показано, що перекриття ізоляції ЛЕП виникає за умови, коли сума імпульсної і робочої напруг на проводі досягає розрядної напруги лінійної ізоляції, що визначається вольт-секундною характеристикою ізоляції для розрядів на фронті імпульсу перенапруг, тобто коли:

$$U_{iz}(t) = U_R(t) + U_{in.m}(t) + U_{in.e}(t) - U_{in.mp}(t) + U_{роб}(t) \geq U_i^+(t). \quad (3.31)$$

За удару блискавки в ЛЕП імпульсна напруга на ізоляції складається з наступних складових [1,2]:

- Складова, викликана спадом напруги на опорі заземлення опори розраховується за формулою:

$$U_R(t) = \frac{A_{кр}}{R} \left[\frac{L_{mp}}{2} - 0,2 \cdot h_{mp} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + 2h_{mp}}{2,6h_{mp}} + 1 \right) \right] \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot R, \quad (3.32)$$

де $A_{кр}$ - критична крутизна струму блискавки, $\frac{\kappa A}{\text{мкс}}$;

90 – абсолютна швидкість зворотнього розряду блискавки $\frac{\text{м}}{\text{мкс}}$.

- Магнітна складова індукованої напруги, що створюється струмом в опорі та струмом в каналі блискавки, розраховується за формулою :

$$U_{in.m.np.e}(t) = L_{on}^{np.e} \cdot A_{кр} \left[1 - \frac{L_{on}^{mp} + 0,2h_{mp} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + 2h_{mp}}{2,6h_{mp}} + 1 \right)}{\frac{L_{mp}}{2} + L_{on}^{mp}} \right] \cdot e^{-\lambda t} + \\ + A_{кр} \cdot 0,2h_{np.e} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + H_e}{1,3H_e} - \frac{\Delta h_e}{2h_{np.e}} \ln \frac{H_e}{\Delta h_e} + 1 \right), \quad (3.33)$$

де $L_{on}^{np.e}$ - індуктивність опори від основи до точки підвісу проводу;

$H_e, \Delta h$ - сума та різниця висот підвісу тросу та проводу.

Магнітну складову розраховуємо для трьох фаз відповідно до висоти підвісу проводу. Розрахунок для кожної фази виконуємо з метою оцінки величин перенапруг на кожній з них.

- Електрична складова індукованої напруги розраховується за формулою:

$$U_{ін.е.нр.в}(t) = A_{кр} \frac{h_{нр.в}}{3} \left(1 - k_{зв.к} \frac{h_{мп}}{h_{нр.в}} \right) \cdot \ln \frac{(90t + h_{мп}) \sqrt{(90t + h_{мп})^2 - h_{нр.в}^2}}{1,69h_{мп} \sqrt{\Delta hH}}, \quad (3.34)$$

де $k_{зв.к}$ - коефіцієнт зв'язку проводу з коронуючим тросом.

Електричну складову розраховуємо для трьох фаз відповідно до висоти підвісу проводу.

- Складова напруги, індукована в проводі струмом в тросі, розраховується за формулою:

$$U_{ін.мп}(t) = A_{кр} \cdot k_{зв.к} \cdot \left(\left[\frac{L_{мп}}{2} - 0,2 \cdot h_{мп} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + 2h_{мп}}{2,6h_{мп}} + 1 \right) \right] \cdot (1 - e^{-\lambda t}) + L_{он}^{мп} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{L_{он}^{мп} + 0,2 \cdot h_{мп} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + 2h_{мп}}{2,6h_{мп}} + 1 \right)}{\frac{L_{мп}}{2} + L_{он}^{мп}} \right] \cdot e^{-\lambda t} + \right. \\ \left. + 0,2 \cdot h_{мп} \cdot \left(\ln \frac{90 \cdot t + 2h_{мп}}{2,6h_{мп}} + 1 \right) \right) \quad (3.35)$$

- Миттєві значення робочої напруги розраховуємо за формулами:

$$U_{роб.в}(t) = U_{нб.роб} \cdot \cos(\varphi_0 + n \cdot \Delta\varphi); \quad U_{роб.с}(t) = U_{нб.роб} \cdot \cos\left[(\varphi_0 - 120^\circ) + n \cdot \Delta\varphi\right]; \\ U_{роб.н}(t) = U_{нб.роб} \cdot \cos\left[(\varphi_0 + 120^\circ) + n \cdot \Delta\varphi\right], \quad (3.36)$$

де $n = [0...i]$ - кількість інтервалів поділу періоду миттєвого значення робочої напруги;

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{i-1} - \text{градусна міра відповідного } i - \text{го інтервалу};$$

φ_0 - початкова фаза робочої напруги.

Залежно від конструкції опори (наявність чи відсутність тросового захисту) та розрахункових випадків грозових уражень на ізоляції ЛЕП пропонуємо формувати перенапругу, що складається з різної кількості складових відповідно, до конструкції ЛЕП (рисунок 3.4).

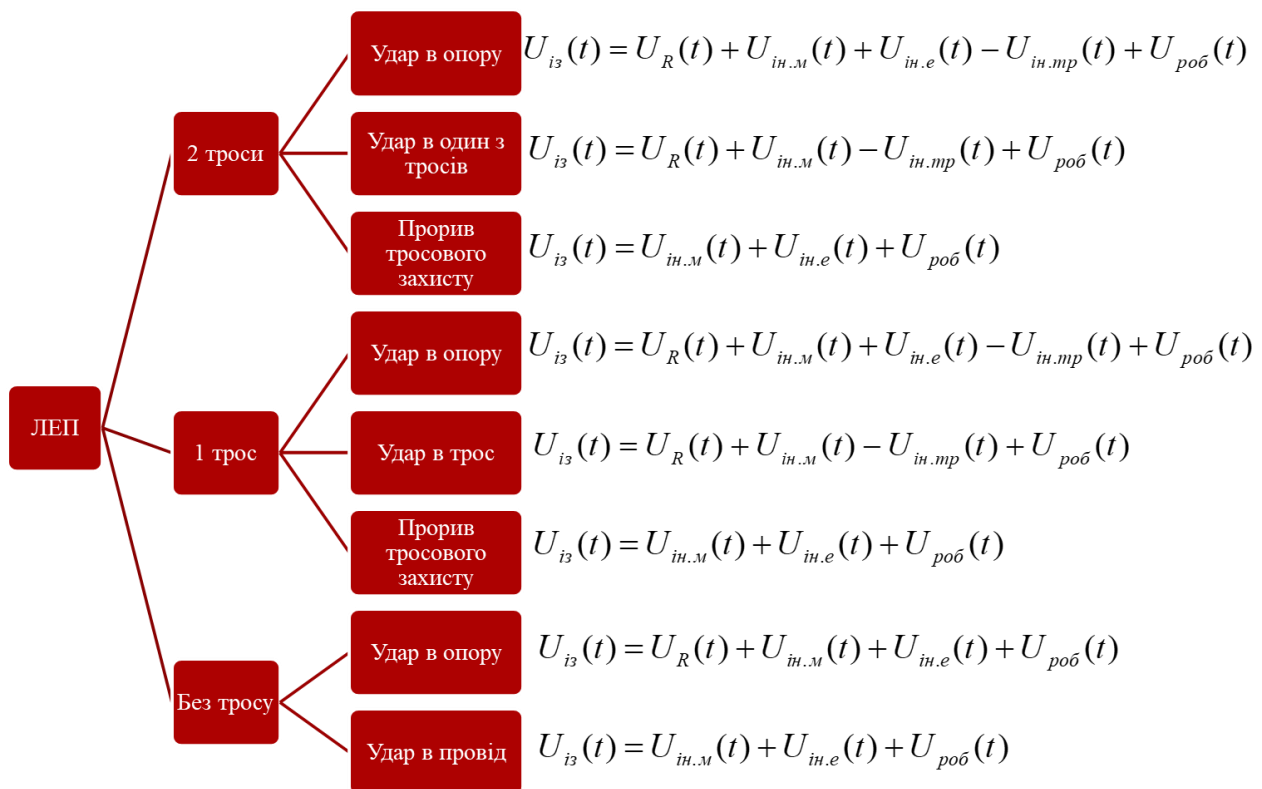


Рисунок 3.4 – Складові перенапруг на ізоляції залежно від конструкції опори та розрахункових випадків грозових уражень ЛЕП

Розрядна напруга лінійної ізоляції визначається вольт-секундною характеристикою ізоляції, але оскільки експериментальний метод зняття ВСХ є дуже затратним та трудомістким процесом та в паспортах ЛЕП вказані лише 50% розрядні напруги, тому пропонуємо перераховувати ВСХ, застосовуючи відповідні теорії та методи.

За впливів, близьких до стандартних грозових імпульсів, ВСХ описується рівнянням [103]:

$$U_{BCX}(t) = 400 \cdot H_{із} \cdot s + \frac{710 \cdot H_{із} \cdot s}{t^{0.75}}, \quad (3.37)$$

де $H_{із}$ - будівельна висота одного ізолятора, м;

s - кількість ізоляторів в гірлянді.

В Розділі 2 було показано, що для розрахунків ВСХ необхідно враховувати конкретні метеорологічні умови на час розряду блискавки та стан ізоляції. Врахування впливу метеорологічних умов відбувається шляхом перерахунку напруг, що витримує ізоляція за нормальних метеорологічних умов, на напруги, які ізоляція може витримувати реально. Врахування впливу стану ізоляції відбувається шляхом перерахування напруг, які витримує суха та незабруднена ізоляція, на напруги, які вона може витримувати реально. Розрахунок ВСХ ізоляції з врахуванням впливу метеорологічних умов та стану ізоляції здійснюємо за формулою:

$$U_{BCX}(t) = \left(400 \cdot H_{із} \cdot s + \frac{710 \cdot H_{із} \cdot s}{t^{0.75}} \right) \cdot \frac{0,386 \cdot p \cdot (0,0075 \cdot g + 0,918)}{273 + t^{\circ}} \cdot \frac{s \cdot L_n}{\lambda_p \cdot U_{\phi.м}} \quad (3.38)$$

де p, t, g - тиск, температура та абсолютна вологість повітря на час розряду блискавки;

L_n - довжина шляху виток ізоляторів нормального виконання для різних ступенів забруднення;

λ_p - розрядна питома довжина шляху виток ізолятора;

$U_{\phi.м}$ - найбільша тривало допустима в експлуатації фазна напруга ЛЕП (ефективне значення).

3.3.4. Розрахунок кривих небезпечних параметрів та показників надійності грозозахисту ЛЕП

Кожному удару блискавки властиві відповідні параметри струму блискавки. Ці параметри (амплітуда та крутизна струму блискавки) визначають конкретну точку кривої небезпечних параметрів. При цьому, всі точки, що лежать вище від КНП знаходяться в області небезпечних параметрів, яким властиве перекриття лінійної ізоляції. Всім точкам, що знаходяться нижче від КНП відповідають параметри блискавки, що є безпечними для ізоляції.

КНП будуємо, використовуючи чисельний метод. Поєднання параметрів крутизни струму $A_{кр.в}(t) \left[\frac{\kappa A}{\text{МКС}} \right]$ та струму $I_{кр.в}(t) [\kappa A]$ блискавки розраховуємо для всіх фаз за формулами:

$$\begin{aligned}
 A_{кр.в}(t) &= \frac{U_{BCX}(t) - U_{роб.в}(t)}{U_R(t) + U_{ин.м.нр.в}(t) + U_{ин.е.нр.в}(t) - U_{ин.тп}(t)}; I_{кр.в}(t) = A_{кр.в}(t) \cdot t_{фр} \\
 A_{кр.с}(t) &= \frac{U_{BCX}(t) - U_{роб.с}(t)}{U_R(t) + U_{ин.м.нр.с}(t) + U_{ин.е.нр.с}(t) - U_{ин.тп}(t)}; I_{кр.с}(t) = A_{кр.с}(t) \cdot t_{фр} \\
 A_{кр.н}(t) &= \frac{U_{BCX}(t) - U_{роб.н}(t)}{U_R(t) + U_{ин.м.нр.н}(t) + U_{ин.е.нр.н}(t) - U_{ин.тп}(t)}; I_{кр.н}(t) = A_{кр.н}(t) \cdot t_{фр}
 \end{aligned}
 \tag{3.39}$$

Для прикладу, за результатами розрахунків КНП ($A_{кр.в}(t); I_{кр.в}(t)$) на рисунку 3.5 наведені КНП, що відповідають удару блискавки в трос проміжної опори типу П-220-2 повітряної лінії електропередавання 220 кВ.

Для розрахунку ймовірності перекриття ізоляції необхідно побудувати КНП в ймовірнісних координатах. Поєднання параметрів крутизни струму $P_{A,в}$ та струму $P_{I,в}$ блискавки в ймовірнісних координатах розраховують для всіх фаз за формулами [1,2]:

$$P_{I.г} = 10^{0,666 \cdot \sqrt{\frac{I_г}{I_0}}}; P_{I.c} = 10^{0,666 \cdot \sqrt{\frac{I_c}{I_0}}}; P_{I.H} = 10^{0,666 \cdot \sqrt{\frac{I_H}{I_0}}}; \quad (3.40)$$

$$P_{A.г} = 10^{\frac{A_г}{A_0}}; P_{A.c} = 10^{\frac{A_c}{A_0}}; P_{A.H} = 10^{\frac{A_H}{A_0}}$$

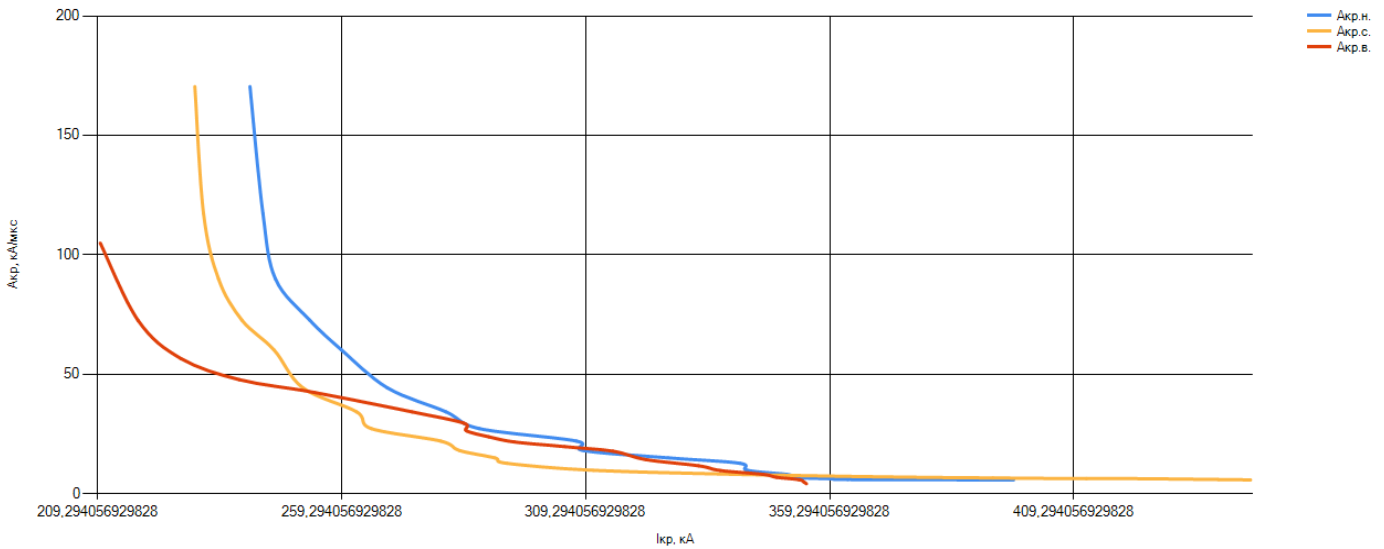


Рисунок 3.5 – КНП за удару блискавки в трос для ЛЕП напругою 220 кВ (проміжна опора типу П-220-2)

За результатами розрахунків КНП ($P_{I.г}; P_{A.г}$) будемо КНП в ймовірнісних координатах (рисунок 3.6).

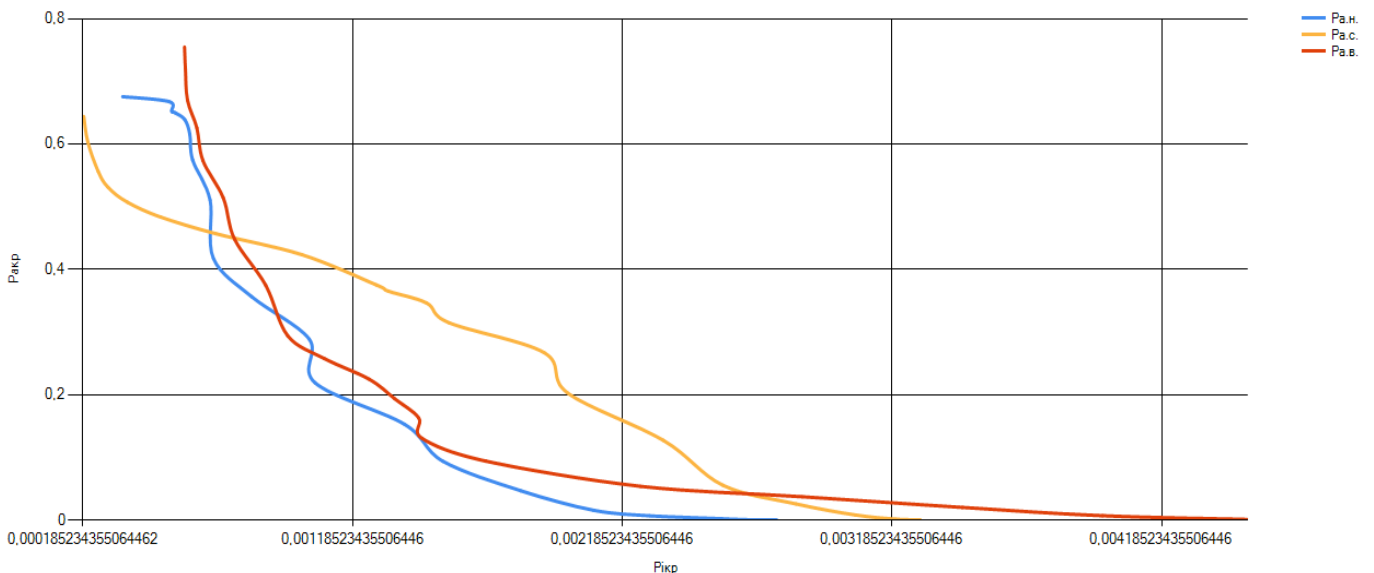


Рисунок 3.6 – КНП в ймовірнісних координатах за удару блискавки в трос для ЛЕП напругою 220 кВ (проміжна опора типу П-220-2)

Ймовірність перекриття ізоляції для розрахункових випадків визначаємо графоаналітичним інтегруванням розподілу випадкових поєднань критичних параметрів блискавки $(P_{I,\epsilon}; P_{A,\epsilon})$ по всій області, що знаходиться нижче від КНП. Для цього область нижче від КНП розбиваємо на n прямокутних ділянок. Фактично, площа між осями координат і нижче КНП чисельно дорівнює ймовірності перекриття ізоляції. Площу i – тої ділянки розраховують за формулою [1,2]:

$$\Delta_i P_\epsilon = P_{I,\epsilon_i} \cdot (P_{A,\epsilon_i} - P_{A,\epsilon_{i+1}}), \quad (3.41)$$

де P_{I,ϵ_i} - ймовірність значень струмів I блискавки, що перевищують середнє значення амплітуди струму блискавки I_0 , значення якої залежить від висоти місцевості H_0 над рівнем моря (для i – тої ділянки);

P_{A,ϵ_i} - ймовірність значень крутизн струму A , що перевищують середнє значення крутизни струму блискавки A_0 , яка залежить від висоти місцевості H_0 над рівнем моря для i – тої ділянки.

Ймовірність перекриття ізоляції, яку розраховуємо для кожного розрахункового випадку та для кожної фази визначають за формулою [1,2]:

$$P_{on,\epsilon} = \sum \Delta_i P_\epsilon. \quad (3.42)$$

Ймовірність перекриття ізоляції з урахуванням впливу випадкових факторів, визначаємо за формулою:

$$P = \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_A \Delta F(A) \cdot \sum_{\tau_\phi} \Delta F(\tau_\phi) \cdot \sum_{R_{imm}} \Delta F(R_{imm}) \cdot \sum_R \Delta F(R) \times \\ \times \sum_{u_0} \Delta F(u_0) \cdot \sum_{u_p} \Delta F(u_p) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot P\left(\bar{u}(t)\right), \quad (3.43)$$

де $\Delta F(I)$ - приріст функції розподілу струму блискавки;

$\Delta F(A)$ - приріст функції розподілу крутизни струму блискавки;

$\Delta F(\tau_\phi)$ - приріст функції розподілу часу фронту блискавки;

$\Delta F(R_{im})$ - приріст функції розподілу імпульсного опору заземлення;

$\Delta F(R)$ - приріст функції розподілу стаціонарного опору заземлення;

$\Delta F(u_0)$ - приріст функції розподілу миттєвого значення робочої напруги;

$\Delta F(u_p)$ - приріст функції розподілу розрядних напруг (перерахунок ВСХ);

$\Delta F(b)$ - приріст функції розподілу віддаленості розряду від осі ЛЕП;

$\Delta F(m)$ - приріст функції розподілу метеорологічних умов на час розряду блискавки;

$\Delta F(c)$ - приріст функції розподілу стану ізоляції на час розряду блискавки;

$P\left(\bar{u}(t)\right)$ - ймовірність порушення ізоляції ЛЕП у разі дії напруги, сформованої

одним розрядом блискавки із заданими параметрами хвилі струму блискавки.

3.4 Цифровий комплекс для розрахунків та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів

3.4.1 Загальна характеристика цифрового комплексу

Використовуючи можливості сучасної комп'ютерної техніки, математична модель, описана в розділі 3.3, була реалізована програмним методом в якості цифрового розрахункового комплексу. Вхідними даними для розрахунку служить паспорт ЛЕП, а саме: загальна інформація про ЛЕП, конструкція та геометрія опори, характеристика лінійної ізоляції, а також характеристика географічного розташування лінії та метеорологічні дані по її трасі на час грозової активності.

Користувач може проводити розрахунки як за спрощеною, так і повною моделями. Основними відмінностями між повною та спрощеною моделями є те, що повна модель розраховує параметри для 3 фаз і троса (за наявності), а спрощена – лише для верхнього проводу та троса. Також відмінності полягають у кількості врахованих випадкових факторів у цих моделях. Розрахунок проводиться для 3 розрахункових випадків грозової діяльності.

3.4.2. Опис цифрового комплексу

На рисунку 3.7 наведена структурна схема цифрового комплексу. Умовно структурну схему цифрового комплексу, можна розділи на 4 етапи - відповідно до опису математичної моделі.

На першому етапі комплекс розраховує параметри розряду блискавки для конкретного географічного розташування ЛЕП та розрахункові показники пошкоджуваності ЛЕП. На даному етапі враховується випадковий фактор - параметри хвилі струму блискавки.

На другому етапі комплекс розраховує параметри ЛЕП, необхідні для розрахунку перенапруг на ізоляції ЛЕП. На даному етапі враховується випадковий фактор - імпульсний та стаціонарний опір заземлення опори.

На третьому етапі комплекс розраховує складові перенапруг на ізоляції та розраховує ВСХ ізоляції. На даному етапі враховуються такі випадкові фактори: миттєве значення робочої напруги, метеорологічні умови, стан ізоляції, розрахунок та перерахунок ВСХ.

На четвертому етапі комплекс розраховує КНП в абсолютних та відносних координатах, а також показники надійності грозозахисту ЛЕП.

Програму цифрового комплексу написано в середовищі розробки Visual Studio 2017 мовою C#. Текст програми містить 6672 рядки. Використано принцип об'єктно-орієнтованого програмування, де ціла програма є сукупністю певних об'єктів, які взаємодіють між собою. Кожен об'єкт є незалежним один від одного і він може обробляти дані, отримувати та відправляти цю інформацію іншим об'єктам. Для передавання та збереження інформації між вікнами створено клас Full, що визначає характеристики даної сутності і включає характеристики ж самої математичної моделі та методи розрахунків. Використано принцип інкапсуляції, тобто приховування даних. Від зовнішнього користувача сховані внутрішні деталі реалізації об'єкта, але йому надано інтерфейс для роботи з ним. Після запуску програми ініціалізується об'єкт класу Full, що містить в собі всю інформацію, необхідну для виконання розрахунків, а також методи розрахунків. Інформацію

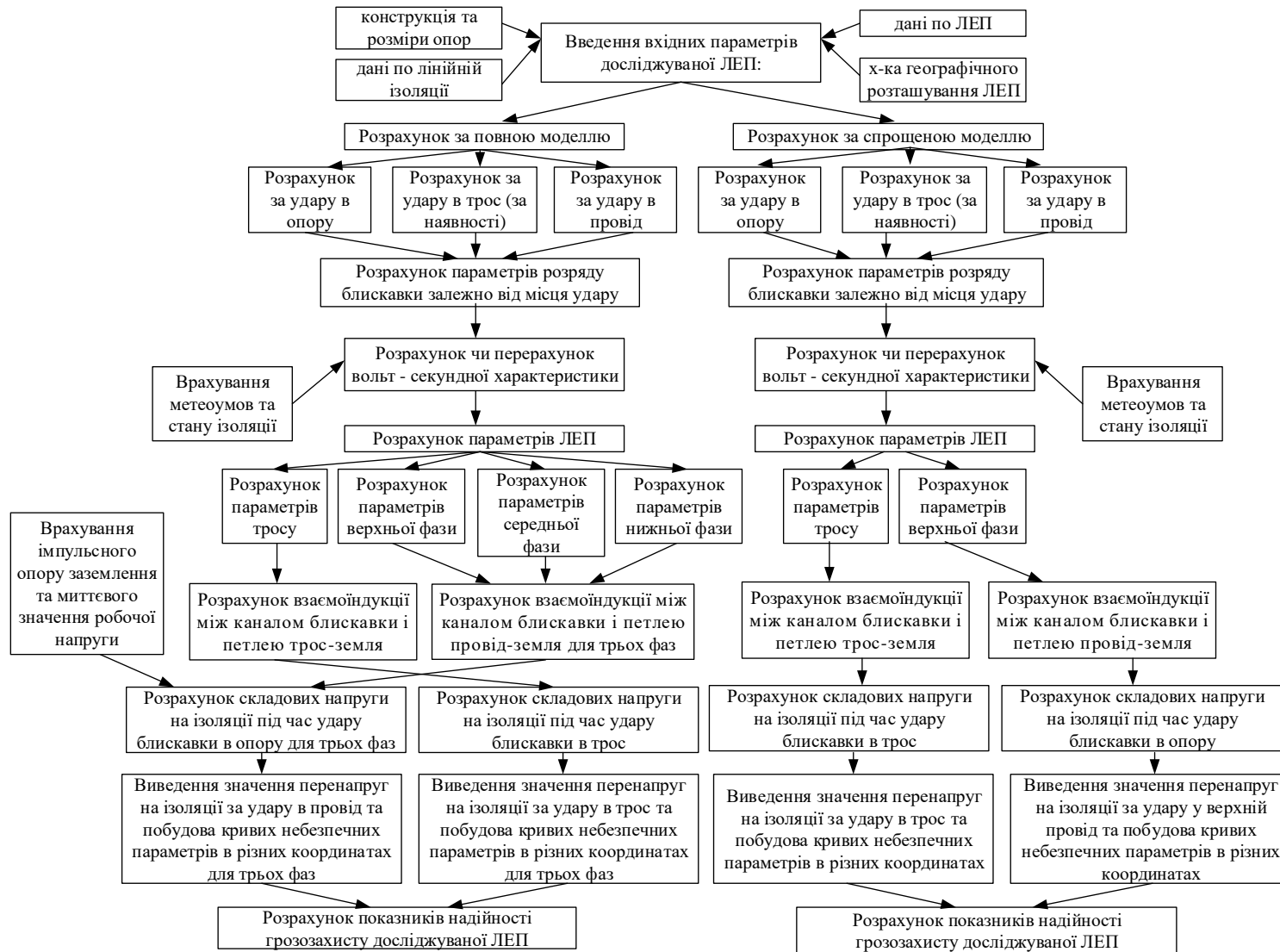


Рисунок 3.7 – Структурна схема цифрового комплексу для розрахунку та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням випадкових факторів

по розрахунках та методи розрахунку об'єкт класу Full буде передавати з форми у форму. Методи класу Full:

- `main_full_none()` – обчислення $N_{on}, N_{np}, N, A_0, I_0$ для повної і спрощеної моделі, без троса.
- `main_full_one()` – обчислення $N_{on}, N_{mp}, N_{np}, N, A_0, I_0$ для повної і спрощеної моделі, один трос.
- `main_full_two()` – обчислення $N_{on}, N_{mp}, N_{np}, N, A_0, I_0$ для повної і спрощеної моделі, два троси.
- `full_two()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для повної моделі, два троси.
- `full_one()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для повної моделі, один трос.
- `full_none()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для повної моделі, без троса.
- `simple_two()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для спрощеної моделі, два троси.
- `simple_one()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для спрощеної моделі, один трос.
- `simple_none()` – обчислення значень параметрів перенапруг, ймовірностей перекриття і складових перенапруг для спрощеної моделі, без троса.

Для змінних, що рахуються за однаковою формулою зі змінними індексами – створено масиви розмірністю в 21 елемент. Для компактнішого та швидшого обчислення масиви рахуються циклом, в якому за кожної наступної ітерації індекс i інкрементується, тобто діапазон обрахунку становить $(0; 20]$. Змінні, що необхідні для побудови графіків і звітів – оголошені глобальними та з можливістю доступу до них інших класів (тип `public`). Змінні, що використовувались лише в обчисленні, оголошені локальними в самому методі.

Вікна програми організовано за допомогою класу `Form`. До даного класу належать вікна або діалогове вікно (наприклад діалогове вікно для редагування

часових періодів фронту блискавки чи моделювання параметрів блискавки), що є користувацьким інтерфейсом програми.

За допомогою властивостей, доступних в класі Form, були визначені зовнішній вигляд, розмір, колір і компоненти управління вікном та діалоговим вікном. Події класу Form дозволяють реагувати на дії, що виконуються у формі. Можна використовувати Activated подій для виконання операцій, таких як оновлення даних, що відображаються в елементах управління форми, коли форма активується.

У класі Form також було використані наступні елементи [113]: Label (Мітки); Button (Кнопка); TextBox (Текстове поле); MenuStrip (Меню); RadioButton (Кнопки вибору опори); ComboBox (Випадаюче поле зі списком); DataGridView (Таблиці); Chart (Графіки); GroupBox (Група компонентів); PictureBox (Відображення малюнків); TabControl (Вкладки); OpenFileDialog (Вікно відкриття файлів, завантаження вхідних даних); SaveFileDialog (Вікно збереження файлів) .

Після запуску програми цифрового комплексу для розрахунку та оцінки надійності грозозахисту повітряних ліній електропереєсилання з врахуванням впливу випадкових факторів (далі «ГЛЕП») перед користувачем відкривається головне вікно програми (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Головне вікно програми «ГЛЕП»

Головне вікно програми «ГЛЕП» містить інформаційні вкладки та кнопки вибору типу розрахунку. Інформаційні вкладки призначені для ознайомлення користувача з основними положеннями грозозахисту ЛЕП (процес розряду блискавки та формування грозових хмар, характеристики розряду блискавки, методи грозозахисту ЛЕП різних класів напруги та інтенсивність грозових уражень ЛЕП та випадкові фактори, що необхідно враховувати для розрахунку надійності грозозахисту). Головне вікно «ГЛЕП» також містить інформацію про основні відмінності між моделями розрахунку, що знаходиться під кнопками вибору типу розрахунку.

Після вибору моделі розрахунку перед користувачем відкривається перше вікно введення вхідної інформації (рисунок 3.9), що містить два блоки для введення вхідних даних: «Загальна характеристика ЛЕП» та «Характеристика географічного розташування ЛЕП та метеорологічних умов на час розряду блискавки».

Перше вікно введення вхідної інформації

Завантажити вхідні дані Зберегти вхідні дані Параметри розрахунку

Загальна характеристика ЛЕП

Номинальна напруга ЛЕП Un = <input type="text" value="0"/> кВ	Середня довжина прольоту Lпр = <input type="text" value="0"/> м	Крок розщеплення проводу dnp = <input type="text" value="0"/>	Стационарний опір заземлення опори R = <input type="text" value="0"/> Ом
Найбільша тривало допустима робоча напруга Un.p. = <input type="text" value="0"/> кВ	Кількість грозозахисних тросів nтр = <input type="text" value="0"/>	Радіус проводу rпр = <input type="text" value="0"/> м	Імпульсний опір заземлення опори Rімп = <input type="text" value="0"/> Ом
Довжина ЛЕП L = <input type="text" value="0"/> км	Число складових розщепленого проводу nпр = <input type="text" value="0"/>	Радіус тросу rтр = <input type="text" value="0"/> м	Фаза робочої напруги φ0 = <input type="text" value="0"/> *

Характеристика географічного розташування ЛЕП та метеорологічних умов на час розряду блискавки

Висота місцевості над рівнем моря H0 = <input type="text" value="0"/> м	Ступінь забруднення атмосфери СЗА = <input type="text" value="1"/>	Атмосферний тиск p = <input type="text" value="0"/> мм.рт.ст.
Середньорічна тривалість гроз в районі проходження лінії N г.г. = <input type="text" value="0"/> год	Температура t = <input type="text" value="0"/> *	Абсолютна вологість g = <input type="text" value="0"/> г/м3

Рисунок 3.9 – Перше вікно введення вхідної інформації програми «ГЛЕП»

Блок «Загальна характеристика ЛЕП» містить вхідні дані з паспорту ЛЕП (номінальна напруга ЛЕП, найбільша робоча напруга ЛЕП, довжина прольоту та лінії, характеристика проводу та тросу, стаціонарний опір заземлення) та значення випадкових факторів, таких як: імпульсний опір заземлення та фаза миттєвого значення робочої напруги. Блок «Характеристика географічного розташування ЛЕП та метеорологічних умов на час розряду блискавки» містить вхідні дані з паспорту ЛЕП та нормативної документації (висота місцевості траси ЛЕП над рівнем моря, ступінь забруднення атмосфери та середньорічна тривалість гроз в районі проходження ЛЕП) і значення метеорологічних умов на час розряду блискавки, що є випадковим фактором.

Друге вікно введення вхідної інформації (рисунок 3.10) містить два блоки для введення вхідних даних: «Конструкція опори ЛЕП» та «Характеристика лінійної ізоляції».

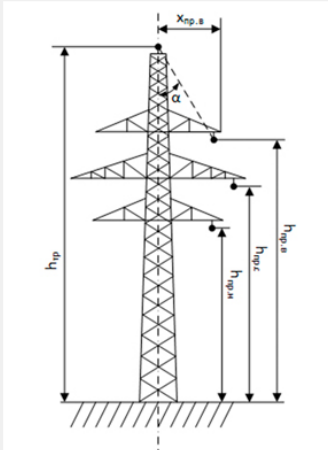
Друге вікно введення вхідної інформації

Завантажити вхідні дані Зберегти вхідні дані Параметри розрахунку

Конструкція опори ЛЕП

Тип опори

- Дерев'яна П-подібна
- Дерев'яна АП-подібна
- Металева башена
- Залізобетонна башена
- Металева портална
- Залізобетонна портална
- Металева на відтяжках
- Залізобетонна на відтяжках



Висота підвісу тросу
h_{tr} = м

Висота підвісу нижнього проводу
h_{n.pr} = м

Відстань від осі лінії до тросу
х_{tr} = м

Висота підвісу верхнього проводу
h_{v.pr} = м

Найменша допустима відстань від нижнього проводу до землі
h_r = м

Відстань від осі лінії до верхнього проводу
х_{v.pr} = м

Висота підвісу середнього проводу
h_{c.pr} = м

Найменша допустима відстань між тросом і верхнім проводом
h_{tr-pr} = м

Захисний кут тросу на опорі
α = °

Характеристика лінійної ізоляції

Висота одного ізолятора в гірлянді
h_{із} = м

50% розрядна напруга лінійної ізоляції для від'ємної полярності
U_{-імп} = кВ

Кількість ізоляторів в гірлянді
s_{із} =

50% розрядна напруга лінійної ізоляції для додатньої полярності
U_{+імп} = кВ

ВСХ лінійної ізоляції

	U _i (кВ)	tφ _i (мкс)
*		

Рисунок 3.10 – Друге вікно введення вхідної інформації програми «ГЛЕП»

Блок «Конструкція опори ЛЕП» містить вхідні дані з паспорту ЛЕП та нормативної документації (тип опори, висота підвісу тросу та проводів, відстані від

осі лінії до тросу та проводу, кут захисту та нормативні відстані підвісу трос – провід - земля). Блок «Характеристика лінійної ізоляції» містить вхідні дані з паспорту ЛЕП (будівельна висота та кількість ізоляторів в гірлянді, розрядні характеристики лінійної ізоляції та ВСХ за наявності).

Вікна введення вхідної інформації містять також такі кнопки керування:

- Завантаження чи збереження вхідних даних. Файл вхідних даних формується у форматі txt, що дає можливість збереження, редагування та завантаження вхідних даних;
- Параметри розрахунку:
 - ✓ Редагування часових періодів фронту блискавки для розрахунку – застосовують для зміни часового діапазону розряду під час розрахунку перенапруг та КНП;
 - ✓ Моделювання параметрів блискавки для розрахунку перенапруг – застосовують для зміни крутизни струму блискавки під час розрахунку перенапруг;
 - ✓ Параметри перенапруг – застосовують для редагування графіку перенапруг.

Під час компіляції програми користувачу відкривається головне вікно результатів (рисунки 3.11), що містить інформаційну область (де наведено розрахункові кількості ударів в ЛЕП, очікувані питомі показники відключень кожної фази та ескіз опори з точками уражень блискавки) та кнопки вибору результатів розрахунку залежно від розрахункового випадку (удар в опору, трос, провід).

Після натискання кнопки «Удар блискавки в опору ЛЕП» перед користувачем відкривається вікно результатів розрахунку під час удару блискавки в опору (рисунки 3.12). Вікно результатів розрахунку містить інформаційну область (де наведено характерні для географічного розташування ЛЕП амплітудні значення величини струму та крутизни струму блискавки та ймовірності перекриття ізоляції кожної з фаз) та область побудови графіку.

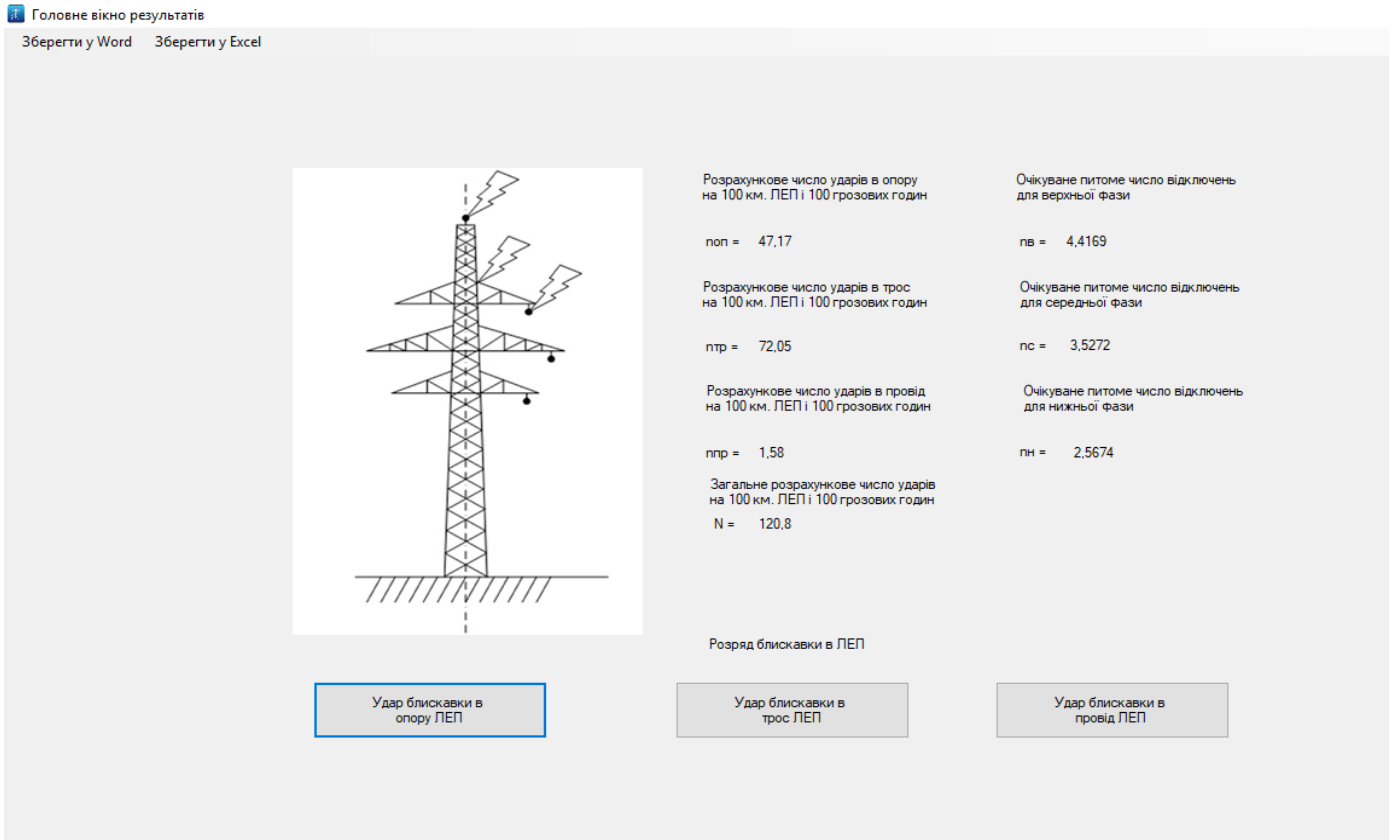


Рисунок 3.11 – Головне вікно результатів програми «ГЛЕП»

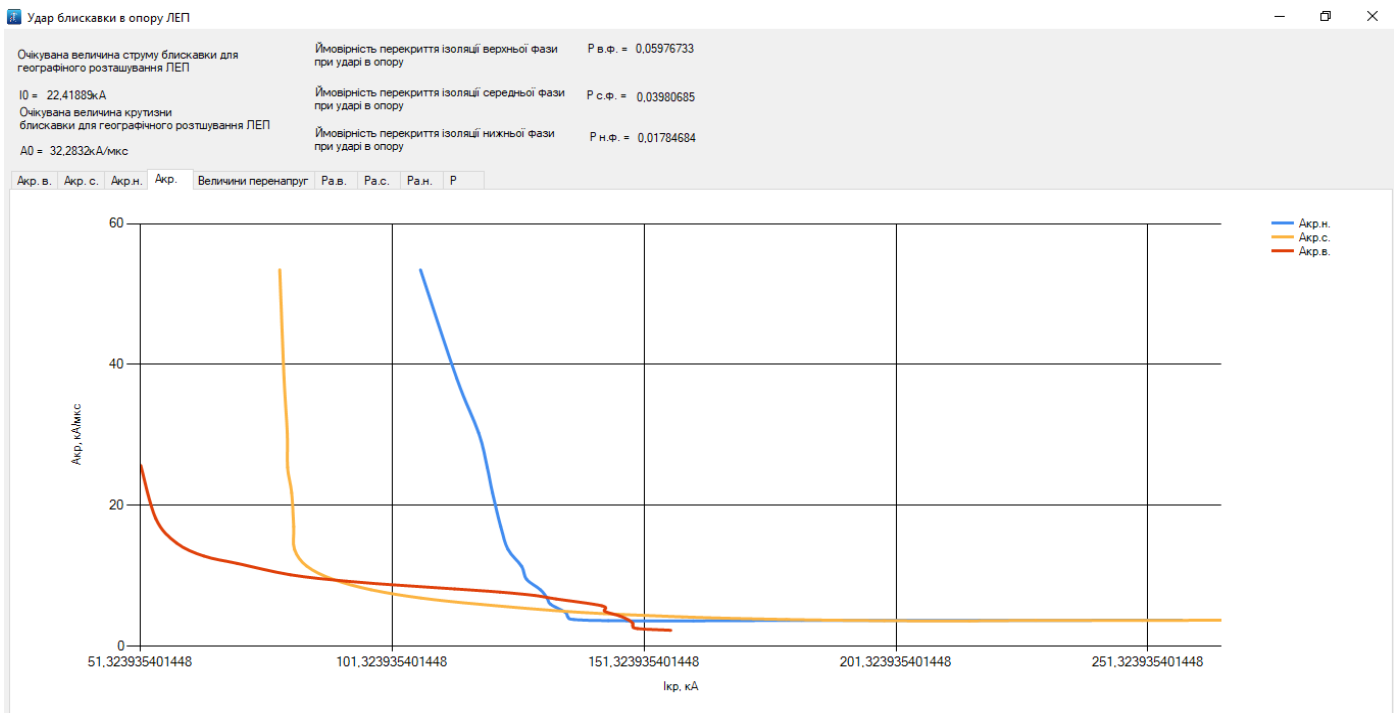


Рисунок 3.12 – Вікно результатів розрахунку під час удару в опору програми «ГЛЕП» (КНП в абсолютних одиницях для трьох фаз)

Користувач має можливість вибрати тип графіку, а саме: КНП в абсолютних одиницях для кожної з фаз окремо та спільний графік КНП, графік перенапруг для

трьох фаз та ВСХ ізоляції, КНП в ймовірнісних одиницях для кожної з фаз окремо та спільний графік КНП.

Після натискання кнопки «Удар блискавки в трос ЛЕП» перед користувачем відкривається вікно результатів розрахунку під час удару в трос (рисунок 3.13). Після натискання кнопки «Удар блискавки в провід ЛЕП» перед користувачем відкривається вікно результатів розрахунку під час удару в провід (рисунок 3.14).

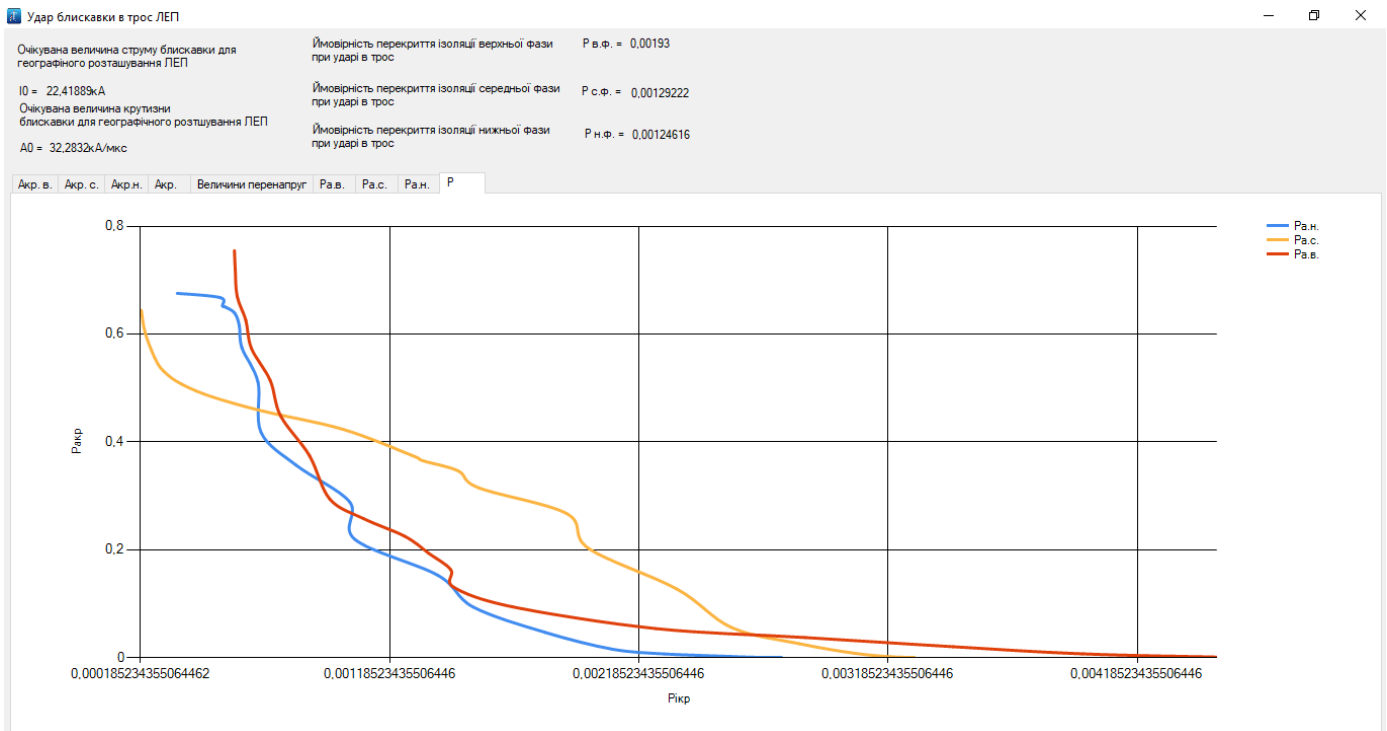


Рисунок 3.13 – Вікно результатів розрахунку під час удару блискавки в трос програмою «ГЛЕП» (КНП в ймовірнісних одиницях для трьох фаз)

У вікні результатів містяться також такі кнопки керування:

- Зберегти у Word – застосовується для формування звіту за результатами розрахунку. Звіт містить значення випадкових факторів, які були враховані та основні результати розрахунку в числовому та графічному вигляді;
- Зберегти у Excel – застосовується для експорту результатів розрахунку в середовище Excel з метою проведення подальшої статистичної обробки результатів.

В додатку В наведено порівняння результатів розрахунку надійності грозозахисту виконаних за методикою [1,2] та за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП» на прикладі ЛЕП 500 кВ, виконаної проміжними металевими опорами типу ПБ-2.

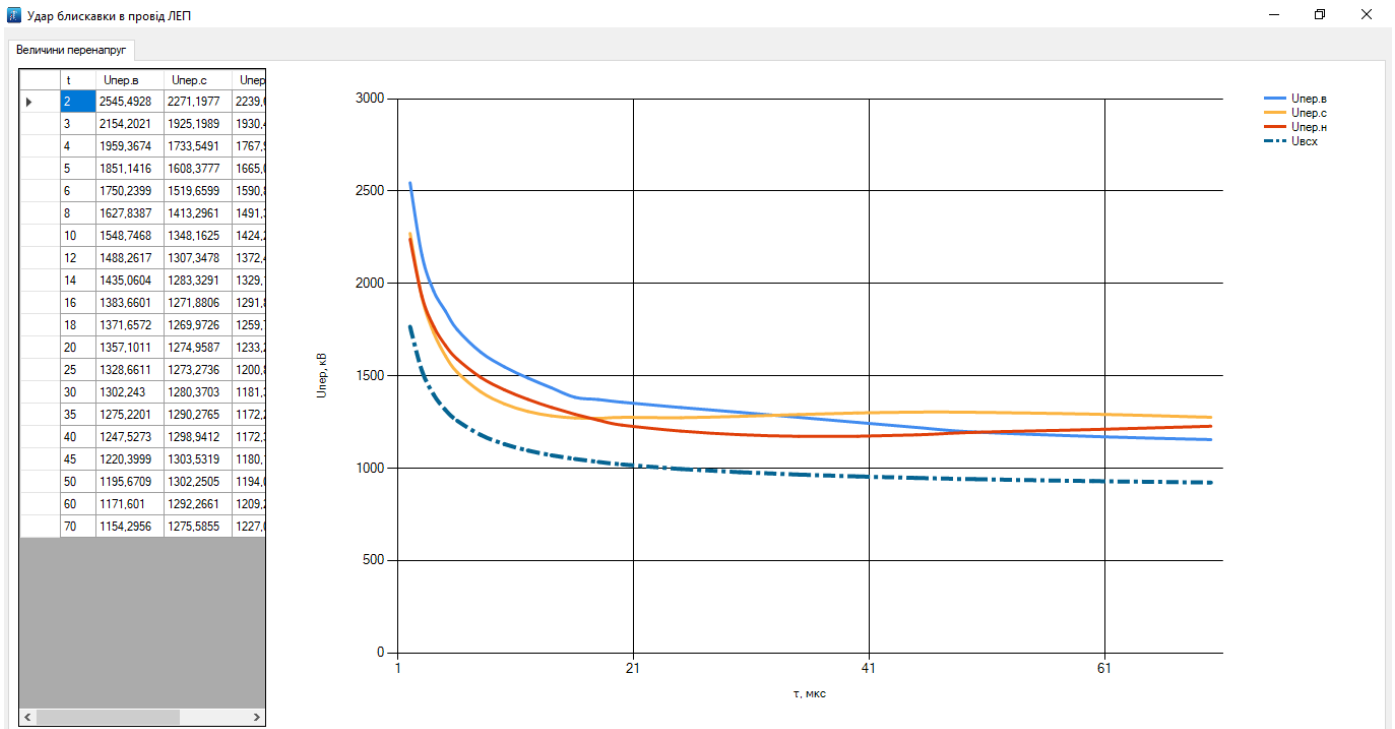


Рисунок 3.14 – Вікно результатів розрахунку програмою «ГЛЕП» під час удару блискавки в провід (графік перенапруг для трьох фаз та ВСХ ізоляції)

3.5. Висновки до розділу 3

1. Аналіз наведених в доступних джерелах моделей ймовірнісної оцінки інтенсивності вимкнень ЛЕП виявив їх істотний недолік - врахування лише обмеженої кількості випадкових факторів, що визначають грозостійкість об'єктів, а це негативно впливає на точність розрахунків показників надійності та ускладнює оптимізацію схем грозозахисту.

2. У запропонованій математичній моделі враховано практично всі випадкові величини, що визначають грозостійкість ЛЕП, а розроблені принципи розрахунків надійності грозозахисту забезпечують адекватність отриманих результатів відповідним природнім процесам.

3. Розроблено ефективний цифровий комплекс для розрахунку та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів. В комплексі використано основні принципи розрахунку, обгрунтовані в запропонованій математичній моделі, з врахуванням широкого кола випадкових факторів, що визначають грозостійкість ЛЕП.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ ФАКТОРІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1 Розрахунок надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання 110 – 330 кВ

Нижче наведено результати розрахунків надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання 110 – 330 кВ електромереж Західного регіону України (Львівська, Івано-Франківська, Закарпатська, Рівненська і Волинська області). Дослідження проведено для ЛЕП Західного регіону оскільки для цих ЛЕП планується в першу чергу використати результати розрахунків для покращення надійності грозозахисту ліній електропересилання. Розрахунки виконувались здобувачем і з застосуванням розробленого ним цифрового комплексу, описаного в Розділі 3. Надійність систем грозозахисту ЛЕП розрахована з врахуванням впливу випадкових факторів, врахованих в запропонованій математичній моделі (див. Розділи 2, 3) – з використанням параметрів випадкових факторів (погода, параметри ґрунту, грозова активність тощо), а також параметрів обладнання ЛЕП (конструкція опор, проводів, заземлення тощо) та систем грозозахисту ЛЕП і підстанцій (грозозахисні розрядники, триси тощо), наведених в доступних джерелах. Деякі параметри, наприклад, опори заземлення діючих опор ЛЕП електромереж Західного регіону та питомі опори ґрунту в зоні проходження ЛЕП, брались за результатами натурних вимірювань (в т.ч. автором) приладом типу MRU – 105 (див. Додаток А).

У нижченаведених графіках напруг на ізоляції за ударів блискавки в ЛЕП пунктирною лінією показана вольт – секундна характеристика ізоляції ($U_{BCX}(\tau)$). За залежністю $U_{BCX}(\tau)$ оцінюємо, чи за конкретного удару блискавки відбувається перекриття ізоляції ЛЕП (величина розрахункової напруги більша від U_{BCX}), чи перекриття ізоляції відсутнє (величина розрахункової напруги менша від величини U_{BCX}).

4.1.1 Розрахунок надійності грозозахисту повітряної лінії електропередавання 110 кВ Л 2- ЛТЕЦ 1

За даними ПрАТ Львівобленерго о 17:08 21.07.2017р від дії захистів Аз I ст. відбулось двостороннє вимкнення вимикачами 110 кВ - зі сторін підстанцій (ПС) Львів-2 (Л-2) і Львівської ТЕЦ-1 (ЛТЕЦ-1), повітряної лінії електропередавання 110 кВ (ПЛ-110) Л-2 - ЛТЕЦ-1, канал Б. Встановлено, що на опорі 26 повітряної лінії 110 кВ Л-2 - ЛТЕЦ-1 канал Б (к.Б) є обрив гірлянди (руйнування від струму блискавки – тут була в цей час сильна гроза) і провід фази В впав на траверзу опори.

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 110 кВ Л 2 – ЛТЕЦ 1 протяжністю 10,584 км. Середня висота місцевості по якій проходить ЛЕП становить 296 м. ЛЕП проходить по території Львівської області (рисунок 4.1). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 65 гроз. год. Досліджуємо проміжну залізобетонну опору №26 типу ПТМ.

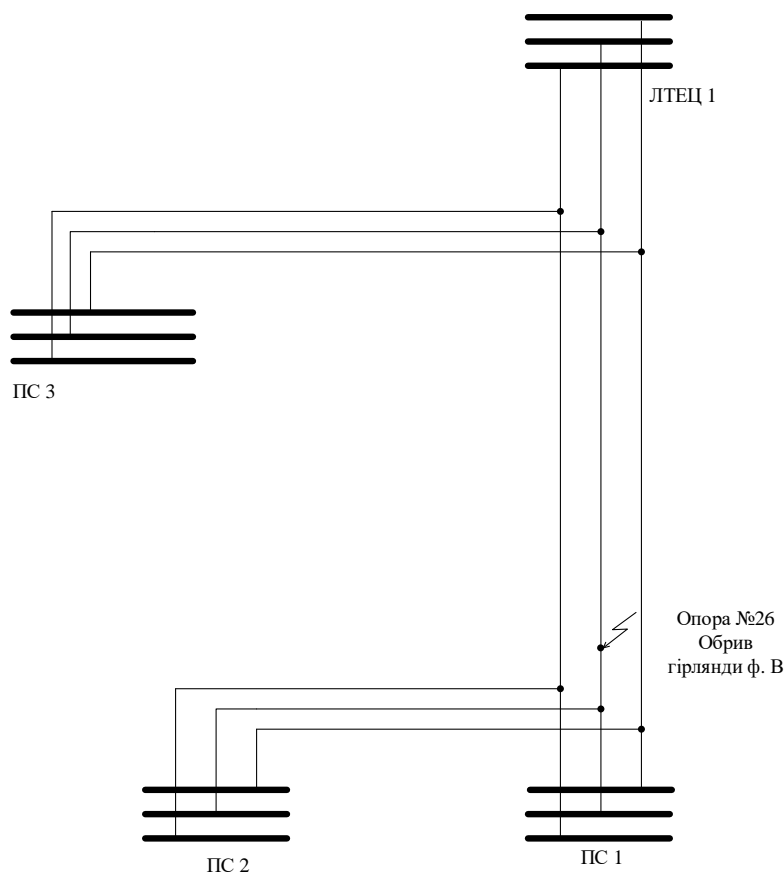


Рисунок 4.1 – Фрагмент схеми мережі 110 кВ ПрАТ «Львівобленерго»

ЛЕП виконана проводом марки АС 120/27 (к-сть кіл -1, к-сть проводів у фазі - 1) з ізоляторами типу ПС – 70А (к-сть ізоляторів в гірлянді – 8) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 50.

Для досліджуваної опори було проведено вимірювання опору заземлення опори та встановлено, що опір заземлення становить 11,1 Ом (значення опору перевищує норму 10 Ом, оскільки питомий опір ґрунту не перевищує 100 Ом·м). Оскільки вимірювання проводились приладом Ф4103-М1 без зняття грозозахисного тросу, то дійсне значення опору заземлення може бути більшим ніж зазначене.

Для досліджуваної опори розраховано напруги за удару блискавки в опору для поточного (рисунок 4.2) та нормованого опорів заземлення (рисунок 4.3).

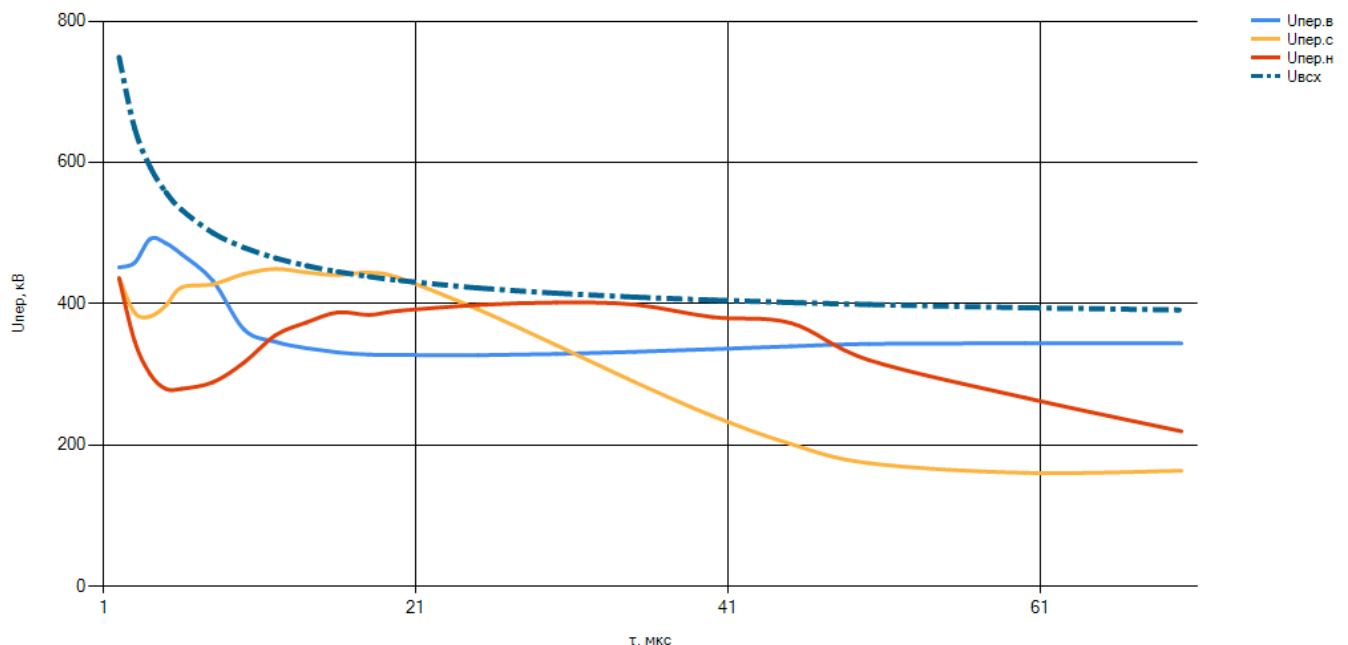


Рисунок 4.2 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №26 110 кВ Л2-ЛТЕЦ1 за поточного опору заземлення

З рисунків 4.2 та 4.3 бачимо, що можливе перекриття ізоляції під час удару блискавки в опору на середній фазі за поточного значення опору заземлення, а також відсутність перекриття ізоляції за нормативного опору заземлення. Для даної лінії було розраховано та побудовано графіки перенапруг під час удару блискавки в трос в середині прогону, а також прориву тросового захисту (рисунки 4.4, 4.5).

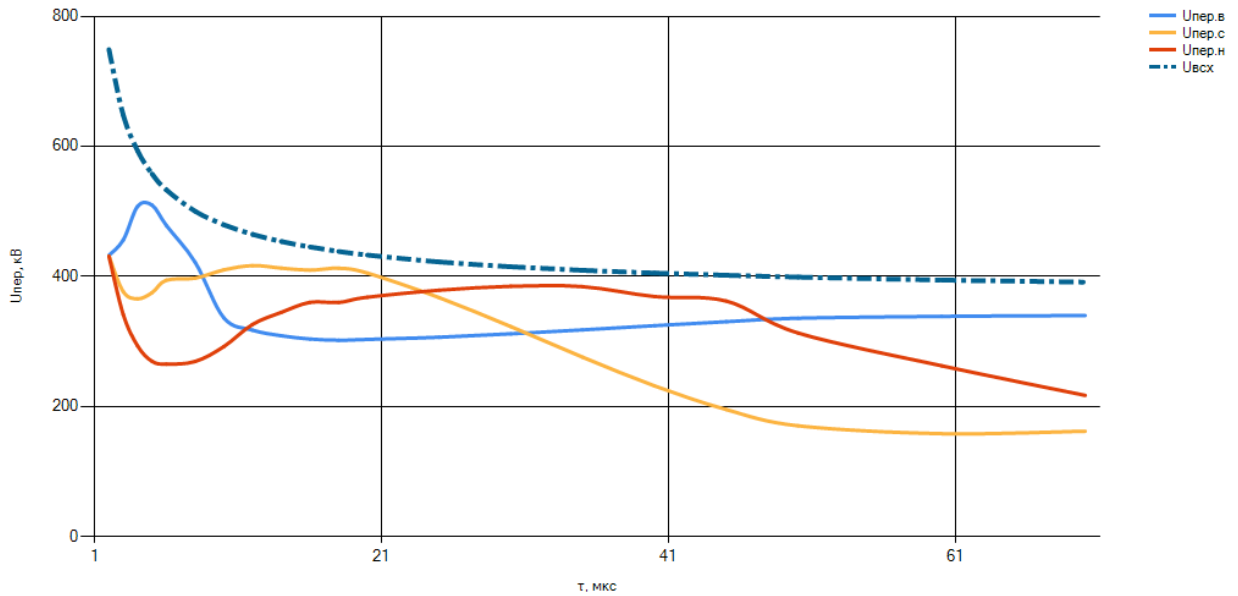


Рисунок 4.3 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №26 110 кВ Л2-ЛТЕЦ1 за нормованого опору заземлення

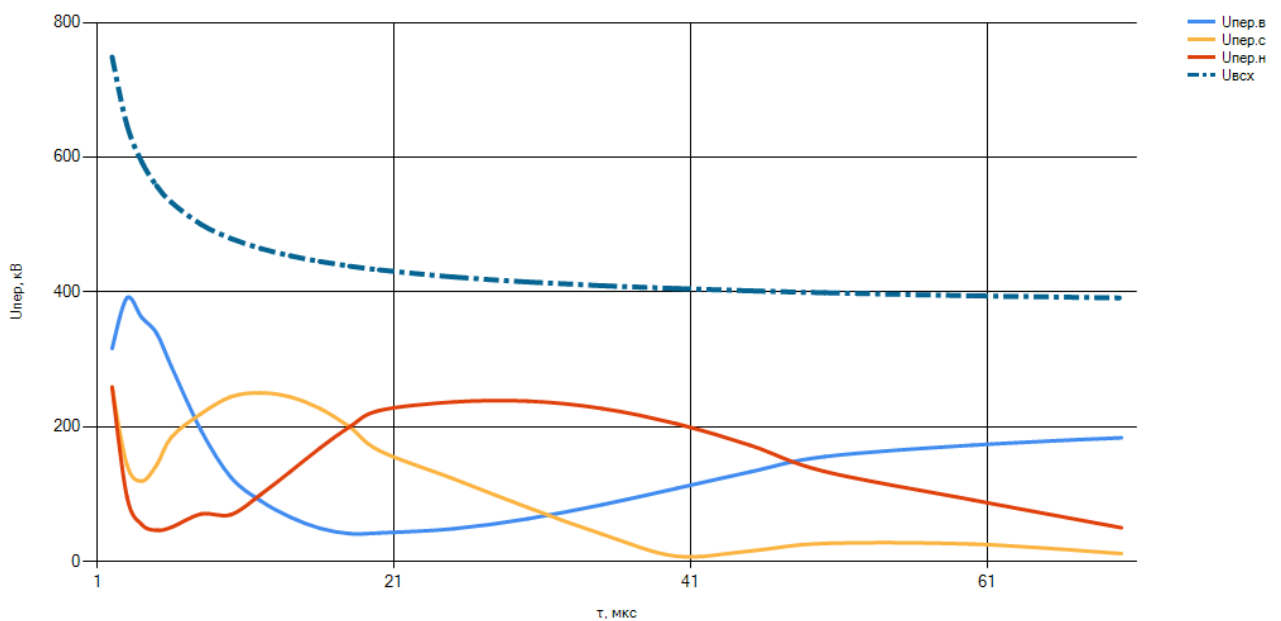


Рисунок 4.4 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос біля опори №26 110 кВ Л2-ЛТЕЦ1

Під час удару в трос (рисунок 4.4) перекриття ізоляції ЛЕП відсутнє, а під час прориву тросового захисту (рисунок 4.5) наявне перекриття ізоляції трьох фаз. Для досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз (таблиця 4.1), та побудовано КНП в абсолютних та ймовірнісних одиницях (рисунок Б.1).

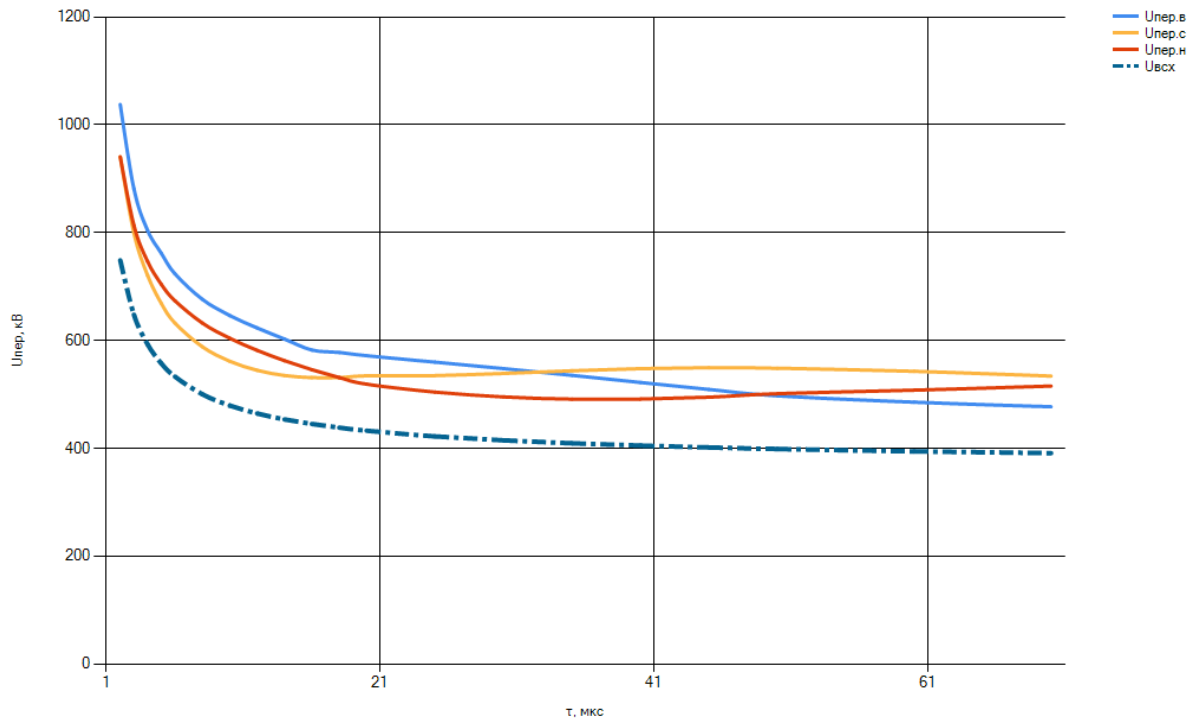


Рисунок 4.5 - Розрахункові напруги на ізоляції за прориву блискавки через тросовий захист опори №26 110 кВ Л2-ЛТЕЦ1

Таблиця 4.1 Показники пошкоджуваності та ймовірності перекриття фаз ЛЕП 110 кВ Л2 – ЛТЕЦ1

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть	10,63	8,3922	7,8102
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,232466	0,170395	0,149061
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,050842	0,03177	0,028785
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896

4.1.2 Розрахунки надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання 220 кВ

4.1.2.1 Лінія 220 кВ Стрий - Борислав

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 220 кВ Стрий – Борислав протяжністю 41,75 км. Середня висота місцевості, по якій проходить ЛЕП становить 299 м. ЛЕП проходить по території Львівської області (рисунок 4.6 а). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 90 гроз. год. Досліджуємо проміжну залізобетонну опору №130 типу ПБ-220-1 (рисунок 4.6 б).



Рисунок 4.6 - Фрагмент схеми магістральних мереж ОЕС (а); ескіз проміжної опори типу ПБ-220-1 (б)

ЛЕП виконана проводом марки АС 400/51 (к-сть кіл -1, к-сть проводів у фазі - 1) з ізоляторами типу ПС – 70 (к-сть ізоляторів в гірлянді – 16) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 70, розміщеним по всій довжині ЛЕП.

Для досліджуваної опори було проведено вимірювання опору заземлення опори (протокол №01/2018) та встановлено, що опір заземлення становить 22,7 Ом (значення опору перевищує норму 10 Ом, оскільки питомий опір ґрунту не перевищує $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Для досліджуваної опори розраховано напруги за удару блискавки в опору для поточного (рисунок 4.7) та нормованого опорів заземлення (рисунок 4.8). Аналізуючи рисунок 4.7 бачимо, що можливе перекриття ізоляції під час удару блискавки в опору на середній фазі за поточного значення опору заземлення, а також відсутність перекриття ізоляції за нормованого опорів заземлення (рисунок 4.8).

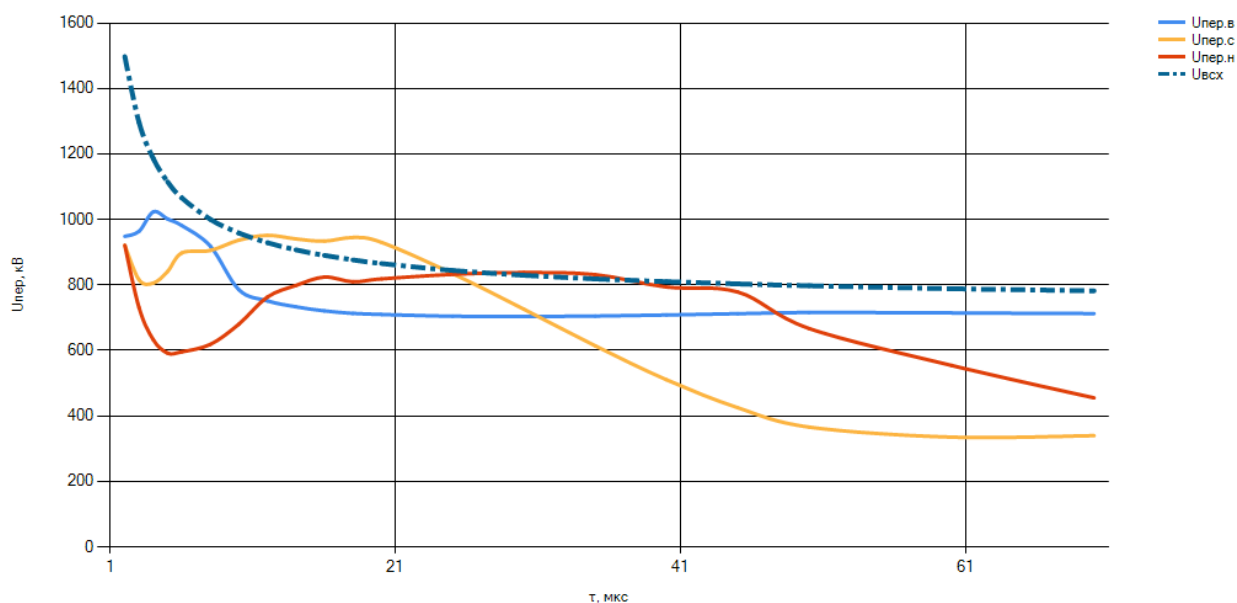


Рисунок 4.7 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в досліджувану опору для поточного опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий - Борислав

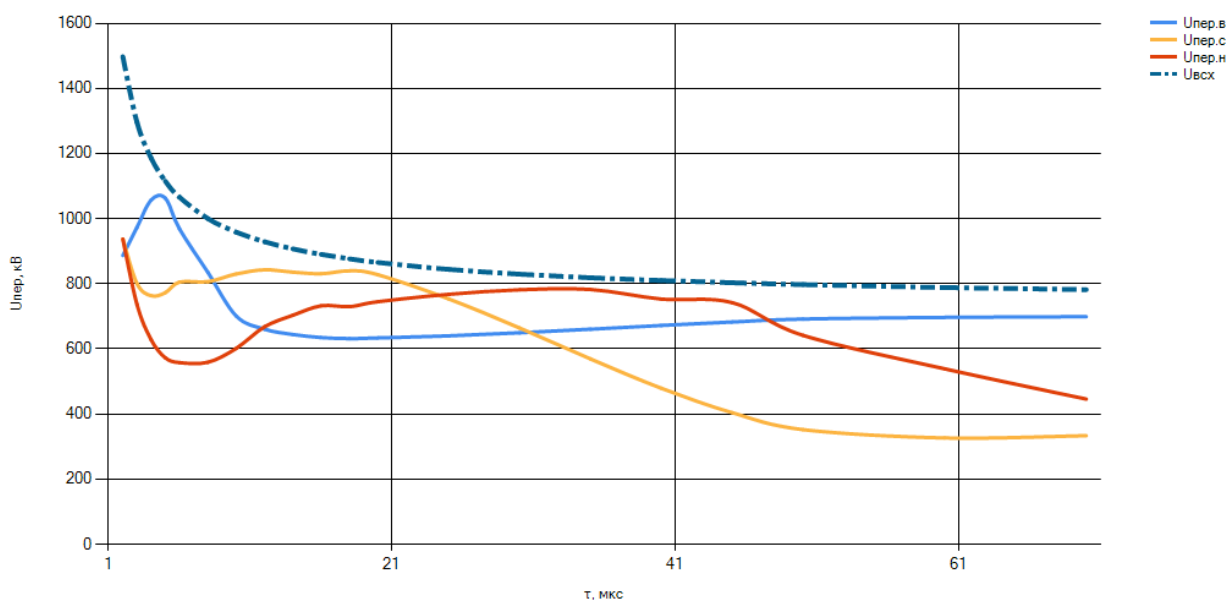


Рисунок 4.8 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в досліджувану опору для нормованого опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – Борислав

Також для даної лінії були побудовані графіки перенапруг під час удару блискавки в трос в середині прогону, а також для прориву тросового захисту (рисунок 4.9, 4.10).

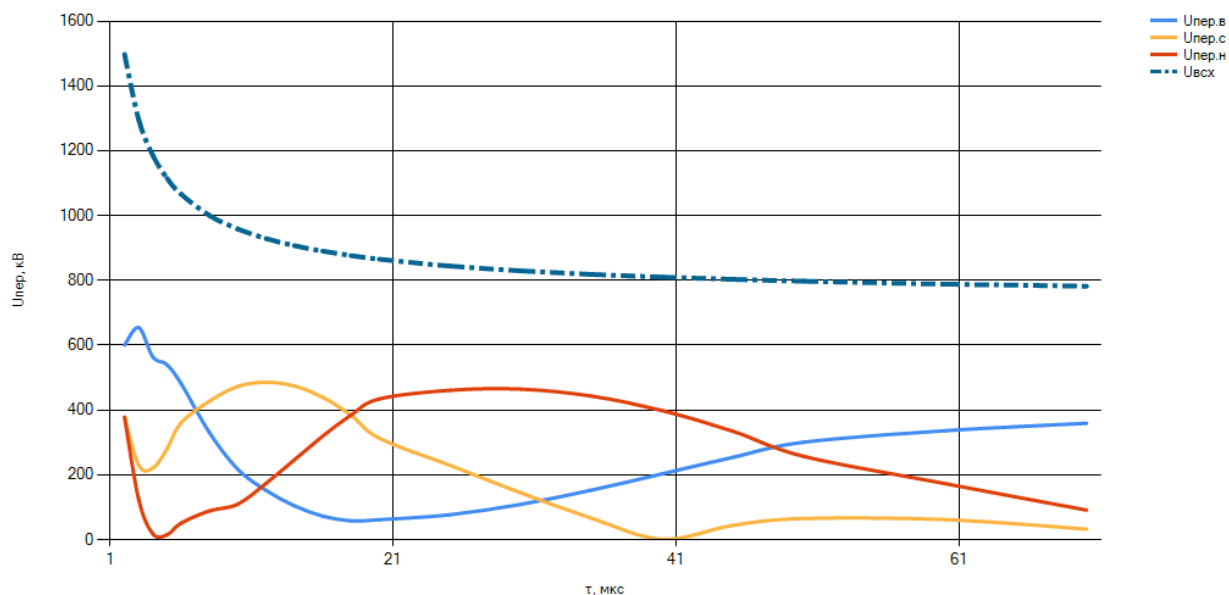


Рисунок 4.9 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос досліджуваної опори ЛЕП 220 кВ Стрий - Борислав

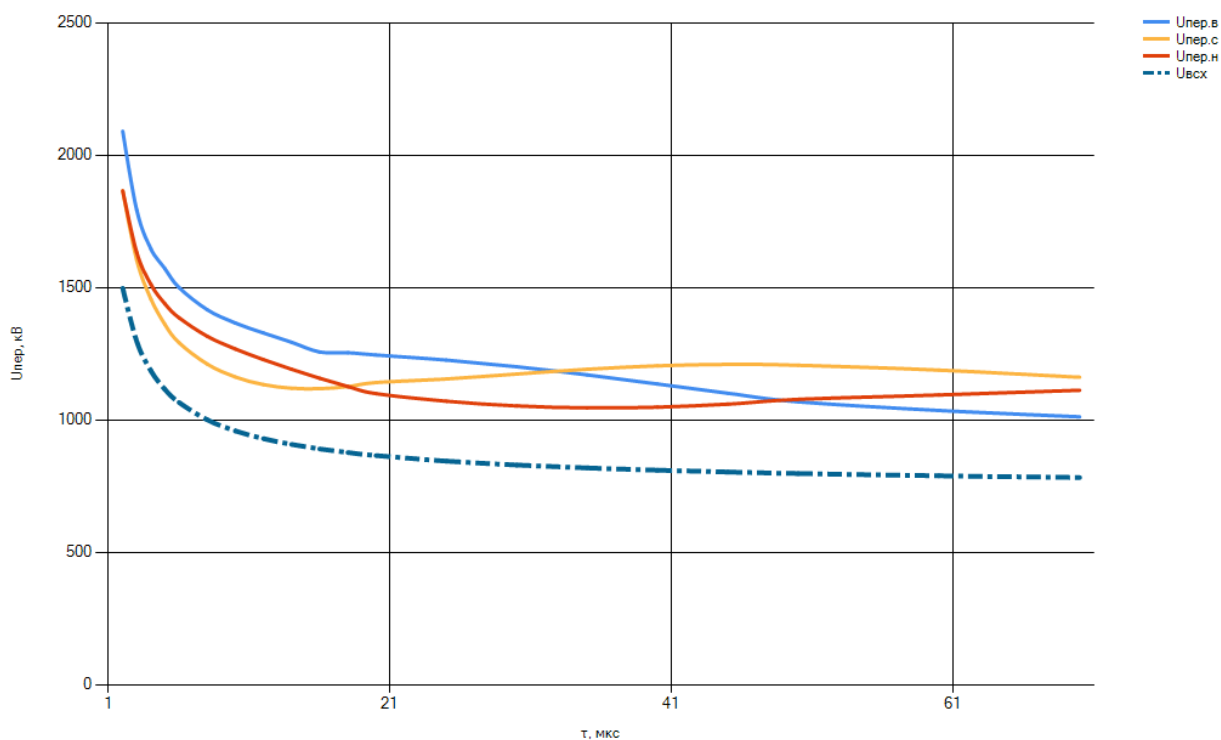


Рисунок 4.10 Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву блискавки через тросовий захист для досліджуваної опори ЛЕП 220 кВ Стрий – Борислав

Під час удару в трос (рисунок 4.9) перекриття ізоляції ЛЕП відсутнє, а під час прориву тросового захисту (рисунок 4.10) наявне перекриття ізоляції трьох фаз. Також для досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та

ймовірності перекриття фаз (таблиця 4.2), та побудовано КНП в абсолютних та ймовірнісних координатах (рисунок Б.2).

Таблиця 4.2 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть	4,582	3,5058	2,9938
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,14046	0,103445	0,08326
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,032139	0,023315	0,01967
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,94996

4.1.2.2 Лінія 220 кВ Стрий – Львів південна

В додатку Г.1 наведено результати розрахунків надійності грозозахисту за удару блискавки в досліджувану опору ПЛ 220 кВ Стрий – Львів південна протяжністю 45,5 км. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 86 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №130 типу ПБГ-4

4.1.2.3 Лінія 220 кВ Стрий – Мукачево

В додатку Г.2 наведено результати розрахунків надійності грозозахисту за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево протяжністю 80,4 км. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 95 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №186 типу ПБГ-4/4 .

4.1.2.4 Лінія 220 кВ Стрий – БуТЕС

В додатку Г.3 наведено результати розрахунків надійності грозозахисту за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС протяжністю 43,61 км. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 80 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №85 типу П-26 .

4.1.3 Розрахунок надійності грозозахисту повітряної лінії електропередавання 330 кВ

4.1.3.1 Лінія 330 кВ РАЕС - Ковель

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувані опори ПЛ 330 кВ РАЕС – Ковель протяжністю 91,6 км. Середня висота місцевості по якій проходить ЛЕП становить 187 м. ЛЕП проходить по території Рівненської та Волинської областей (рисунок 4.11 а). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 70 гроз. год. Досліджуємо проміжні залізобетонні опори №130-146 типу ПБ-330-7н (рисунок 4.11б).

ЛЕП виконана проводом марки АС 400/51 (к-сть кіл -1, к-сть проводів у фазі - 2) з ізоляторами типу ПС – 70Д (к-сть ізоляторів в гірлянді – 21) та оснащена двома грозозахисними тросами марки С – 70, розміщеними по всій довжині ЛЕП. Для досліджуваних опор було проведено вимірювання опору заземлення опори (табл. 4.3)

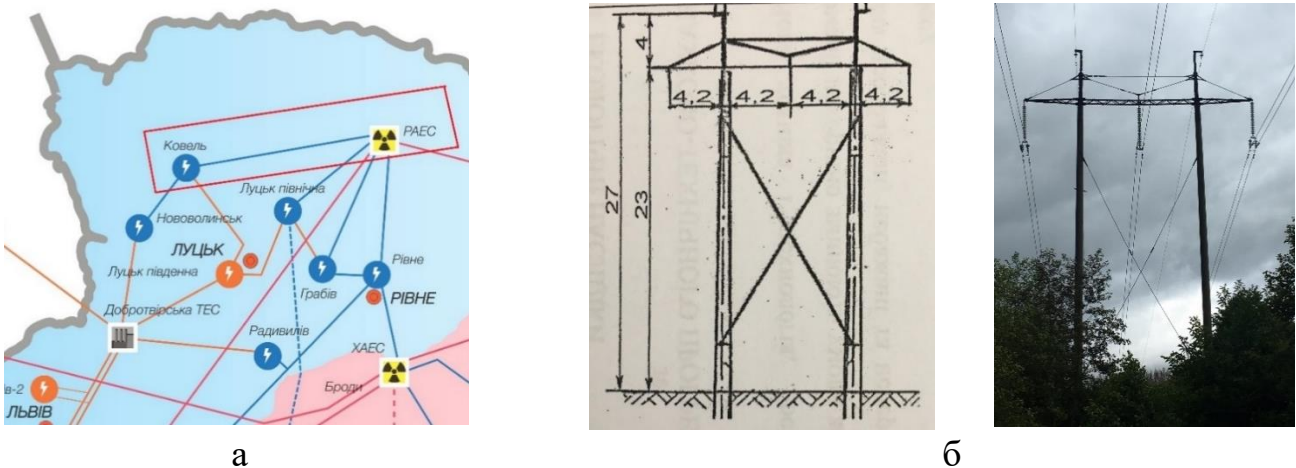


Рисунок 4.11 - Фрагмент схеми магістральних мереж ОЕС (а); ескіз проміжної опори типу ПБ-330-7н (б)

Таблиця 4.3 Результати вимірів опору заземлення опор ЛЕП 330 кВ РАЕС – Ковель

№ з.п.	Номер опори	Опір заземлення, Ом		Примітка
		по нормі	фактично	
1	130	20	69,1	з/б, проміжна

2	131	20	170	з/б, проміжна
3	132	20	154	з/б, проміжна
4	133	20	158	з/б, проміжна
5	138	20	362	з/б, проміжна
6	139	20	136	з/б, проміжна
7	140	20	86,7	з/б, проміжна
8	141	20	70,8	з/б, проміжна
9	142	20	120	з/б, проміжна
10	143	20	96,3	з/б, проміжна
11	145	20	111,2	з/б, проміжна
12	146	20	138	з/б, проміжна

Для опори № 138 було розраховано величини напруг за удару блискавки в опору для поточного (рисунок 4.12) та нормованого опорів заземлення (рисунок 4.13).

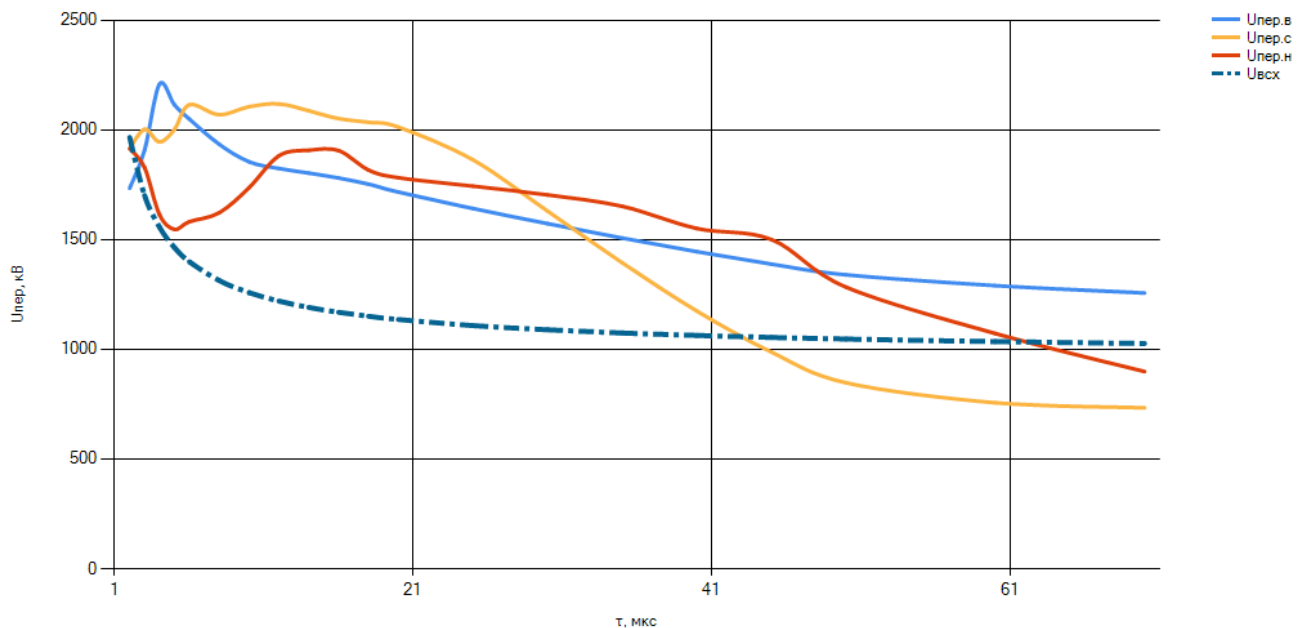


Рисунок 4.12 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №138 для поточного опорів заземлення ЛЕП 330 кВ РАЕС – Ковель

Аналізуючи рисунок 4.12 бачимо, що можливе перекриття ізоляції під час удару блискавки в опору на всіх фазах за поточного значення опорів заземлення, а також відсутність перекриття ізоляції за нормованого опорів заземлення (рисунок 4.13).

Для даної лінії були побудовані графіки КНП в ймовірнісних координатах для наявних значень опорів під час удару блискавки в опору та трос (рисунок 4.14, 4.15).

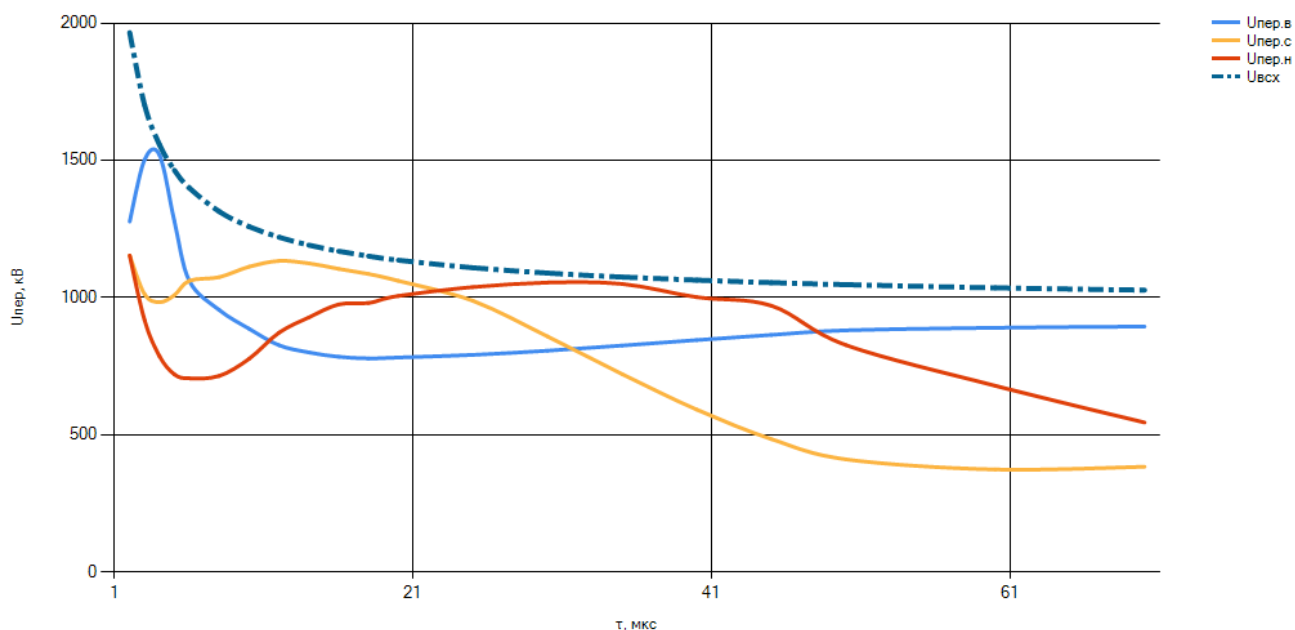


Рисунок 4.13 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №138 для нормованого опору заземлення ЛЕП 330 кВ РАЕС - Ковель

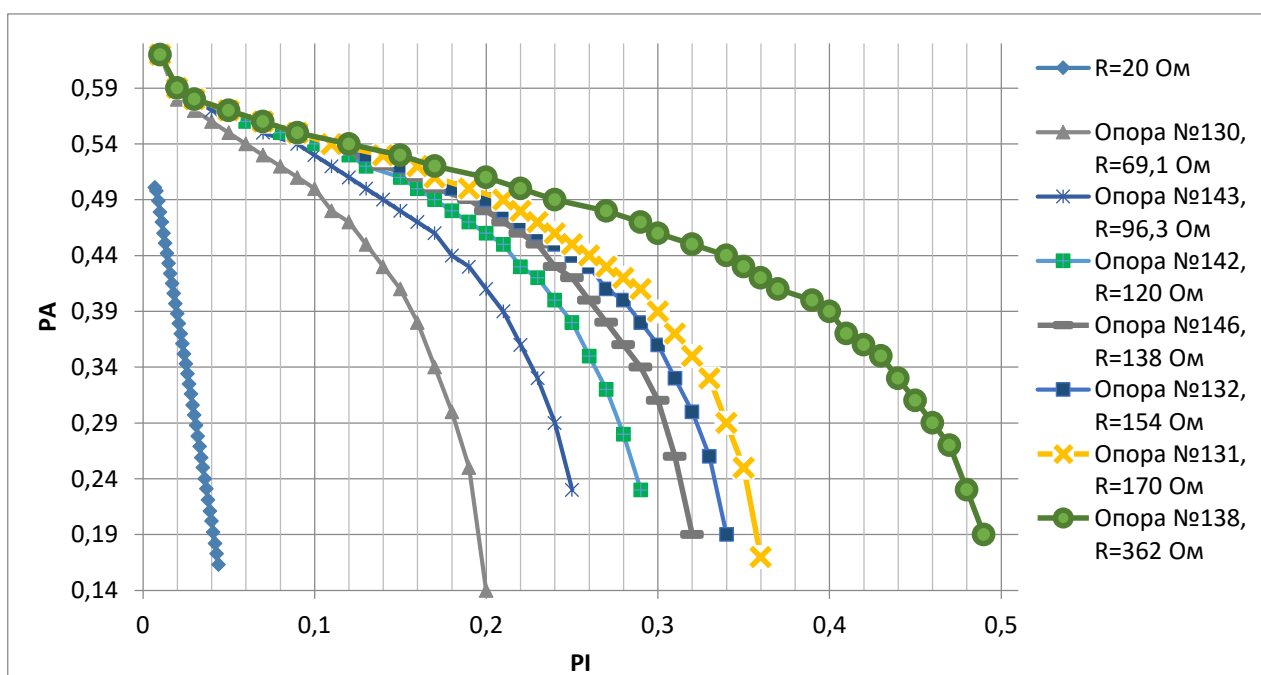


Рисунок 4.14 - КНП в ймовірнісних координатах для наявних значень опору заземлення під час удару блискавки в опори ЛЕП 330 кВ РАЕС - Ковель

На рисунках 4.14, 4.15 площа, обмежена осями та кривою небезпечних параметрів, побудованої у відносних одиницях чисельно буде рівною ймовірності імпульсного розряду на ізоляції ЛЕП. Аналізуючи рисунки 4.14-4.15 бачимо

тенденцію збільшення ймовірності перекриття ізоляції із збільшенням опору заземлення опори.

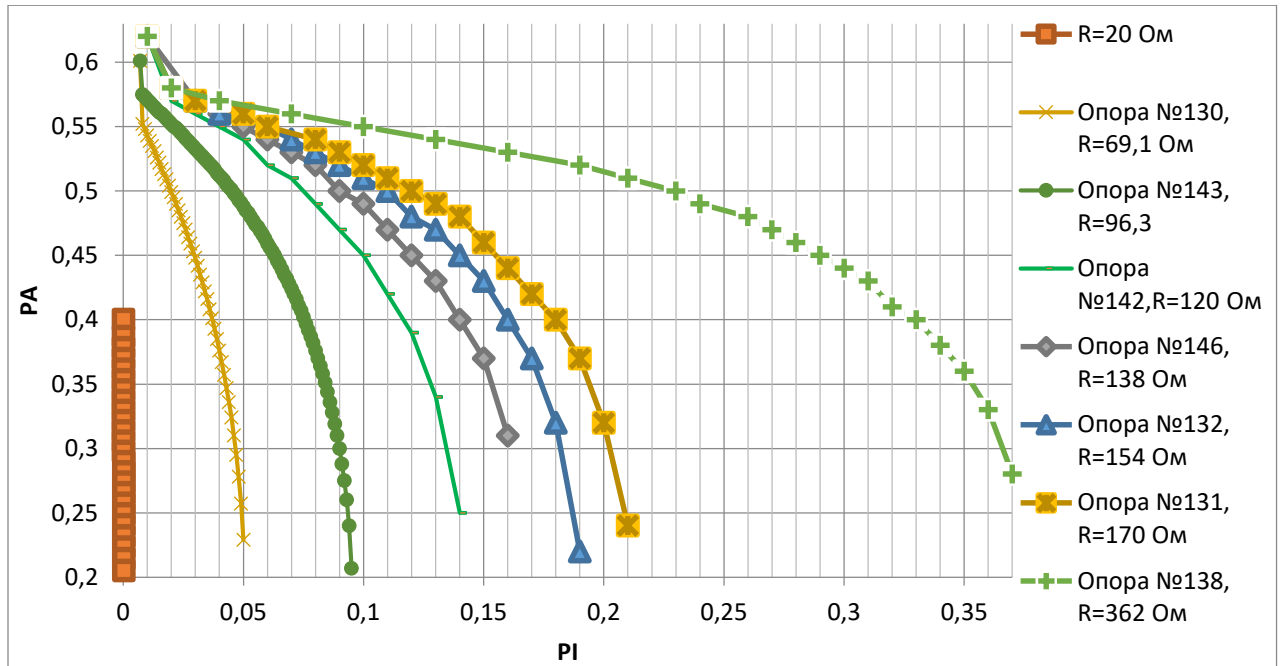


Рисунок 4.15 - КНП в ймовірнісних координатах для наявних значень опору заземлення під час удару блискавки в трос опор ЛЕП 330 кВ РАЕС – Ковель

Для опори № 138 досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз (табл. 4.4), та побудовано КНП в абсолютних та ймовірнісних координатах (рисунок Б.6).

Таблиця 4.4 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть	14,9782	18,1685	14,8256
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,64046	0,703445	0,68326
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,111691	0,150675	0,106876
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896

4.2 Парето оптимальні засоби та пристрої грозозахисту для підвищення надійності грозозахисту ЛЕП

Для вирішення задач підвищення надійності, тобто зменшення частоти виникнення відмов і тривалості простоїв, можна застосовувати статистичні методи підвищення якості. Це обумовлено тим, що переважна більшість відмов залежить, як правило, від певної кількості випадкових факторів, що впливають на досліджуваний об'єкт. Таким чином, описавши математично випадкові фактори та врахувавши їх під час розрахунків надійності можна визначити комплекси оптимальних засобів захисту, що в свою чергу зменшить кількість відмов ЛЕП. Такого роду задачі можна успішно вирішувати за допомогою оптимуму Парето [114].

Для прикладу, в таблиці 4.5 наведено результати розрахунків параметрів надійності за застосування різних засобів грозозахисту ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево. В розрахунках враховуємо такі засоби захисту :

- зменшення опору заземлення опор;
- зміна конфігурації тросового захисту (зміна кількості тросів, кута захисту, висоти підвісу тросу, відстані від осі лінії до тросу);
- підвищення імпульсної міцності ізоляції (зміна типу ізолятора, довжини гірлянди, довжини повітряних проміжків на опорі та проміжку трос – провід);
- встановлення пристроїв захисту.

Аналізуючи таблицю 4.5 можна зробити висновок, що найефективнішим є поєднання засобів захисту, оскільки окремі засоби захисту ефективні лише за удару блискавки в опору, трос чи провід. Необхідно відзначити, що обов'язковою складовою в поєднанні засобів захисту є нормоване значення опору заземлення, що підтверджено відповідними розрахунками цифровим комплексом надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання 110 – 330 кВ (див. п. 4.1).

Таким чином за результатами розрахунків найефективнішими поєднаннями засобів захисту є :

Таблиця 4.5 Результати розрахунків параметрів надійності за застосування різних засобів захисту на прикладі ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво

Засоби та пристрої грозозахисту		Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть			Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору			Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос			Ймовірність пошкодження ізоляції за прориву тросового захисту		
		$n_в$	$n_с$	$n_н$	$P_{оп.в}$	$P_{оп.с}$	$P_{оп.н}$	$P_{тр.в}$	$P_{тр.с}$	$P_{тр.н}$	$P_{пр.в}$	$P_{пр.с}$	$P_{пр.н}$
1	Реальний стан ЛЕП	10,601	8,329	5,787	0,134	0,097	0,051	0,015	0,011	0,0083	0,975	0,952	0,938
2	Зменшення опору заземлення до нормованого значення	8,915	6,765	4,539	0,113	0,075	0,034	0,0065	0,0041	0,0037	0,915	0,902	0,891
3	Встановлення додаткового тросу	9,092	6,991	4,723	0,112	0,075	0,034	0,01	0,0074	0,0058	0,901	0,880	0,875
4	Зменшення кута захисту $\alpha = 5^\circ$	8,153	5,893	3,364	0,134	0,097	0,051	0,012	0,09	0,0075	0,935	0,923	0,920
5	Встановлення від'ємного кута захисту $\alpha = -10^\circ$	8,031	5,772	3,243	0,134	0,097	0,051	0,010	0,078	0,0071	0,931	0,919	0,918
6	Відведення троса від осі ЛЕП ($x_{тр} = 0,5м.$)	10,601	8,329	5,787	0,134	0,097	0,051	0,08	0,063	0,0043	0,943	0,932	0,928
7	Зменшення висоти підвісу тросу ($h_{тр} = 41м.$)	10,251	8,044	5,565	0,137	0,099	0,053	0,078	0,062	0,0044	0,945	0,935	0,930

Засоби та пристрої грозозахисту		n_6	n_c	n_n	$P_{оп.в}$	$P_{оп.с}$	$P_{оп.н}$	$P_{тр.в}$	$P_{тр.с}$	$P_{тр.н}$	$P_{пр.в}$	$P_{пр.с}$	$P_{пр.н}$
8	Збільшення довжини гірлянди ізоляторів ($h_{із} = 0,146м.$)	8,105	6,483	4,573	0,104	0,074	0,037	0,0084	0,0064	0,0051	0,975	0,952	0,938
9	Збільшення кількості ізоляторів в гірлянді ($s=18$)	8,565	6,835	4,806	0,109	0,078	0,039	0,0092	0,0069	0,0055	0,975	0,952	0,938
10	Встановлення пристрою захисту (ВР)	6,946	5,729	4,105	0,088	0,066	0,036	0,0052	0,0043	0,0039	0,910	0,90	0,89
11	Встановлення пристрою захисту (ОПН)	6,742	5,564	4,008	0,075	0,053	0,025	0,0036	0,0032	0,0025	0,905	0,881	0,875
12	Поєднання 4,6,7	7,999	5,803	3,336	0,137	0,099	0,053	0,066	0,057	0,0035	0,934	0,922	0,920
13	Поєднання 5,6,7	7,881	5,685	3,219	0,137	0,099	0,053	0,065	0,056	0,0034	0,930	0,918	0,917
14	Поєднання 2,4,6,7	6,242	4,163	1,994	0,117	0,078	0,035	0,041	0,041	0,0033	0,914	0,90	0,89
15	Поєднання 2,5,6,7	6,36	4,281	2,111	0,117	0,078	0,035	0,041	0,041	0,0033	0,913	0,89	0,87
16	Поєднання 3,4,6,7	5,747	4,228	1,987	0,097	0,068	0,027	0,011	0,01	0,0071	0,89	0,870	0,867
17	Поєднання 3,5,6,7	5,629	4,111	1,871	0,097	0,068	0,027	0,011	0,01	0,0071	0,885	0,860	0,861
18	Поєднання 2,3	7,352	5,575	3,693	0,084	0,052	0,017	0,005	0,004	0,003	0,878	0,840	0,831
19	Поєднання 2,8	5,695	4,383	3,094	0,062	0,036	0,011	0,0027	0,0023	0,001	0,915	0,902	0,891
20	Поєднання 2,9	6,004	4,611	3,219	0,065	0,038	0,012	0,003	0,0025	0,0021	0,915	0,902	0,891
21	Поєднання 2,10	5,968	4,761	3,423	0,063	0,041	0,016	0,0014	0,0011	0,0009	0,910	0,90	0,89
22	Поєднання 2,11	5,523	4,326	3,121	0,045	0,032	0,01	0,0009	0,0007	0,0005	0,905	0,881	0,875
23	Поєднання 2,8,11	4,945	3,97	2,99	0,044	0,031	0,01	0,0008	0,0005	0,0005	0,884	0,876	0,861

1. Нормативне значення опору заземлення та збільшення довжини гірлянди ізоляторів;
2. Нормативне значення опору заземлення та застосування пристроїв захисту (ОПН чи ВР);
3. Нормативне значення опору заземлення, збільшення довжини гірлянди ізоляторів та застосування пристроїв захисту (ОПН);
4. Нормативне значення опору заземлення та встановлення додаткового грозозахисного троса чи зміна конфігурації тросового захисту.

Для вибору оптимального поєднання заходів для конкретної ЛЕП необхідно провести техніко – економічне обґрунтування варіантів з подальшим розрахунком параметрів надійності грозозахисту для ЛЕП.

У додатку Д наведено огляд основних рекомендацій та особливостей проведення діагностики елементів ЛЕП, що впливають на надійність грозозахисту.

4.3 Рекомендації для підвищення надійності та ефективності систем грозозахисту ЛЕП

За результатами розрахунків поєднань засобів та пристроїв грозозахисту (таблиця 4.5) можна зробити висновок, що основою надійного та ефективного грозозахисту є нормоване значення опору заземлення. Для зменшення опору заземлення застосовують традиційні та нетрадиційні засоби [123,124].

В якості традиційних рішень застосовуються: кутова сталь, труби, пластини (залізні оцинковані листи), стрижні та смуги, вертикально або горизонтально заглиблені в землю. Однак всі ці заземлювачі, особливо кутова сталь і труби, зустрічаються все рідше: за підвищених витрат металу і праці вони мають низьку корозійну стійкість і, відповідно, короткий термін експлуатації [118,122].

Останнім часом частіше використовують вертикально заглиблені стрижні. Треба сказати, що використання стрижнів в якості електродів заземлення - ідея зовсім не нова. Для цього застосовували стрижні зі сталі марки Ст3 діаметром 12-16 мм і довжиною 2,5-5 м (залежно від властивостей ґрунту), які забивалися в ґрунт кувалдою

або електрифікованим ручним інструментом. За проникнення електродів в шари ґрунту з підвищеною вологістю опір заземлювального пристрою знижується.

Проривом в області заземлення стало застосування системи заглиблених вертикальних електродів (СЗВЕ). Відомо, що технологія СЗВЕ вперше була запропонована в 1970-х роках компанією ERICO (США), але сьогодні вона по праву може вважатися інтернаціональною - її освоїли практично всі провідні виробники в області систем заземлення. Інноваційність технології СЗВЕ полягає в тому, що звичайний вертикальний стрижень стає «системою» завдяки модульному нарощуванню: короткі стрижні послідовно з'єднуються в сегменти настільки великої довжини, наскільки це необхідно.

Проникаючи в глибокі шари ґрунту, де підтримується: мінімальна повітропроникність, стабільна температура, збільшена вологість, знижена електротехнічна та ґрунтова корозія, заземлюючий пристрій набуває стабільних параметрів. Наприклад, активний опір в 2 Ом можна досягти в одній точці, з глибиною занурення на 12 м. За використання сталевих кутників, заритих на глибину 3 м, такого ж значення в тих же умовах можна не отримати і при 15 точках.

Крім очевидної ефективності, використання глибинних електродів забезпечує гнучкість під час проведення монтажних робіт. Така система не вимагає великого простору. Модульні системи стрижневого заземлення увійшли в практику українських монтажників відносно недавно, проте за останні роки вже сформувався сегмент ринку, на якому пропонується обладнання цілого ряду виробників (компанії: Італ – Техно, Інтегратор – Телеком, Гевея, Ватсон - Телеком, Бетерман Україна, ЮАКОМ).

У випадку неможливості встановлення модульних систем стрижневого заземлення (наприклад траса ЛЕП Стрий – Мукачево проходить в гірській місцевості де немає можливості забиття додаткового заземлювача) необхідно застосовувати нетрадиційні заходи зменшення опору заземлення [6,40].

Одним з найбільш бажаних рішень у важких умовах є хімічний вплив на ґрунт. Універсального рецепту хімічної обробки ґрунту немає. У кожному окремому

випадку необхідно враховувати її вартість, корозійний ефект, а також діючі норми охорони навколишнього середовища. До спеціальних хімічних речовин, які знижують опір заземлення належать: суміші мінеральних солей (кухонна сіль, хлористий кальцій, хлористий магній, мідний купорос, сода та ін.), сірчаноокислий магній, сірчаноокисла мідь, сульфат міді, хлорид натрію, гексаціаноферат (II) калію, гексаціаноферат (II) кальцію. Однак за застосування зазначених хімічних речовин в чистому вигляді тривалість ефекту носить обмежений термін. Тому необхідно застосовувати додаткові гелеутворюючі добавки, суспензії з глини або бентоніту. Застосування гелеутворюючих добавок найбільш доцільно, оскільки електричні та фізичні властивості гідрогелю не змінюються скільки завгодно істотно від тривалого впливу води і є стійкими за коливань температури в межах від -60 до $+60$ ° C. Перспективним на даний час вбачаються полімерні електропровідні наповнені гідрогелі. Цей клас полімерних композиційних матеріалів відзначається рядом унікальних експлуатаційних властивостей, таких як електропровідність, яка змінюється у вологому середовищі через здатність гідрогелів набрякати у воді, має підвищені міцнісні характеристики, теплостійкість, стійкість до агресивних середовищ та ін. На даний момент на українському ринку не має компаній, які виготовляють гідрогель для зменшення опору заземлення. Проте, існує компанія НПО «Бипрон» (Росія), яка створила «МАГ-2000» - мінеральний активатор електродів, що представляє собою суху суміш, яка після замішування з водою перетворюється в нерозчинний електропровідний гідрогель [119,125]. МАГ-2000 має питомий електричний опір менше 0.04 Ом·м, а гелеподібна структура забезпечує відмінну однорідність засипки. МАГ добре утримує вологу навколо електрода, що особливо актуально в сухих піщаних або скельних ґрунтах, а також в посушливих місцевостях. Поставляється мінеральний активатор у вигляді сухої суміші, в мішках по 30 кг, яка перед укладанням змішується з водою. Склад «МАГ» запатентований.

На величину опору заземлення та стан заземлювального пристрою також впливають корозійні процеси в ґрунті. Для існуючих ЛЕП та ЛЕП, які будуються необхідно застосовувати антикорозійні захисти. Характер корозійних руйнувань

залежить від багатьох чинників, зокрема: природи металу, його складу і структури; технології їх оброблення; агресивності чинників довкілля; температури тощо. Важливе значення мають електрохімічні процеси для захисту металів та їх сплавів від корозії (позолочення, посріблення, хромування, цинкування, нікелювання, катодний та протекторний захист). Під час будівництва нових ЛЕП, необхідно використовувати корозійно - стійкі сплави, які досягаються додаванням до заліза у певних пропорціях хрому, вольфраму, молібдену, нікелю, кабальту та інших металів.

Швидкість корозії можна знизити, змінюючи властивості корозійного середовища. Це досягається відповідним обробленням середовища, внаслідок чого зменшується його агресивність, або введенням у корозійне середовище невеликої кількості спеціальних речовин – сповільнювачів корозії (інгібіторів) [120].

Для захисту металів і сплавів застосовуються інгібітори атмосферної корозії (контактні і летючі) [121]. Для ЛЕП, які будуються, використовують контактні інгібітори: нітрит і бензоат натрію захищають чорні метали, хром, нікель, цинк; хромат гексаметилендіаміну – чорні та кольорові метали. Інгібітори наносяться на деталі зануренням в розчини або вводяться в олії і мастила. Для існуючих ЛЕП використовуємо летючі інігібітори: нітрит дициклогексиламіну (НДА), карбонат циклогексиламіну (КЦА) та інші – захищають від корозії вироби з чавуну, сталі, нікелю, хрому, чистого алюмінію, фосфатовані і окисдовані метали. Вони можуть використовуватися у вигляді порошку, який засипається в ґрунт. Використовуються вони під час консервації інструментів, обладнання тощо, виготовлених з чорних металів.

Для зменшення ймовірності прориву блискавки через тросовий захист необхідно провести оптимізацію конфігурації тросового захисту. Для підвищення надійності тросового захисту рекомендуємо посилення тросового захисту за рахунок встановлення додаткового грозозахисного тросу і раціонального розміщення тросів на опорі (зменшення чи встановлення від'ємного кута захисту, зменшення висоти підвісу тросу та відведення тросу від осі лінії). Перспективним в питанні тросового захисту є застосування грозозахисного тросу з вбудованим оптоволоконним кабелем,

який забезпечує телекомунікаційний зв'язок за допомогою передачі сигналів по оптичних волокнах і володіє електричними і фізико-механічними характеристиками грозозахисного троса.

Важливим засобом захисту також є підвищення імпульсної міцності ізоляції. Імпульсна міцність ізоляції визначається: типом ізолятора, довжиною гірлянди, величиною повітряних проміжків на опорі та проміжків між тросом та проводом в опорі. Проте тип ізоляторів і довжина гірлянди вибирається не з точки зору грозозахисту, а по робочій напрузі. Під час будівництва нових ЛЕП рекомендуємо встановлення ізоляторів з більшою будівельною висотою чи встановлення додаткових тарілок в гірлянді.

Перспективним засобом захисту є розроблення та застосування пристроїв захисту. В закордонних енергосистемах практикується встановлення ОПН на кожній опорі ЛЕП пофазно. В наших енергосистемах рекомендується встановлення пристроїв захисту лише в місцях послабленої ізоляції та на підходах до ПС, що є недостатнім для забезпечення надійного захисту.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Запропонованим цифровим комплексом розраховано параметри надійності грозозахисту ЛЕП класу напруг 110 – 330 кВ. Для досліджуваних ЛЕП було розраховано значення перенапруг на ізоляції під час удару блискавки для нормованого значення опору заземлення та для виміряного значення, а також було побудовано КНП в абсолютних та відносних координатах і розраховано ймовірності перекриття ізоляції та питомі показники пошкоджуваності ЛЕП.

2. Встановлено, що одним із визначальних випадкових факторів, які суттєво впливають на надійність грозозахисту ЛЕП, є значення опору заземлення опор ліній.

3. На прикладі ЛЕП 220 кВ Західного регіону України виконано розрахунки надійності з урахуванням впливу випадкових факторів за застосування різних засобів грозозахисту. За результатами розрахунків визначено поєднання засобів грозозахисту, що забезпечують ефективну надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі.

4. Для забезпечення надійності та ефективності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів необхідно своєчасно проводити діагностику елементів ЛЕП та їх вибраковку (заміну).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів, що має важливе значення для підвищення надійності функціонування електричних систем. В руслі даного напрямку отримано наступні результати:

1. Розглянуто статистичні характеристики та ймовірнісні показники параметрів розряду блискавки, що можуть використовуватися для розрахунків грозостійкості повітряних ліній електропередачі. Рекомендовано для розрахунків грозостійкості ЛЕП та ймовірності появи струмів блискавки з відповідними параметрами використовувати розподіли струмів блискавок, отримані за даними реєстрацій на ЛЕП.

2. Розглянуто основні випадкові фактори, що впливають на надійність грозозахисту повітряних ліній електропередачі. Запропоновано розраховувати ймовірність грозового ураження об'єкта, враховуючи сукупність поєднань випадкових факторів, що дозволить адекватніше оцінити надійність грозозахисту та підвищити його ефективність.

3. Запропоновано, з урахуванням сукупності випадкових факторів, математичну модель визначення області поєднань небезпечних параметрів, що впливають на надійність грозозахисту. Показано, що враховуючи сукупність поєднань випадкових факторів для аналітичного розрахунку надійності грозозахисту необхідно застосовувати метод чисельного інтегрування.

4. Запропоновано математичну модель оцінки грозостійкості ЛЕП, в якій враховано всі визначальні випадкові фактори, а розроблені принципи розрахунків надійності грозозахисту забезпечують адекватність отриманих результатів відповідним природнім процесам.

5. Розроблено ефективний цифровий комплекс для розрахунків та оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням

впливу випадкових факторів. В комплексі використано основні принципи розрахунків, обґрунтовані в запропонованій математичній моделі, з врахуванням широкого кола випадкових факторів, що визначають грозостійкість ЛЕП.

6. На прикладі ЛЕП Західного регіону України цифровим комплексом виконано розрахунки параметрів надійності з урахуванням впливу випадкових факторів за застосування різних засобів грозозахисту. За результатами розрахунків визначено поєднання таких засобів грозозахисту, які забезпечать ефективність систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання.

7. Для оцінки надійності та ефективності функціонування систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів рекомендовано своєчасно здійснювати діагностику елементів ЛЕП, яка може виконуватись за допомогою розробленого комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. РД 153- 34.3- 35. 125- 99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений [Текст]. - Изд. 2-е, перераб. - СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999, – 184 с.
2. Н.Н.Тиходеева Передача энергии постоянным и переменным током (Проект «Руководящих указаний по защите от внутренних и грозových перенапряжений сетей 6-750 кВ») [Текст] / Н.Н.Тиходеева - Труды НИИПТ Выпуск 21- 22, Изд-во «Энергия» Ленинградское отд., 1975, – 288 с.
3. Binkevych T. Means of lightning protection of overhead power transmission lines with isolated neutral / Taras Binkevych // Computational Problems of Electrical Engineering. — Lviv : Lviv Politechnic Publishing House - 2017, Vol 7, №1, - pp. 11–16.
4. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт» - 2017.,– 760 с.
5. Ліщак І. В. Сучасний грозозахист розподільчих повітряних ліній 6, 10 кВ довго- іскровими розрядниками (РДІ) [Текст] / І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка" - 2012, № 736, - С. 75-80.
6. А. Журахівський Підвищення надійності та ефективності грозозахисту повітряних ліній електропередачі шляхом зниження опорів заземлювальних пристроїв [Текст] / А. Журахівський, Т. Бінкевич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. - № 1, - с. 59-65.
7. Блискавкозахист ПЛ різних класів напруги [Електронний ресурс].-Режим доступу: http://posibnyky.vntu.edu.ua/p_bz/index_1_7.htm (дата звертання 29.09.2018). – Назва з екрану.
8. “Lightning protection of overhead lines 6–35 kV by longflash-over arresters” [Електронний ресурс].-Режим доступу: <https://www.slideshare.net/anti4ek/635-9468650> (дата звертання 29.08.2018). – Назва з екрану.
9. Беляков Н.Н. Основы выбора изоляции линий электропередач [Текст] / Беляков Н.Н., Рашкес В.С. - Труды ВНИИЭ, XI, - 1961, – 135 с.

10. Грозозащитный трос [Электронный ресурс].-Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Грозозащитный_трос (дата звертання 12.08.2018). – Назва з екрану.
11. Разевич Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи [Текст] / Разевич Д.В. - ГЭН, - 1959, – 216 с.
12. Александров Г.Н. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции [Текст] / Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. - Л.: Энергия, - 1969. – 240 с.
13. Н. Н. Тиходеев Изоляция электрических сетей (методика выбора статистической координации и приведения к норме) [Текст] / Н. Н. Тиходеев, С. С. Шур. - Л. : Энергия, -1979, – 304 с.
14. Rémi Lambert Probabilistic Evaluation of Lightning-Related Failure Rate of Power System Apparatus / Rémi Lambert , Eva Tarasiewicz, Alain Xémard, Gérard Fleury - IEEE Transactions on power delivery, - Vol. 18, № 2, 2003, – pp. 579 - 586
15. Собчук В. С. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах : навчальний посібник [Текст] / В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, - 2010, – 145 с.
16. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-100:2014 Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ. - Видання офіційне. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, - 2014, - 29 с.
17. Руководящие указания по защите от перенапряжений электрических сетей 3-500 кВ. Проект [Текст]. - СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ , - 1981, - 190 с.
18. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции [Текст]. - М.: ИПК Издательство стандартов, - 2004, – 31 с.
19. Стекольников И.С. Природа длинной искры [Текст] - М., изд-во АН СССР, - 1960, – 273 с.

20. Reza Shariatinasab Probabilistic evaluation of failure risk of transmission line surge arresters caused by lightning flash/ Reza Shariatinasab, Farid Ajri, Hadiseh Daman-Khorshid // Published in IET Generation, Transmission & Distribution - Vol. 8 , №2, 2013, – pp.193-202
21. Кравченко В.І. Бліскавка. Електромагнітні фактори і їх вражаючі впливи на технічні засоби [Текст]. – Харків: Видавництво "НТМТ", - 2010, - 292 с.
22. Кинаш Б.М. Разработка общей методики определения показателей надёжности грозозащиты объектов электроэнергетических систем [Текст] / Кинаш Б.М., Лищак И.В., Шеремета З.К.// Сб. II Респ. науч.-техн. конф. "Современные проблемы энергетики" – 1973, – с. 99-102
23. Диагностика воздушных линий [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://znatock.org/s4493t1.html> (дата звертання 2.06.2018). – Назва з екрану.
24. MRU-105 Руководство по эксплуатации версия 1.03 [Электронный ресурс].-Режим доступа: <https://docplayer.ru/26480481-Mru-105-izmeritel-parametrov-zazemlyayushchih-ustroystv.html> (дата звертання 2.06.2018). – Назва з екрану.
25. Rakov V. A. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies - EGAT (Bangkok), 2012. - 58 p.
26. Вимоги до проектування повітряних ліній електропередавання напругою від 6 кВ до 35 кВ з проводами із захисним покриттям - Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, - 2013, – 24 с.
27. Lightning protection of overhead lines[Электронный ресурс].-Режим доступа: https://www.streamer.ru/streamer_products/lightning-protection (дата звертання 25.04.2018). – Назва з екрану.
28. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных - Министерство связи СССР, Главное управление международной телефонной связи, Издательство «Связь» МОСКВА, 1971, – 79 с.

29. Захист об'єктів енергетики від перенапруг [Електронний ресурс].-Режим доступу: <https://ukrbukva.net/page,7,44131-Zashita-ob-ektov-energetiki-ot-perenapryazheniiy.html> (дата звертання 15.05.2018). – Назва з екрану.
30. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів - Міністерство палива та енергетики України, Х.: Видавництво «Форт», - 2012, - 368 с.
31. Журахівський А. В. Дослідження впливу миттєвого значення робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній [Текст] / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Техніка та електрофізика високих напруг – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 36 (1208). – с. 23-27.
32. Бургсдорф В.В. Вопросы выбора расчётных метеорологических условий при проектировании грозозащиты [Текст]./ Бургсдорф В.В. // Электрические станции - №7, 1946, с. 41-47.
33. Savic M.S. Estimation of the surge arrester outage rate caused by lightning overvoltages / Savic M.S.// IEEE Trans. Power Deliv. - 2005, №20, - pp. 116–122.
34. Костенко М.В. Физика грозового розряда и защита линий электропередачи [Текст] / Костенко М.В., Богатенков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х.// Л.: ЛПИ - 1982, - с. 256.
35. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащита [Текст] / Базелян Э.М., Райзер Ю.П. // М.: Физматлит, 2001, - 320 с.
36. IEC 62305-1:2010 Protection against lightning - Part 1: General principles, 2010, - 137 p.
37. Оптичний зв'язок по лініях електропередач [Електронний ресурс].-Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Оптичний_зв'язок_по_лініях_електропередач (дата звертання 15.02.2018). – Назва з екрану.
38. Кириленко О.В. Аналіз надійності функціонування електроенергетичних об'єктів [Текст] / Кириленко О.В., Кінаш Б.М., Гудим В.І.// Ін-т електродинаміки НАН України; Львівський держ. ун-т безпеки життєдіяльності МНС України. – К.: Фоліант, 2008, – 224 с.

39. Ализаде А.А. Результаты совместного исследований параметров тока молнии на ЛЭП Азглавэнерго [Текст] / Ализаде А.А. и др.// Труды НИИЭ. - 1973, - 20 с.
40. Журахівський А. В. Імпульсний опір заземлення опор повітряних ліній та його вплив на надійність грозозахисту [Текст] / А. В. Журахівський, І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016. - № 1, - с. 74-78.
41. Целебровский Ю.В. Импульсные сопротивления заземления молниеотводов ОРУ подстанций [Текст] / Целебровский Ю.В., Нестеров С.В., Цилько В.А. // Первая Российская конференция по молниезащите: Сборник докладов Сибирская энергетическая академия. Новосибирск, - 2007, - с. 243-248 .
42. Вазов В.Ф. Техника высоких напряжений. Курс лекций для бакалавров направления 140200 "Электроэнергетика" [Текст] / Вазов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин С.А. // Томск: Изд-во ТПУ, - 2006, — 119 с.
43. IEEE Standards Association. IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination — 1313.2-1999, 2005 (in force) [online]. Available at: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/806063/>> [Accessed 24 May 2017].
44. Xiong X. Short-Term Reliability Evaluation of Transmission System Using Lightning Strike Probability Prediction / Xiong, X., Wang, J. and Weng, S., Qing Yang.// Journal of Power and Energy Engineering, - №2, 2014, pp. 647–655.
45. Vernon Cooray. Lightning Protection / Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom ,2010, - 1070 p.
46. Измеритель параметров заземляющих устройств [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.sonel.ru/ru/products/archive/detail.php?id4=595> (дата звертання 7.05.2018). – Назва з екрану.
47. Кравченко В.І. Електромагнітний тероризм [Текст]. – Харків: Видавництво «НТМТ», 2012,. – 392 с.
48. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний [Текст]// В.И.Кравченко, Ю.В. Голодняк, Г.В.Кравченко и др.// Держстандарт України , Київ 1998, - 28 с.

49. Baharudin Z.A. Negative cloud-to-ground lightning flashes in Malaysia / Baharudin Z.A., Ahmad N.A., Makela J.S., Fernando M., and Cooray V. // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, №108, 2014, pp. - 61–67.
50. Ballarotti M. G. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies / Ballarotti M. G., C. Medeiros, M. F. Saba, W. Schulz, and O. Pinto Jr // *J. Geophys. Res.* №117, 2012, - pp. 1-8
51. Biagi C. J. High-speed video observations of rocket-and-wire initiated lightning / Biagi C. J., D. M. Jordan, M. A. Uman, J. D. Hill, W. H. Beasley, and J. Howard. // *Geophysical Research Letters*, vol. 36, № 15., 2009, - pp. 1-5.
52. Rakov V. A. A review of positive and bipolar lightning discharges. / Rakov V. A. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84, 2003, - pp. 767–776
53. Rakov, V. A. The physics of lightning / Rakov V. A. // *Surv. Geophys.*, 34(6) 2013, - pp. 701–729.
54. Saraiva A. C. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations / Saraiva A. C. V., M. F. Saba, O. Pinto Jr., K. L. Cummins, E. P. Krider, Z. S. Campos // *J. Geophys. Res.* 115, 2010, - pp. 1-9.
55. Tran M. D. When does the lightning attachment process actually begin? / Tran M. D. and V. A. Rakov. // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2015, - pp.6922–6936.
56. Plamen Bunov Externally gapped line arresters - First experience with the new IEC 60099-8 standard and Line study analysis / Plamen Bunov, Lars Klingbeil, Danijel Udovcic, Dilip Biswas // *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2012, - pp. 1-10
57. K. Nakada Energy Absorption of Surge Arresters on Power Distribution Lines due to Direct Lightning Strokes-Effects of an Overhead Ground Wire and Installation Position of Surge Arresters / K. Nakada et. al. // *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No. 4, October 1997, - p. 1779-1785.

58. Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee «Parameters of Lightning Strokes: A review», IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005, - p. 346- 358.

59. О применении ОПН для грозозащиты ВЛ 6-10 кВ [Электронный ресурс].- Режим доступа:

http://www.ruscable.ru/article/O_primenenii_OPN_dlya_grozozashhity_VL_6_10_kV/

(дата звертання 27.06.2018). – Назва з екрану.

60. G. Podporkin Development of long flash-over and multi-chamber arresters and insulator-arresters for lightning protection of overhead distribution and transmission lines / G. Podporkin // Plasma Physics and Technology, vol. 2, № 3, 2015, - pp. 241–250.

61. Lightning protection using FLS-M [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://sadiqmsk.blogspot.com/2010/04/lightning-protection-using-lfam.html> (дата звертання 24.06.2018). – Назва з екрану.

62. Подпоркин Г.В. Новая грозозащита линий электропередачи с помощью длинно-искровых разрядников [Текст] / Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. // Энергетик, 1997, № 3, - с. 34-37.

63. Е.Калакутский Молниезащита ВЛ 6-220 кВ мультикамерными разрядниками и изоляторами-разрядниками [Текст]/ Е.Калакутский // Четверта Російська науково – практична конференція: Лінії електропересилання 2010 – проектування, будівництво і досвід експлуатації, 2010, - с. 153 – 158.

64. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений». — М.: ОАО «РОСЭП», АО «ФСК ЕЭС», 2004, - с.50-59.

65. А.Н.Новикова Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств [Текст] / А.Н.Новикова, А.Н.Лубков, О.В.Шмараго, Л.И.Галкова, В.Р.Бельцер, О.А.Прохореня, С.И.Кривошеев, А.П.Ненашев, А.А.Парфентьев // Электрические станции. – 2007. – № 9, - с.53-59.

66. А.Н.Данилин Методика и результаты измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций [Текст] / А.Н.Данилин, В.В.Колобов, В.Н.Селиванов, П.И.Прокопчук // Сборник докладов 9-й Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006», г.Санкт-Петербург, 20-22 сентября 2006 г. – СПб.: ВИТУ, 2006. – с. 426-430.

67. Данилин А.Н. Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников [Текст] / А.Н.Данилин, Д.В.Куклин, В.Н.Селиванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1(95). – с. 250-254.

68. Chisholm W.A. Comparison of low frequency resistance and lightning impulse impedance on transmission towers / W.A.Chisholm, E.Petrache, F.Bologna // X International Symposium on Lightning Protection, 2009, Curitiba, Brazil. - pp. 329-334.

69. Petrache E. Evaluating the transient impedance of transmission line towers / E.Petrache, W.A.Chisholm, A.Phillips // IX International Symposium on Lightning Protection, 2007, - pp. 1-5.

70. Оцінка ефективності та обґрунтування застосування в ЕЕС АПВ як засобу автоматичного керування [Електронний ресурс].-Режим доступу: <http://masters.donntu.org/2016/etf/manyura/diss/indexu.htm> (дата звертання 4.02.2018). – Назва з екрану.

71. Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ, Київ 2013.

72. Ліщак І. В. Оцінка надійності схем грозозахисту повітряних ліній електропередавання [Текст]// І. В. Ліщак, Т. В. Бінкевич // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2014. - № 736, - с.39-45.

73. Кинаш Б.М. Математические модели надёжности грозозащиты объектов энергосистем [Текст] / Кинаш Б.М., Лищак И.В., Перхач В.С.// "Электричество", 1981, №7,- с. 16-20.

74. Корсунцев А.В. Характеристики разрядов молнии и грозозащита линий электропередачи высокого напряжения переменного тока [Текст] / А. В. Корсунцев, Л. И. Павлов, И. Ф. Половой. - Москва : [б. и.], 1969. - 284 с.
75. Килев В.М. Исследования грозозащиты энергосистем методом Монте-Карло [Текст] / Килев В.М.// "Энергетика", 1975, - с.108-111.
76. Ализаде А.А. Метод определения вероятного числа грозовых перекрытий линий с учётом корреляции амплитуды и крутизны фронта тока молнии [Текст]/ Ализаде А.А., Калантаров В.Л.// Изв. АН СССР "Энергетика и транспорт", 1972, №3, - с. 73-77
77. Бочковский Б.Б. Регистрация параметров прямого удара молнии [Текст]/ Бочковский Б.Б., Майкопар А.С.// "Электрические станции", 1971, №8, - с. 51-54.
78. Гирш Ф.К. Определение закона распределения амплитуды и крутизны фронта тока молнии с учётом их корреляции [Текст]/ Гирш Ф.К., Костенко М.В. // Известия Вузов, "Энергетика", 1970, №3, - с.70-76.
79. Базелян Э.М. Длинная искра при пониженной плотности воздуха [Текст]/ Базелян Э.М., Валамот-Заде Т.Г., Шкилёв А.В. // Известия АН СССР "Энергетика и транспорт", 1976, №6, - с.149-154.
80. Ларионов В.П. Лидерная стадия искрового разряда [Текст]/ Ларионов В.П. // Электричество, 1961, №8, - с. 72-75.
81. E. Tarasiewicz Transmission line arrester energy, cost and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines / E. Tarasiewicz, F. Rimmer, A. Morched // IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, 2000, - pp. 919–924.
82. A. R. Hileman Insulation Coordination for Power Systems / A. R. Hileman // CRC Press, USA, 2002, - 777 p.
83. Борисоглебский П.В. Техника высоких напряжений [Текст] / Борисоглебский П.В., Дмоховская Л.Ф., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С., Разевиг Д.В., Рябкова Е.Я. // ГЭИ. г. Москва – Ленинград, 1963, - 473 с.
84. Данилин А.Н. Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников [Текст] / А.Н.Данилин, Д.В.Куклин,

В.Н.Селиванов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 1(95). – с. 250-254.

85. Майкопар А.С. Эквивалентное волновое сопротивление молний и грозоупорность линий сверх-высокого напряжения без тросов [Текст] / Майкопар А.С.// "Электричество", 1977, №2, - с.67-69.

86. Методические указания по определению климатических нагрузок на ВЛ с учетом ее длин, - ОАО «ФСК ЕЭС» 2010, - 100 с.

87. EN 50341_1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV [Текст]. Part 1: General requirements – Common specifications. – Brussels : CENELEC, 2009. – 234 p.

88. Шилин, А.Н. Расчёт надёжности воздушных линий электропередачи с учётом влияния погодных условий [Текст] / Шилин А.Н., Доронина О.И. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 4. – с. 18-22.

89. Alec Bennett Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy - Department of Meteorology, 2007, - 282p.

90. Дульзон А.А. Грозозащита линий электропередач [Текст] / Дульзон А.А., Каляцкий И.И.// Изд-во Томского ун-та, 1965, - 204 с.

91. Руководящие указания по проектированию и эксплуатации ВЛ и ОРУ 3-500 кВ в районах с загрязнённой атмосферой [Текст], - "Электрические станции", 1966, №7, - с. 54 -62.

92. Попов С.М. Анализ методов расчёта деформации фронта импульсной волны под действием короны [Текст]/ Попов С.М.// Труды ВНИИЭ, вып. 21, "Энергия", 1965, - с. 309-319

93. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения [Текст] / Костенко М.В., Перельман Л.С., Шакурин Ю.П.// М., "Энергия", 1973, - 272 с.

94. Костенко М.В. Грозозащита подстанций на отпайках от линий электропередачи [Текст] / Костенко М.В., Половой И.Ф., Печёнкин И.Д.// Известия ВУЗов "Энергетика", 1959, №10, - с. 29-35
95. Burger V. Trausient phenomena measured and computed for the Swiss 420 uV system Tavanasa-Silsbreite, GIGRE, 1966, - 409 p.
96. ГОСТ 1516.2-2003 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции [Текст]. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 31 с.
97. M. Shigihara A Proposal for the Prediction of the Volt-Time Curves of MV Insulators Based on the Disruptive Effect Model/ M. Shigihara, A. Piantini, M.C.E.S. Ramos, C.P. Braz, C. Mazzetti, A. Ancaji-ma.// International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Brazil, 2015, - pp. 180-185.
98. B. Sharath Prediction of Impulse Voltage-time Characteristics of Air and Oil Insulation for Different Wavefronts / B. Sharath ,S. Usa.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 6; 2009, - pp. 1693-1697.
99. International Electrotechnical Commission, 2010. International Standard IEC 62305-2. 2010. Protection against lightning. Part 2 – Risk management (in force),[online]. Available at: <<https://webstore.iec.ch/publication/6794>> [Accessed 10 November 2017].
100. СТО 08.026-2015 Устройства молниезащиты и заземления технических средств, 2015, - 50 с.
101. William A. Lightning and Grounding / A. William, Chisholm John G. Anderson // EPRI AC Transmission Line. Reference Book – 200 kV and Above, Third Edition, Electric power research institute, 2005, - 1083p.
102. Fedor Shkrabets. Methods of improving the reliability of distribution networks 6-35 kV./ Fedor Shkrabets, Maryna Kyrychenko // Видавництво Львівської політехніки-матеріали IV Міжнар. конф. молодих вчених EPECS-2013, с. 72-75.

103. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ. [Текст] / М.В. Дмитриев - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2006 г. - 44 с.
104. Zhurakhivskyi A. V. Models of probabilistic evaluation of intensity of disconnection of overhead transmission lines caused by a lightning discharge / A. V. Zhurakhivskyi, T. V. Binkevych // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2018. - № 2. - с. 80–86.
105. Binkevych T. Probabilistic evaluation of lightning-protection in overhead transmission lines / Taras Binkevych // Litteris et Artibus : proceedings of the 6th International youth science forum, November 24–26, 2016, Lviv, Ukraine / Lviv Polytechnic National University. – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. – pp. 191–192.
106. Бінкевич Т.В. Вплив конструктивних параметрів повітряних ліній електропередачі на показники надійності грозозахисту [Текст] /International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference proceedings, December, 27-28 2017, Radom: Izdevnieciba «Baltija Publishing», pp. 59-62.
107. Гайворонский А.С. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения [Текст] / Гайворонский А.С., Карасюк К.В. // Научный вестник НГТУ. 1998. № 2, - с. 9-32.
108. Гайворонский А.С. Опыт проектирования и эксплуатации молниезащиты ВЛ 220 (500) кВ «Центральная–Дагомыс» с применением линейных ОПН / Гайворонский А.С., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А., Ковтун Г.Н. [Текст]// ЭНЕРГО-INFO, № 11(58), 2011, - с. 1-11.
109. Доронина О.И. Оценка надежности воздушных линий электропередачи с учетом климатических факторов [Текст] / Доронина О.И., Шевченко Н.Ю., Бахтиаров К.Н. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9-2, – с. 226-230.

110. Гумерова Н.И. Влияние локальных импульсных сопротивлений заземлений основного и защитного оборудования на надежность грозозащиты подстанции [Текст] / Гумерова Н.И., Данилин А.Н., Ефимов Б.В. и др. // Первая Российская конференция по молниезащите: Сборник докладов. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2007, - 480 с.

111. Ефимов Б.В. Грозовые волны в воздушных линиях [Текст]. / Ефимов Б.В. - Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2000, - 134 с.

112. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учебник [Текст] / Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхерд А. // Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004, - 319 с.

113. System. Windows. Forms. [Электронный ресурс].-Режим доступа: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.windows.forms.formru/library/system.windows.forms.form\(v=vs.110\).aspx#Anchor_7](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/system.windows.forms.formru/library/system.windows.forms.form(v=vs.110).aspx#Anchor_7) (дата звертания 4.07.2018). – Назва з екрану.

114. Оптимум Парето [Электронный ресурс].-Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Оптимум_Парето (дата звертания 5.07.2018). – Назва з екрану.

115. Диагностика систем молниезащиты [Электронный ресурс].-Режим доступа: http://euroteplo.ru/services/service_38.html (дата звертания 5.07.2018). – Назва з екрану.

116. В. А. Цилько Диагностика систем молниезащиты [Текст] / В. А. Цилько, Ю. В. Целебровский, С. В. Нестеров // Диагностика электрических установок. Материалы второго научно-практического семинара Общественного Совета Сибири и Востока по проблемам диагностики электрических установок, 2008, - с. 53-64.

117. Диагностика молниезащитных систем [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://znatock.org/s4504t1.html> (дата звертания 5.07.2018). – Назва з екрану.

118. Стержневые системы заземления [Электронный ресурс].-Режим доступа: http://www.sib.com.ua/arhiv_2007/2007-2/2007_2_sterjn_zazemlenie.htm (дата звертания 5.07.2018). – Назва з екрану.

119. Способы повышения эффективности заземления электроустановок [Электронный ресурс].-Режим доступа: <https://bipron.com/sposobi> (дата звертання 5.07.2018). – Назва з екрану.
120. Яворський В.Т. Основи теоретичної хімії: підручник [Текст] /В.Т. Яворський. – 2 – ге вид., доп. і пероробл. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010, – 348 с.
121. Інгібітори корозії [Електронний ресурс].-Режим доступа: http://elib.lutsk-ntu.com.ua/book/tf/m_ta_pfkм/2010/10-108/page41.html (дата звертання 5.07.2018). – Назва з екрану.
122. Электролитическое заземление [Электронный ресурс].-Режим доступа: http://www.zandz.ru/elektroliticheskoe_zazemlenie.html (дата звертання 15.06.2018). – Назва з екрану.
123. Монтаж заземления [Электронный ресурс].-Режим доступа: <https://www.proektant.ua/content/300.html> (дата звертання 10.01.2018). – Назва з екрану.
124. Технический бюллетень [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.hakel.ru/pages.phtml?menu=3&page=110> (дата звертання 11.03.2018). – Назва з екрану.
125. Композиция для снижения переходного сопротивления [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/252/2528831.html> (дата звертання 11.03.2018). – Назва з екрану.
126. О. Ю. Глебов Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе [Текст] / О. Ю. Глебов [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 51 (1160), – с. 17-24.
127. Д. Г. Колиушко Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины [Текст] / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, Г. М. Колиушко //

Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Техніка та електрофізика високих напруг – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – № 15 (1237), – с. 44-48.

128. Д. Г. Колиушко Інтерпретація результатів вертикального електричного зондування в виде чотирьохслойного геоелектричного полупространства [Текст] / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПІ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12 (1121), – с. 324-329.

129. З. А. Воронина Методика и результаты проведения диагностики заземляющих устройств [Текст] / З. А. Воронина [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПІ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков : НТУ "ХПІ". – 2012. – № 52 (958), – с. 49-59.

130. А.В. Тищенко Технологии ремонта проводов и грозозащитных тросов больших воздушных переходов с применением арматуры спирального типа [Текст] / А.В. Тищенко, С.В. Рыжов, С.В. Жигулин, А.А. Мельников // Журнал «Воздушные линии», №2, 2013 г., - с. 48-54.

131. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3, – с. 35–36.

132. Лежнюк П. Определение параметров ЛЭП критериальным методом с использованием нечёткого моделирования [Текст] / Лежнюк П. и О. Рубаненко // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2008 - №4, – с. 1-6.

133. Лежнюк П.Д. Повышение эффективности управления режимами электрических сетей на базе мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды [Текст] / П.Д. Лежнюк, Н.М. Черемисин, В.В.Черкашина и др.// Электрические сети и системы.-Київ: ТОВ "Гнозіс"– 2012. – №5, – с.39-46.

134. Титов Н.Н. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии [Текст] / Н.Н. Титов, Н.М. Черемисин, П.Д. Лежнюк и др. – Праці інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонній контрактів і балансуєчого ринку, 2009, – с.41–48.

135. П. Лежнюк Волоконно-оптичні технології в моніторингу повітряних ліній електропередачі [Текст] / П. Лежнюк, М. Черемісін, і В. Черкашина // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 30(2), 2016, - с. 106-110.

136. Г. М. Колиушко Определение степени влияния электромагнитных эффектов молнии на оборудование объектов энергетики [Текст] / О. Ю. Глебов, В. В. Князев, Г. М. Колиушко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 60 (1033) – с. 43-51.

137. Саравас В.Е. Анализ факторов, влияющих на энергетическую эффективность систем электроснабжения [Текст] / Саравас В.Е., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2017. – Вип. 1/2017 (37). – С. 56 – 62.

138. Саравас В.Е. Определение индекса надежности систем электроснабжения [Текст] / Саравас В.Е., Жежеленко И.В. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – Дніпро: ДНУЗТ, 2017. – № 13. – С. 31-34.

139. Viktoriya Saravas Weight-to-price indicators of electromagnetic systems single-phase transformers and reactors with twisted magnetic circuits [Текст]/ Andrey Stavinskii ; Larisa Vakhonina ; Oleksiy Sadovoy ; Viktoriya Saravas // Modern electrical and energy system, International Conference, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, november 15-17, 2017. – Kremenchuk: KNTU, 2017. – p.172-175

ДОДАТКИ

Додаток А

Вимірювання приладом MRU-105 опору заземлювальних пристроїв опор ЛЕП та питомого опору ґрунту

Вимірювання опору заземлення опор ЛЕП 110 – 330 кВ та питомого опору ґрунту виконувалось приладом MRU – 105 (SER. NO.:AC2875) компанії SONEL (рисунок А.1). Вимірювач параметрів заземлюючих пристроїв MRU-105 призначений для вимірювання опору заземлюючих пристроїв та питомого опору ґрунту. Прилад характеризується хорошими ергономічними показниками та широкими вимірювальними функціями (в тому числі аналіз умов, що негативно впливають на точність отриманих результатів). Прилад MRU-105 укомплектований струмовимірювальними кліщами для проведення вимірювань заземлюючих пристроїв без роз'єднання заземлювачів. Унікальна конструкція котушок з вимірювальними проводами дозволяє розмотувати провід зі збереженням контакту з зондом [24,46].



Рисунок А.1. Зовнішній вигляд вимірювального приладу MRU-105

Вимірювальний прилад MRU105 вимірює наступні параметри [2]:

- Опір заземлювального пристрою за три- або чотиріполюсною схемою;

- Питомий опору ґрунту ;
- Опір постійному струмові з використанням дво - або чотириполюсної схеми;
- Перевірка напруг завад (змінний і постійний струм) зі схемою, яка блокує вимірювання опору, коли завади зависокі;
- Пам'ять пристрою становить 300 результатів вимірювань з можливістю передачі даних в комп'ютер.

Прилад MRU105 вимірює опір заземлення RE (без використання кліщів): від 0,01 Ом до 20 кОм, з можливим кроком 0,01 Ом. Похибка становить 3%. Діапазони вимірювань: 0,00 - 9,99 Ом; 10,0 - 99,9 Ом; 100 - 999 Ом; 1,00 - 9,99 кОм; 10,0 - 20,0 кОм.

З використанням кліщів MRU-105 вимірює опір без розриву кола заземлення від 0,01 Ом до 20 кОм, з можливим кроком 0,01 Ом. Похибка вимірювання за допомогою кліщів становить 8%. Діапазони вимірювань: 0,00 - 9,99 Ом; 10,0 - 99,9 Ом; 100 - 999 Ом; 1,00 - 9,99 кОм; 10,0 - 20,0 кОм.

Пристрій MRU105 також проводить вимірювання питомого опору ґрунту ρ від 0 до 999 кОм. З можливим кроком від 0,01 Ом / м. Діапазони вимірювань: 0,00 - 9,99 Ом / м; 10,0 - 99,9 Ом / м .; 100 - 999 Ом / м .; 1,00 - 9,99 кОм / м .; 10,0 - 99,9 кОм / м .; 100 - 999 кОм / м.

Крім усього іншого цим приладом можна вимірювати активний опір з допомогою кліщів і без них, а також напругу завад від 0 до 40 В.

Додаткові технічні характеристики MRU-105 наведені в таблиці А.1[24].

Таблиця А.1 Додаткові технічні характеристики MRU-105

Клас ізоляції	подвійна, згідно PN-EN61010-1 і IEC 61557
Категорія безпеки	III 300 В згідно PN-EN 61010-1
Ступінь захисту корпусу	PN-EN 60529 IP54
Максимальна напруга завад (сума змінного і постійного струму), за якої можливі вимірювання	24 В
Максимальна вимірювальна напруга завад	40 В

Частота вимірювального струму	128 Гц
Вимірювальна напруга	40 В
Вимірювальний струм	225 мА
Максимальний опір вимірювальних зондів	50 кОм
Живлення вимірювача	пакет акумуляторів типу SONEL NiMH 7,2 V
Час для виконання вимірювань: - опору за двополюсною схемою - опору за чотириполюсною схемою - опору заземлення за 3-х і 4-х полюсними схемами Опір заземлення за 3-х полюсною схемою з використанням кліщів Опір ґрунту	<8 секунд <16 секунд <16 секунд <20 секунд <16 секунд
Стандарт якості MRU-105	розробка, проект і виробництво згідно ISO 9001

Вимірювання сумарного опору заземлення опори ЛЕП проводились за триполюсною схемою (з використанням вимірювальних кліщів) (рисунок А.2) [24].

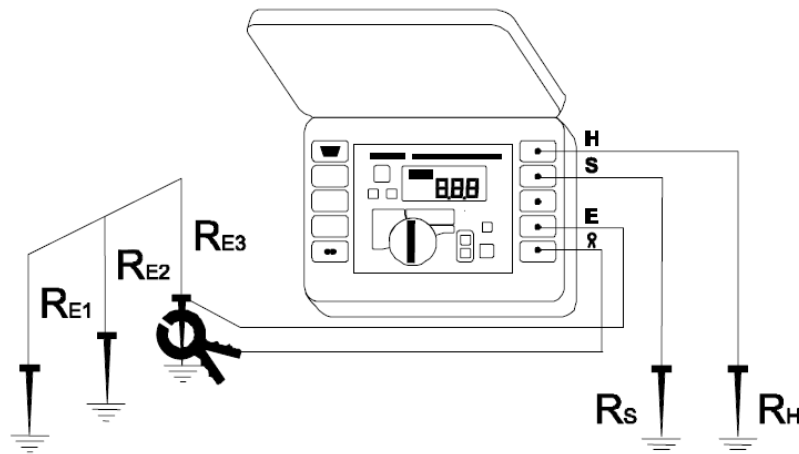


Рисунок А.2. Триполюсна схема вимірювання опору заземлення (з використанням вимірювальних кліщів)

Вимірювач може бути використаний для вимірювань параметрів багатоелементних заземлювачів (сукупність заземлюючих електродів з'єднаних в систему пристроїв заземлення) без необхідності їх роз'єднання. Вимірювальні кліщі використовуються для інструментального визначення струмів, що течуть через

окремі електроди пристрою заземлення, при цьому використовується наступна процедура:

1. З'єднуємо досліджуваний заземлювач з вимірювальним гніздом 4 вимірювача, позначених символом «Е».

2. Струмовий вимірювальний зонд забиваємо в ґрунт на відстані, що перевищує 40 м. від досліджуваного заземлювача та з'єднуємо вимірювальним проводом з вимірювальним гніздом «Н».

3. Потенціальний зонд встановлюємо в ґрунт на відстані 20 м від вимірюваного заземлювача та з'єднуємо з гніздом 2 «S». Заземлювачі (струмовий і потенціальний), вимірювальні зонди повинні бути встановлені в одну лінію (див. рисунок Б.2) .

4. Підключаємо вимірювальні кліщі проводом до гнізда R і охоплюємо обхватом вимірювальних кліщів досліджуваний зонд нижче місця приєднання проводу «Е» (рисунок А.3)

5. Поворотний перемикач функцій 7 встановлюємо в положення RE Зр.

6. Натискаємо клавішу 8 START.

7. Знімаємо величини значення опору заземлення R_E , а також значення опорів вимірювальних щупів R_S і R_H (рисунок А.4).

8. Повторюємо вимірювання (п.п. 5 та 6) після переміщення потенціального вимірювального щупа на кілька метрів віддаляючи або наближаючи до досліджуваного заземлювача. Якщо результати вимірювань відрізняються більше ніж на 3%, то необхідно значно збільшити відстань струмового вимірювального щупа до досліджуваного і повторити вимірювання .

Під час вимірів опорів заземлювачів, що складаються з системи електродів, з'єднаних з опорою лінії електропередачі, іноді виникає потреба у визначенні не тільки опору окремих елементів заземлювача, а й загального опору всієї його системи електродів. Вимірявши значення опорів окремих елементів заземлювача RE1, RE2, RE3, RE4, визначаємо загальну величину опору системи за формулою:



(a)



(б)

Рисунок А.3. Встановлення вимірювальних кліщів на спуск №1 (а) та підключення проводу струмового зонду (б)



Рисунок А.4 Результати вимірювання опору заземлення спуску №1 та №2

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{E4}}}, \quad (\text{A.1})$$

Для вимірювань питомого опору ґрунту вимірювачі використовують опори окремих електродів системи заземлення, для чого в геології були розроблені спеціальні прилади. У цих установках аналогічна функція вимірювання задається простим вибором положення поворотного перемикача функцій.

Ця функція з метрологічної точки зору ідентична до чотирьохполюсної схеми вимірювань опору заземлення (рисунок А.5), але містить додаткову процедуру введення в прилад взаємних відстаней між вимірювальними щупами і електродами заземлювача. Результат вимірювання - величина питомого опору ґрунту визначається автоматично згідно з формулою $\rho = 2\pi d R_E$, яка застосовується в методиці вимірювання Веннера. Вищезазначена методика передбачає рівні відстані між електродами.

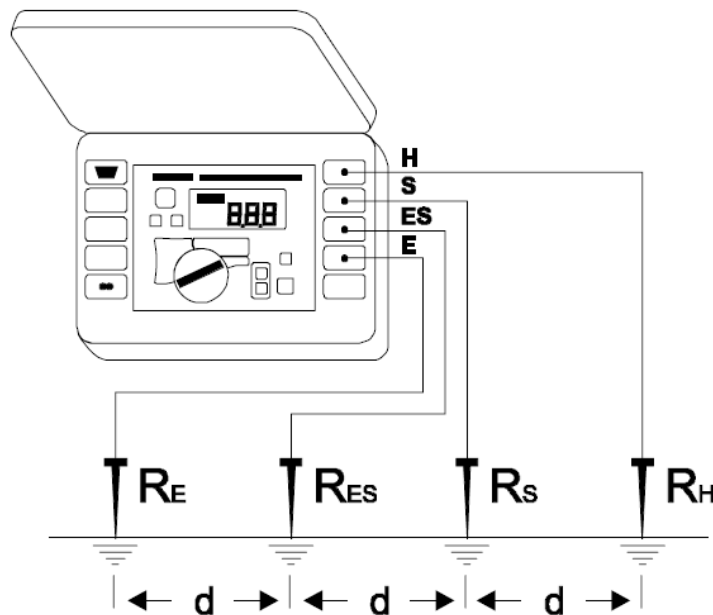


Рисунок А.5. Чотирьохполюсна схема вимірювання питомого опору ґрунту

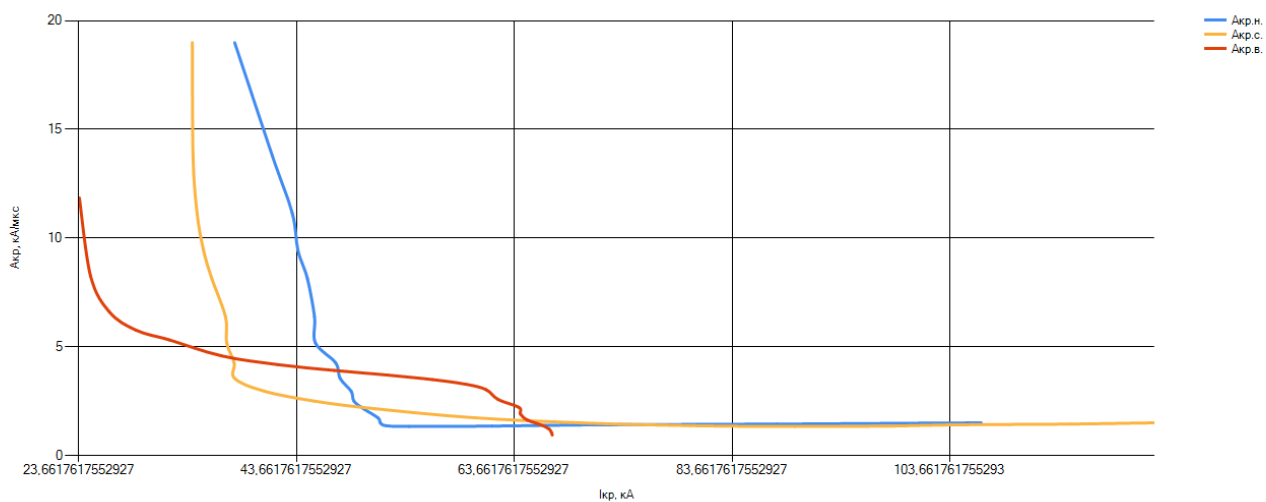
Процедура, що застосовується для вимірювання питомого опору ґрунту, наступна [24]:

1. Вимірювальні щупи встановлюємо в ґрунт по прямій лінії через рівні взаємні відстані і з'єднують з вимірювальними гніздами 1, 2, 3 і 4, позначеними символами «Н», «S», «ES» і «E», відповідно.
2. Поворотний перемикач 7 встановлюємо в положення «р».
3. Натискаємо клавішу 8 START.
4. Використовуючи клавіші управління стрілками 11 і 12 змінюємо величину відстані між електродами, яку вказують на дисплеї так, щоб вона найкраще узгоджувалася з фактичним відстанню.
5. Натискаємо клавішу 8 START.
6. Знімаємо значення опору заземлення R_E , а також значення опорів вимірювальних щупів R_S і R_H (рисунок А.6).

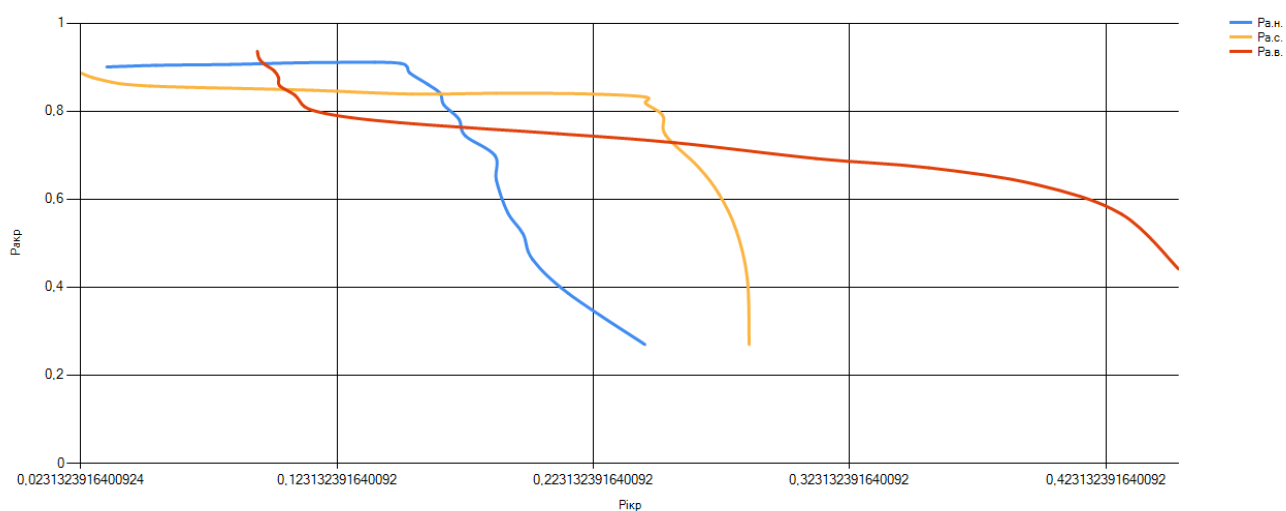


Рисунок А.6 Калібрування відстаней електродів та вимірювання питомого опору ґрунту

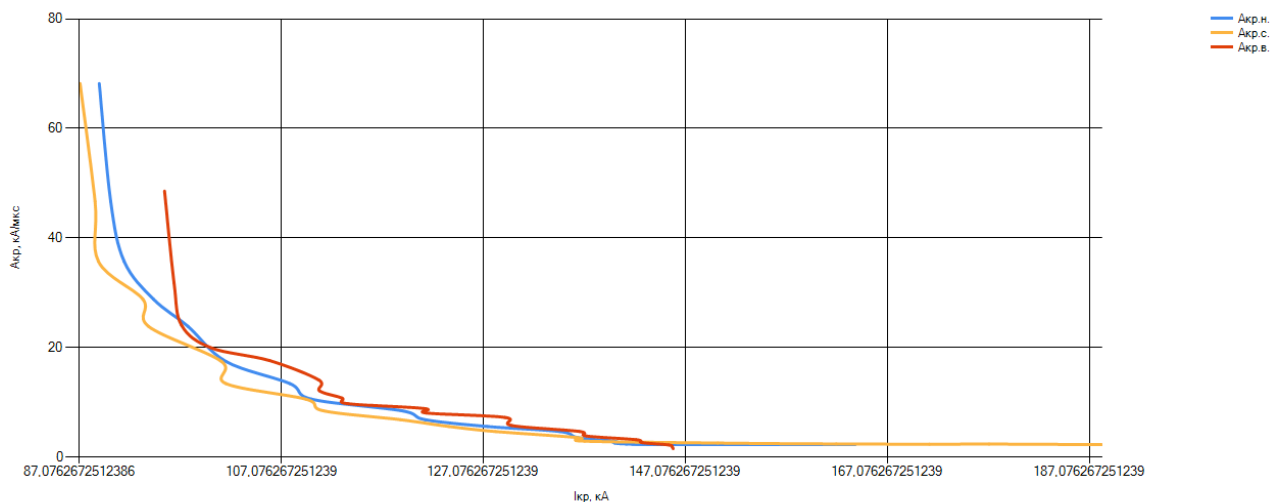
Додаток Б
Розрахункові графіки кривих небезпечних параметрів за удару блискавки
в ЛЕП 110 – 330 кВ
1. ПЛ 110 кВ



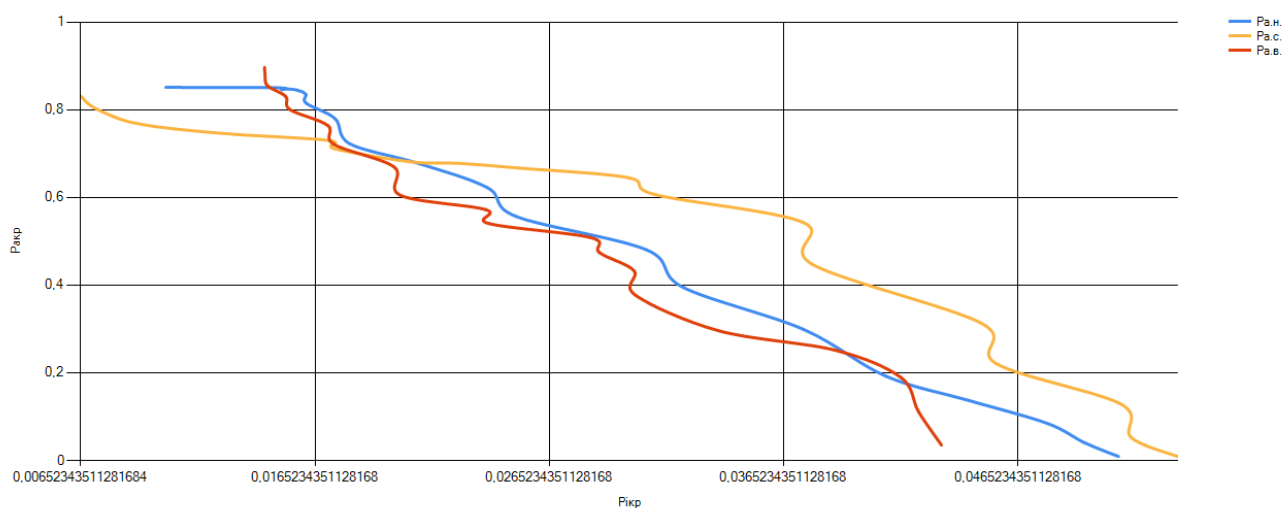
(a)



(б)



(B)



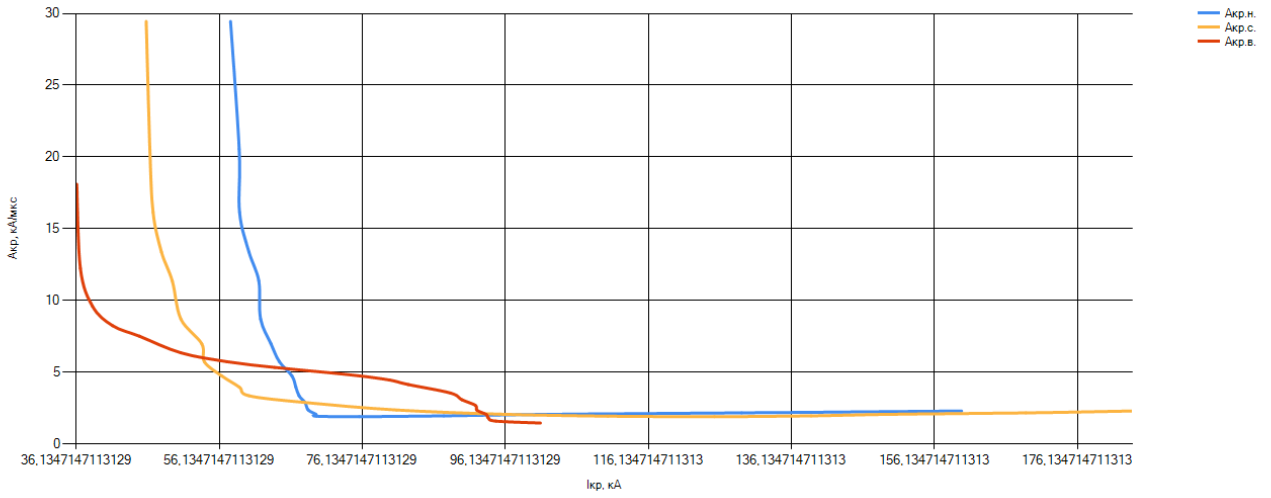
(Г)

Рисунок Б.1 – КНП за удару блискавки в ЛЕП 110 кВ Л 2 – ЛТЕЦ 1

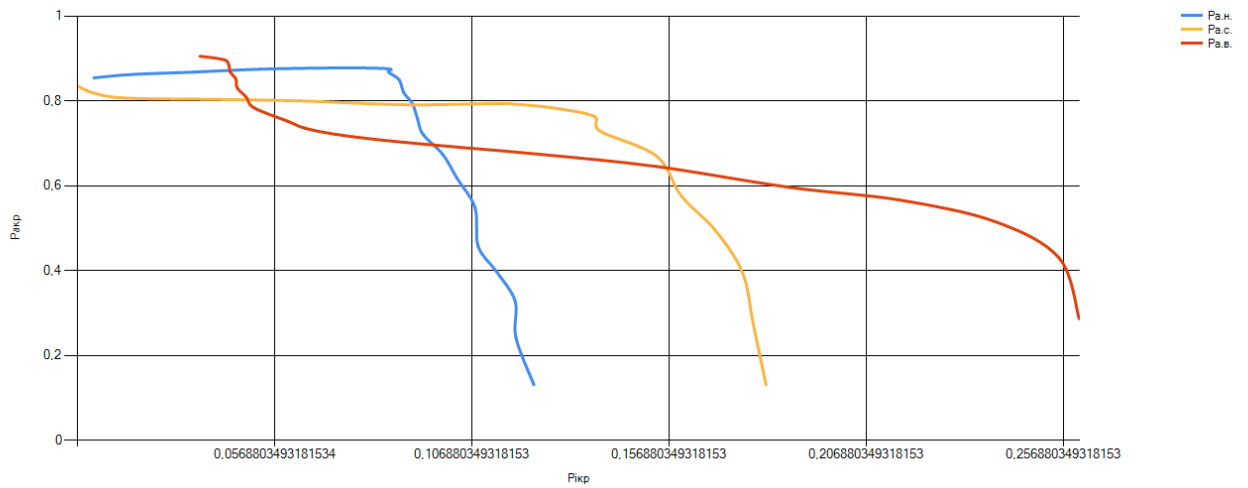
- в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору № 26;

- в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос опори № 26

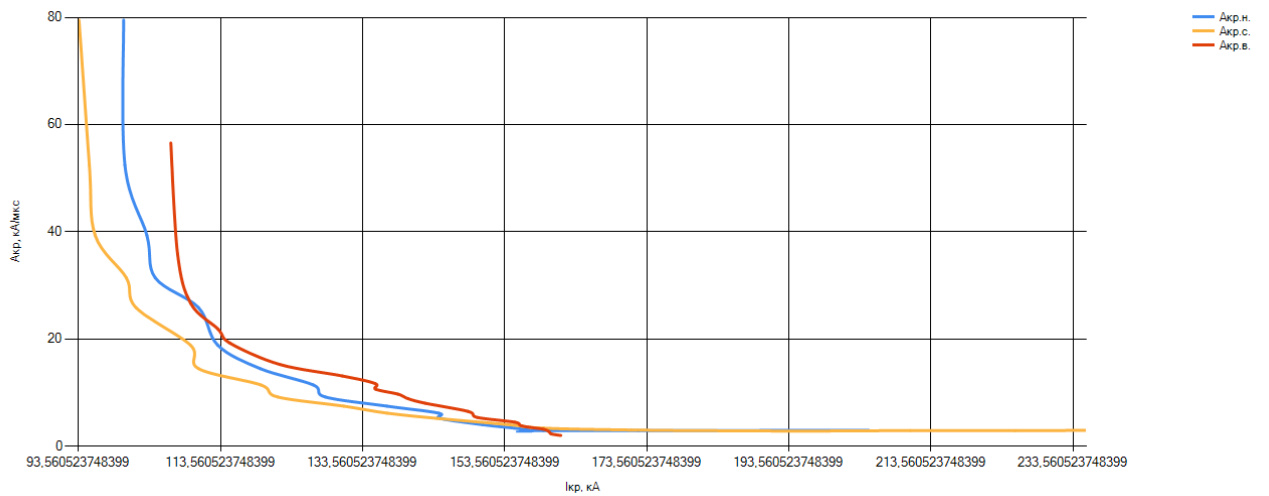
2. ПЛ 220 кВ



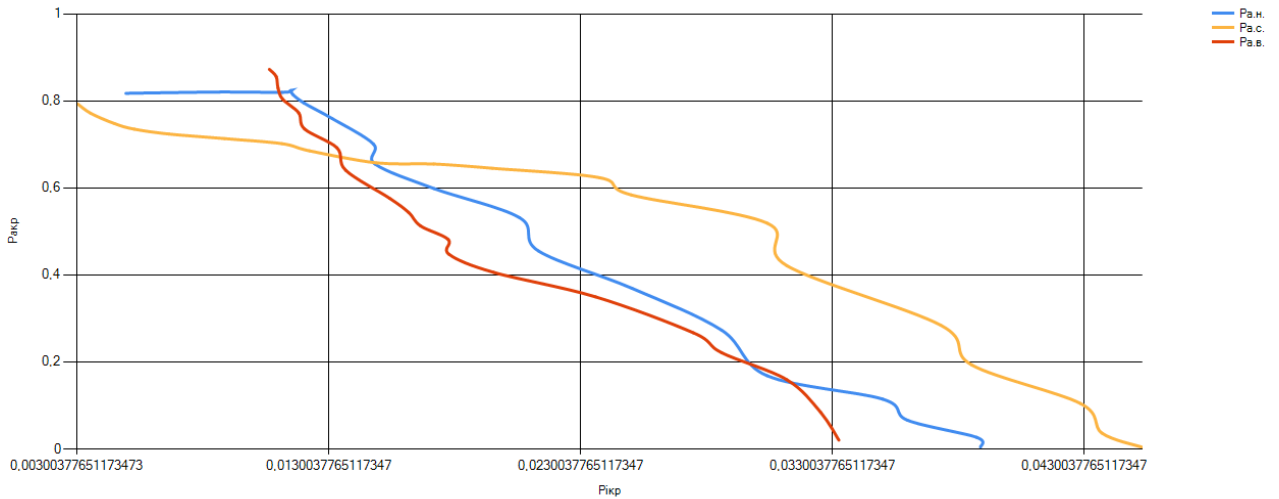
(a)



(б)

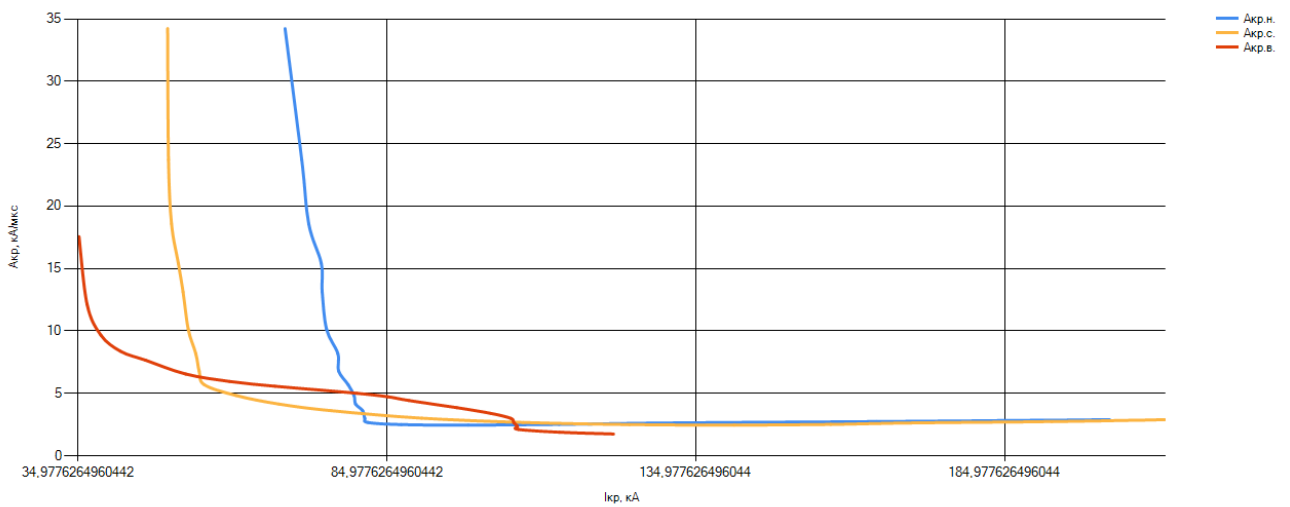


(B)

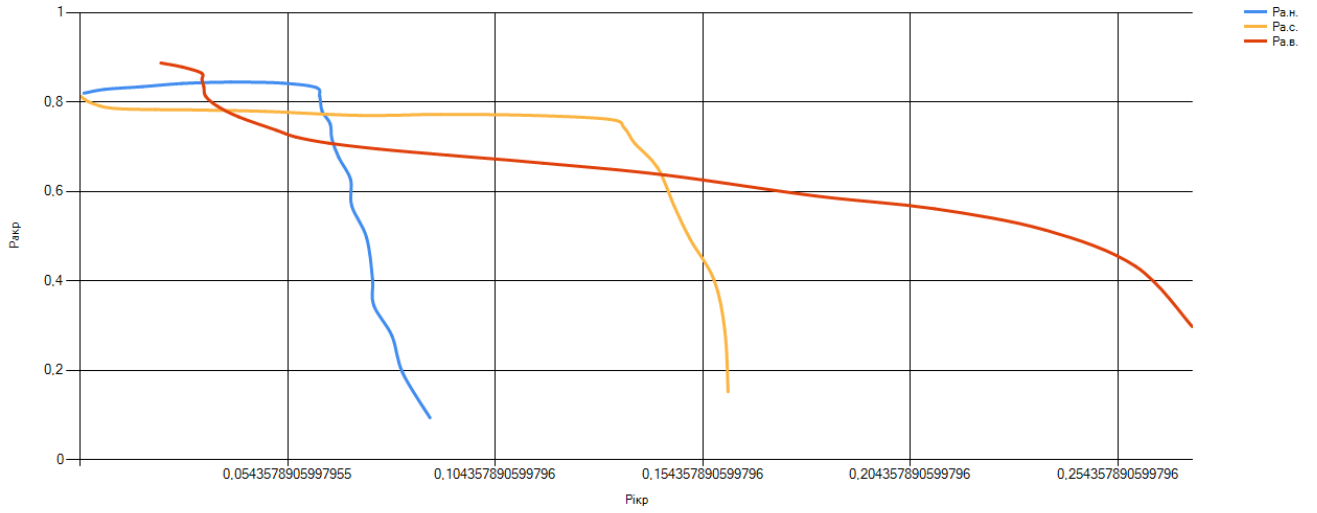


(Г)

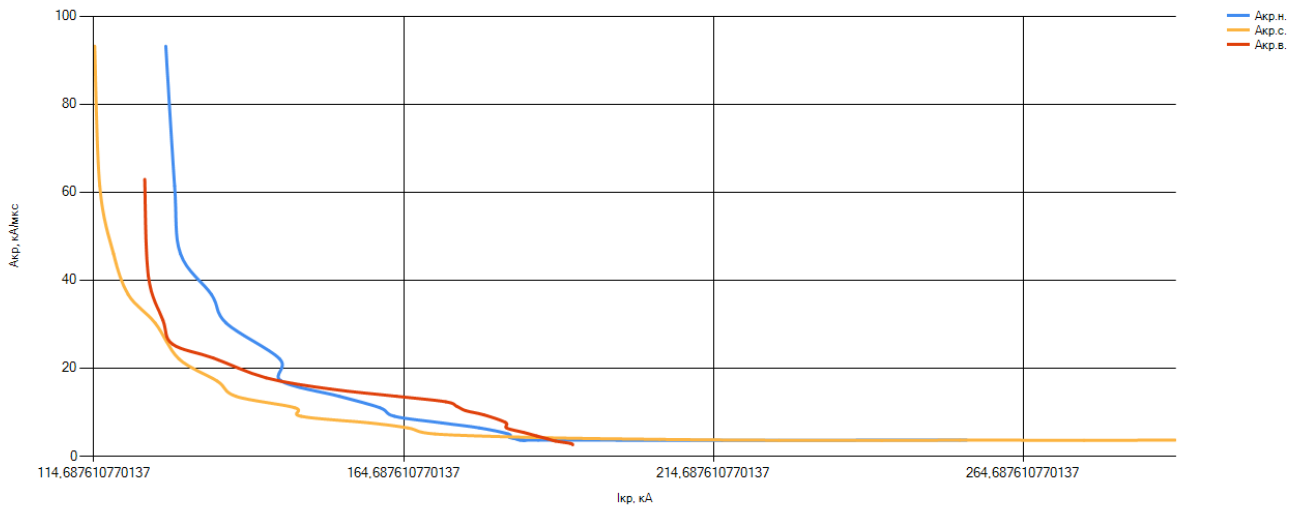
Рисунок Б.2 – КНП за удару блискавки в ЛЕП 220 кВ Стрий – Борислав
 - в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору;
 - в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос



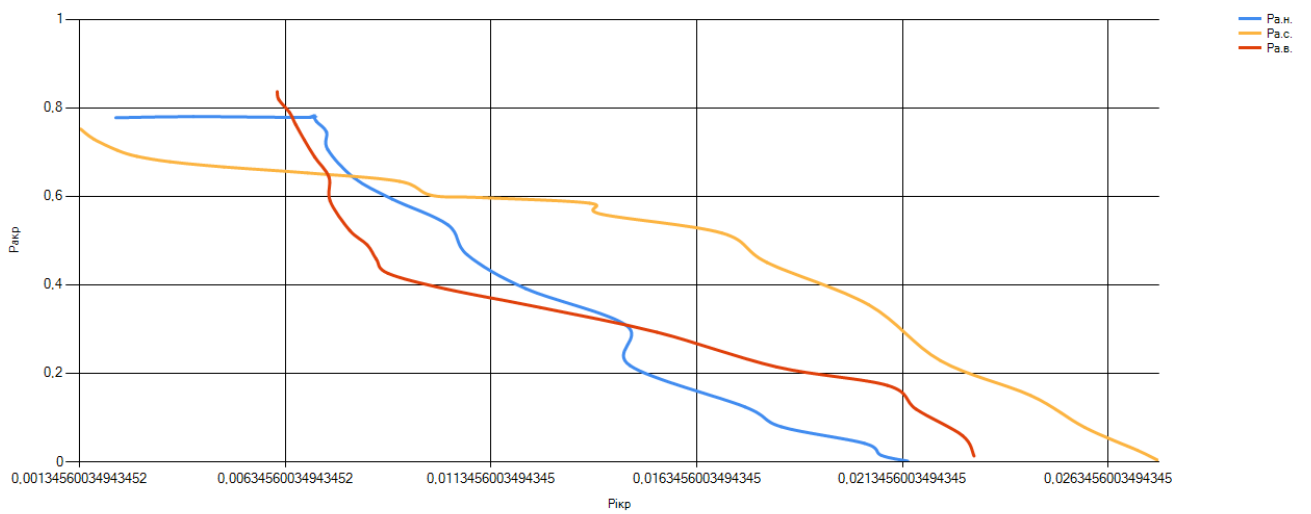
(а)



(б)

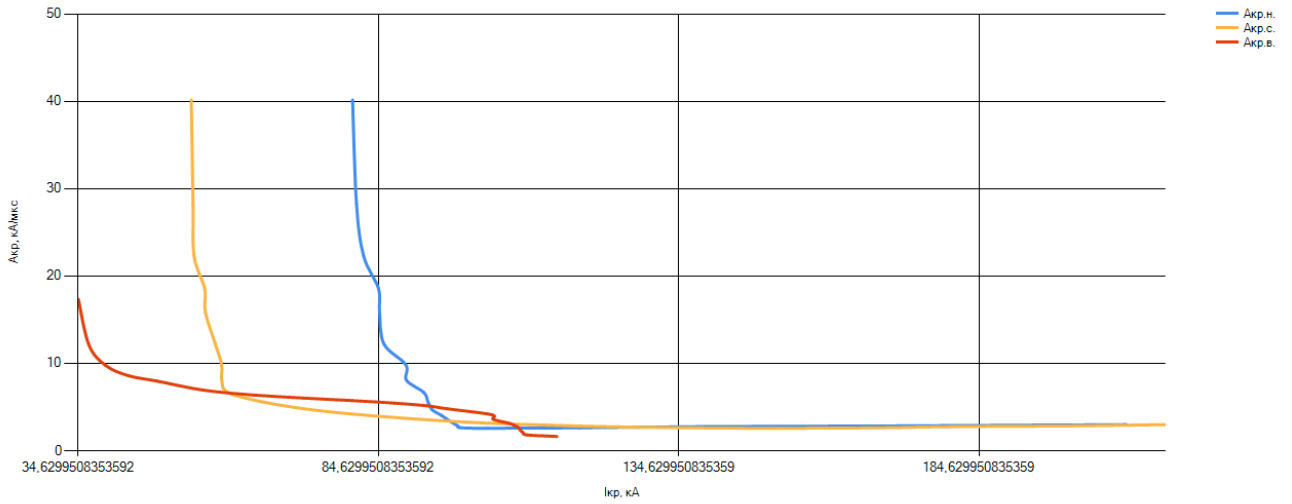


(в)

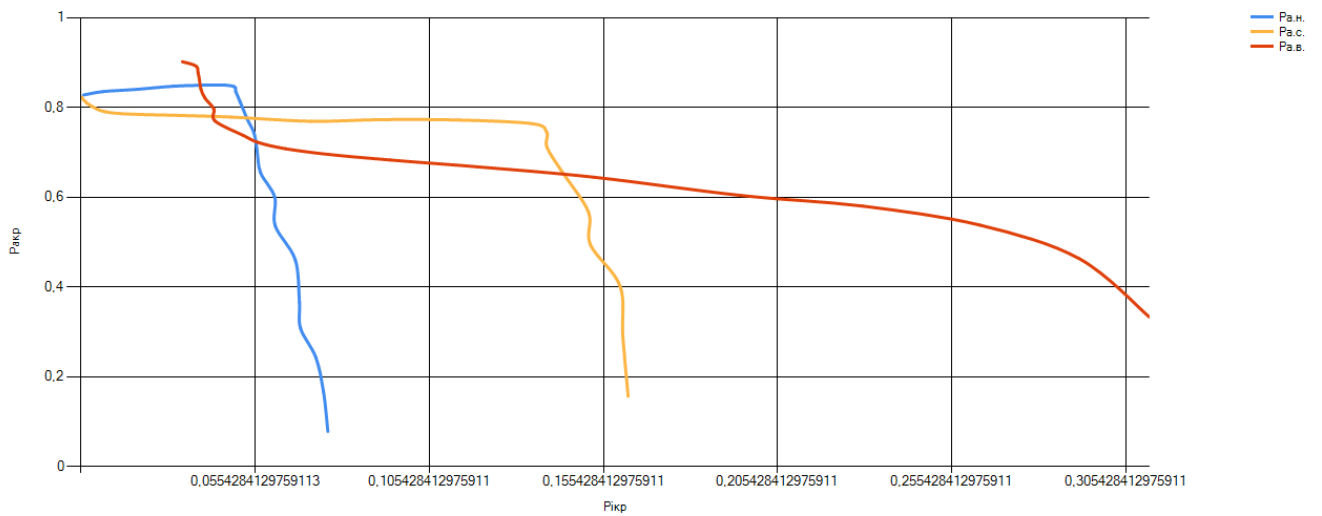


(г)

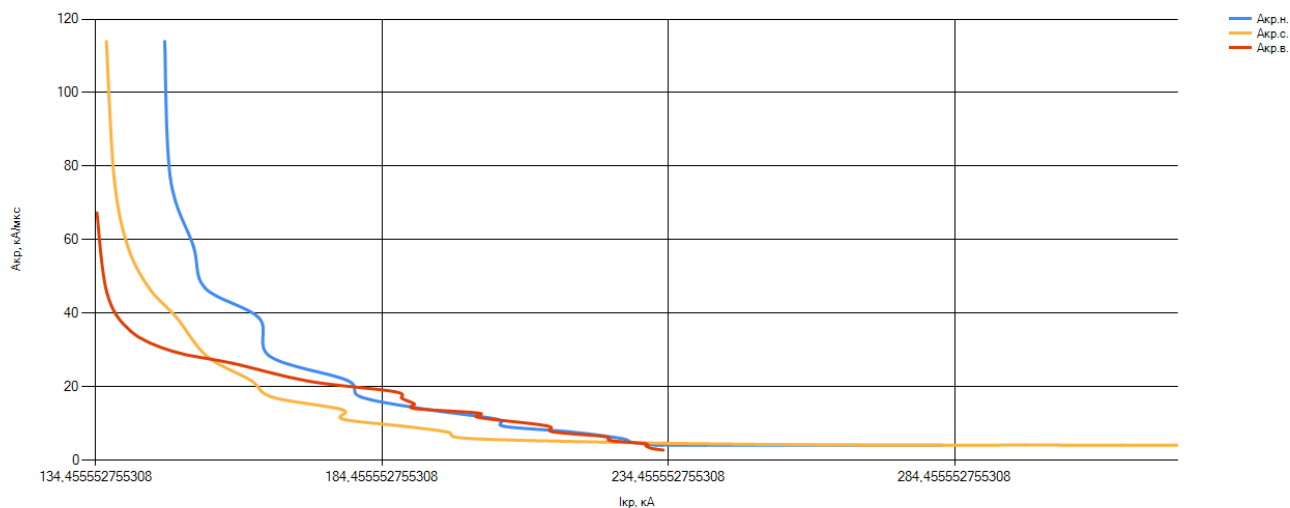
Рисунок Б.3 – КНП за удару блискавки в ЛЕП 220 кВ Стрий – Львів південна
 - в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору;
 - в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос



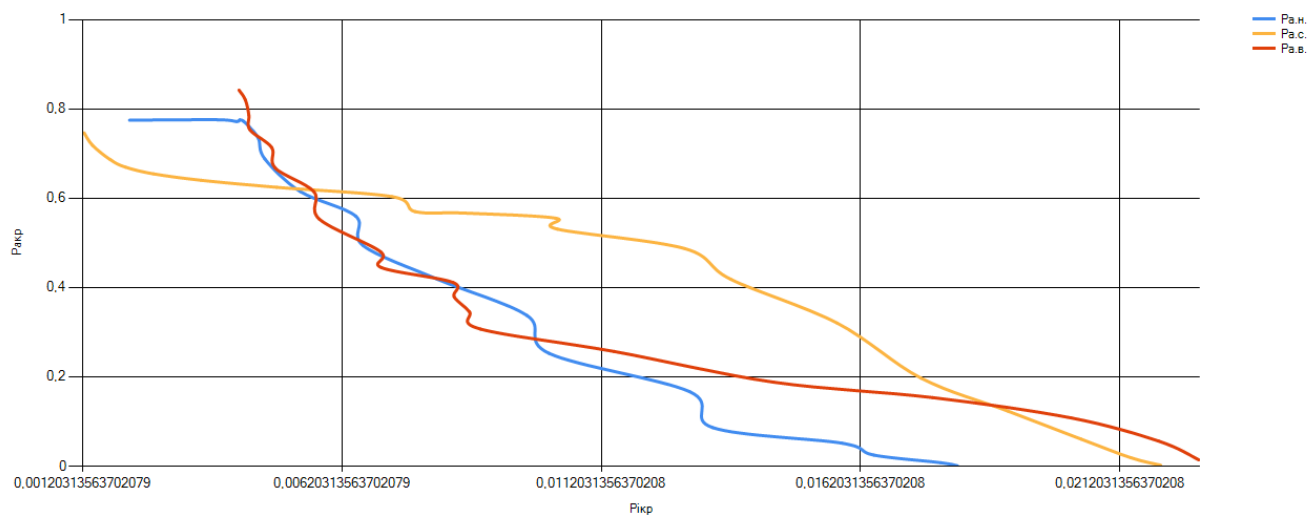
(а)



(б)

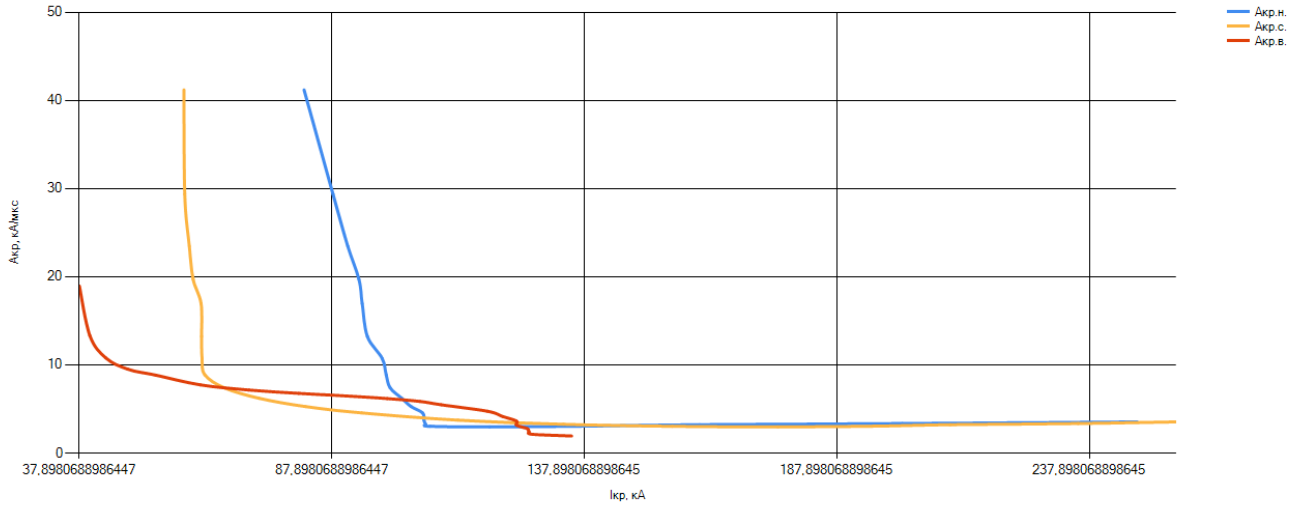


(B)

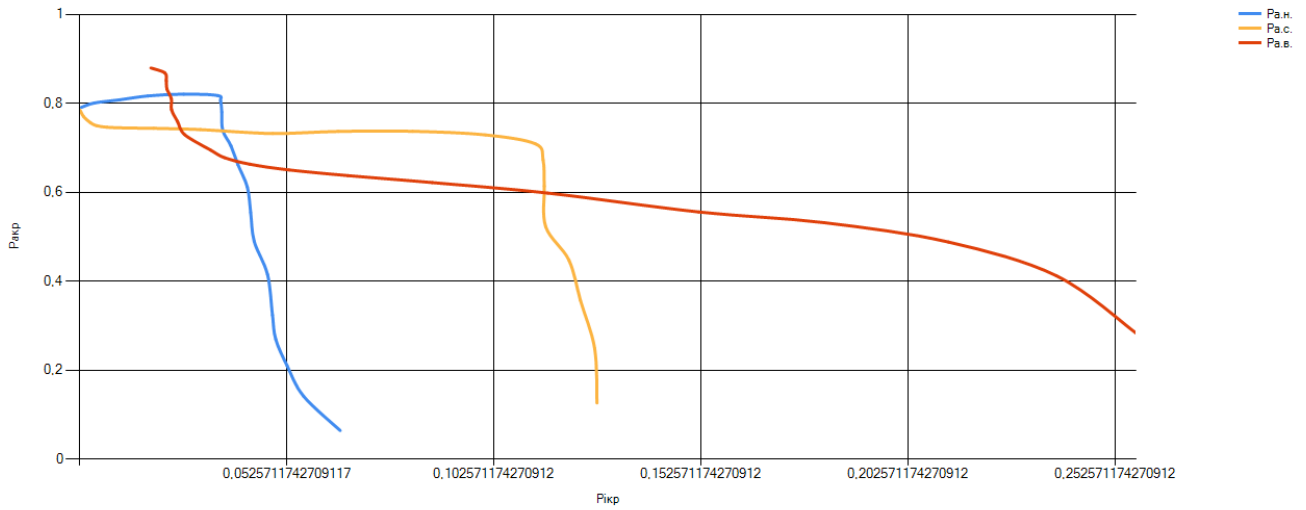


(Г)

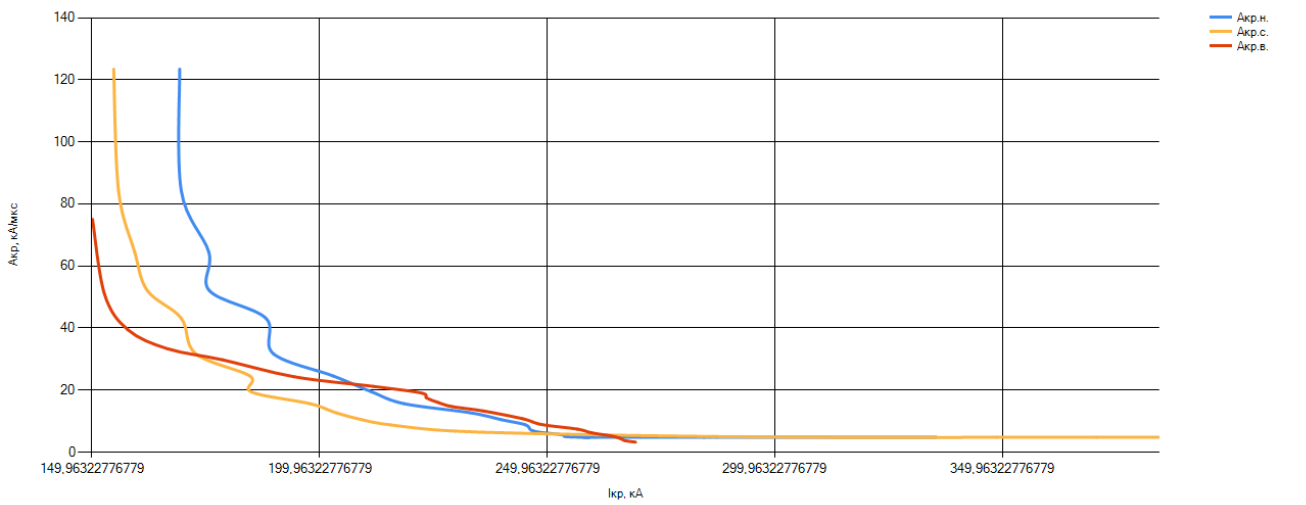
Рисунок Б.4 – КНП за удару блискавки в ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево
 - в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору;
 - в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос



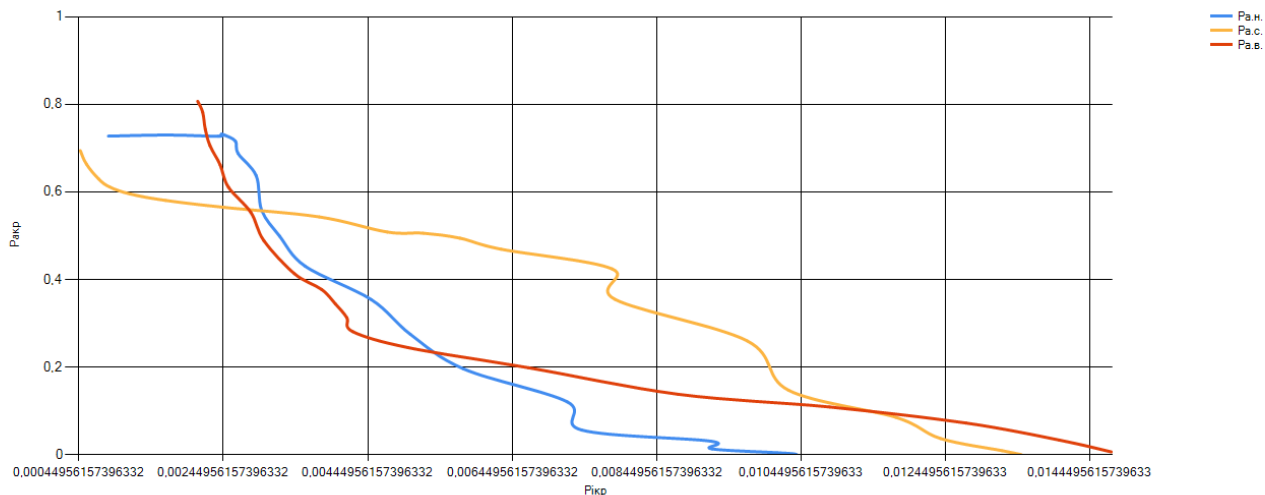
(a)



(б)



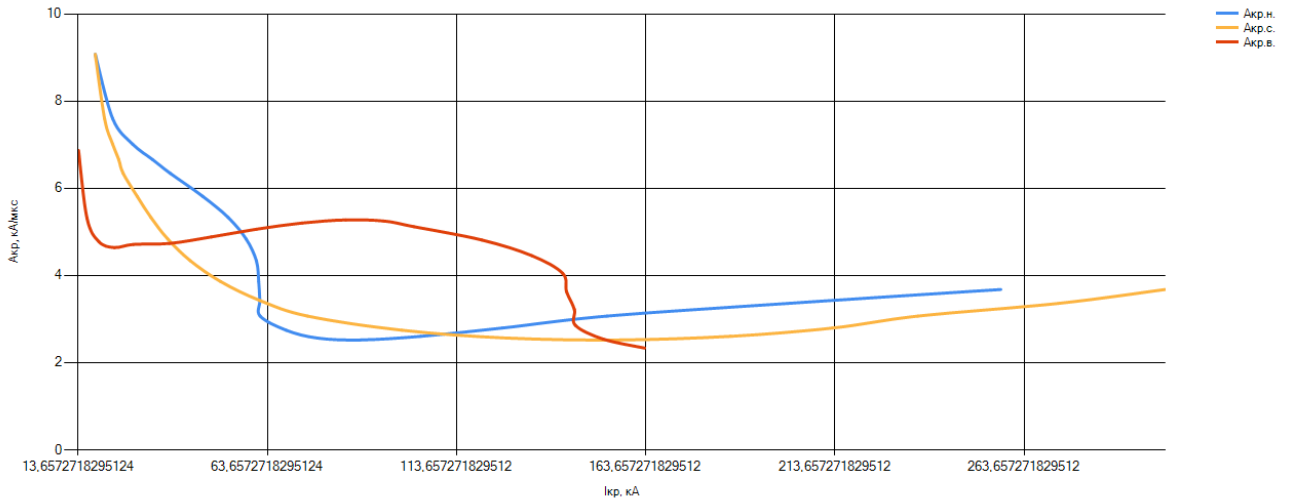
(B)



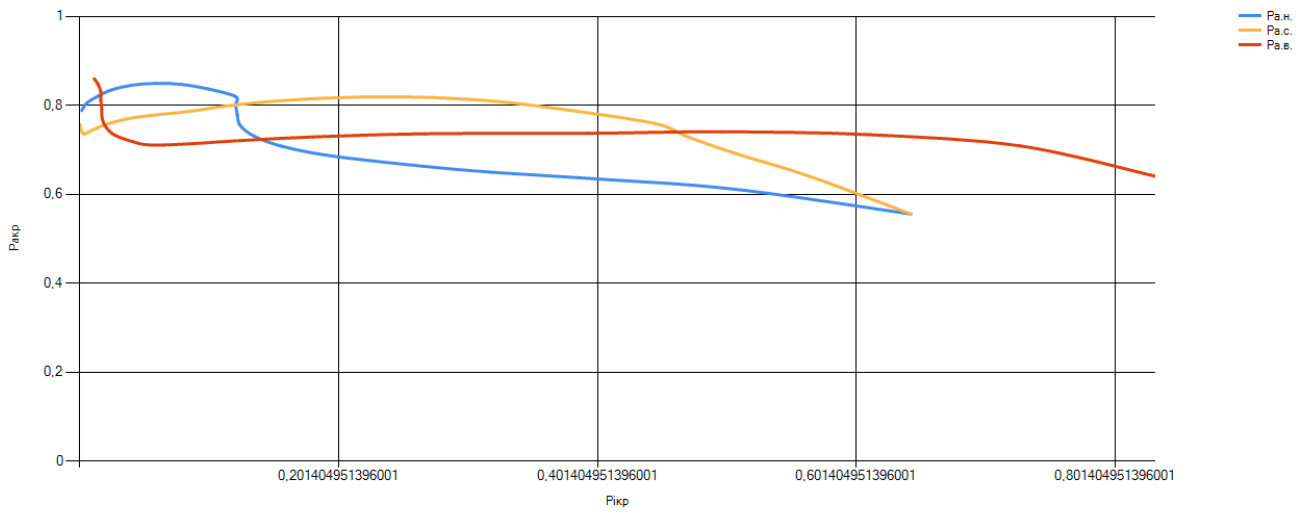
(г)

Рисунок Б.5 – КНП за удару блискавки в ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС
 - в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору;
 - в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос

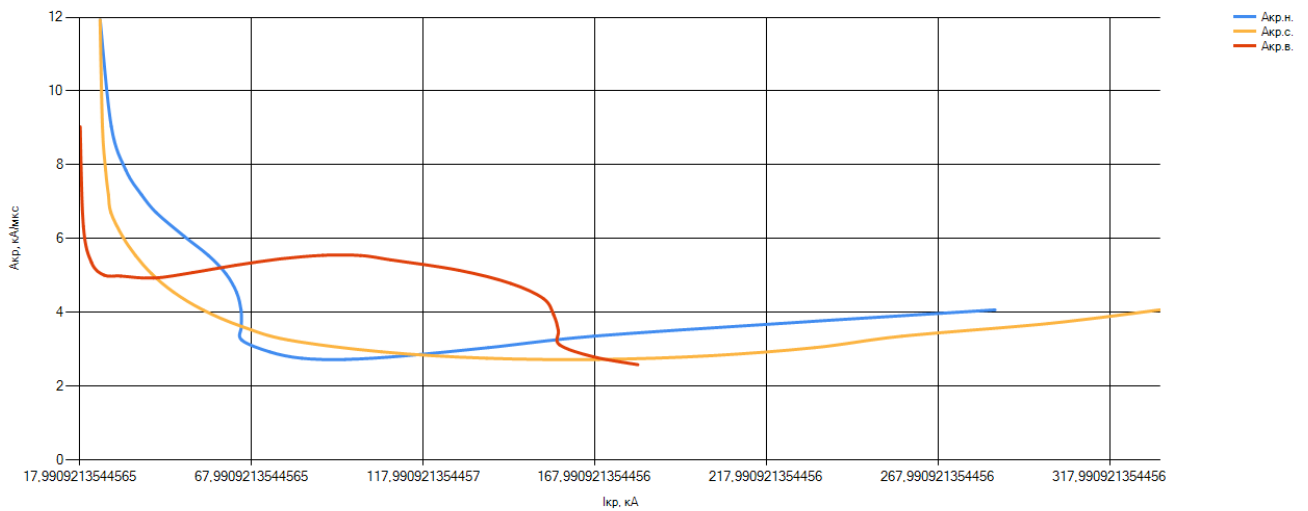
3. ПЛ 330 кВ

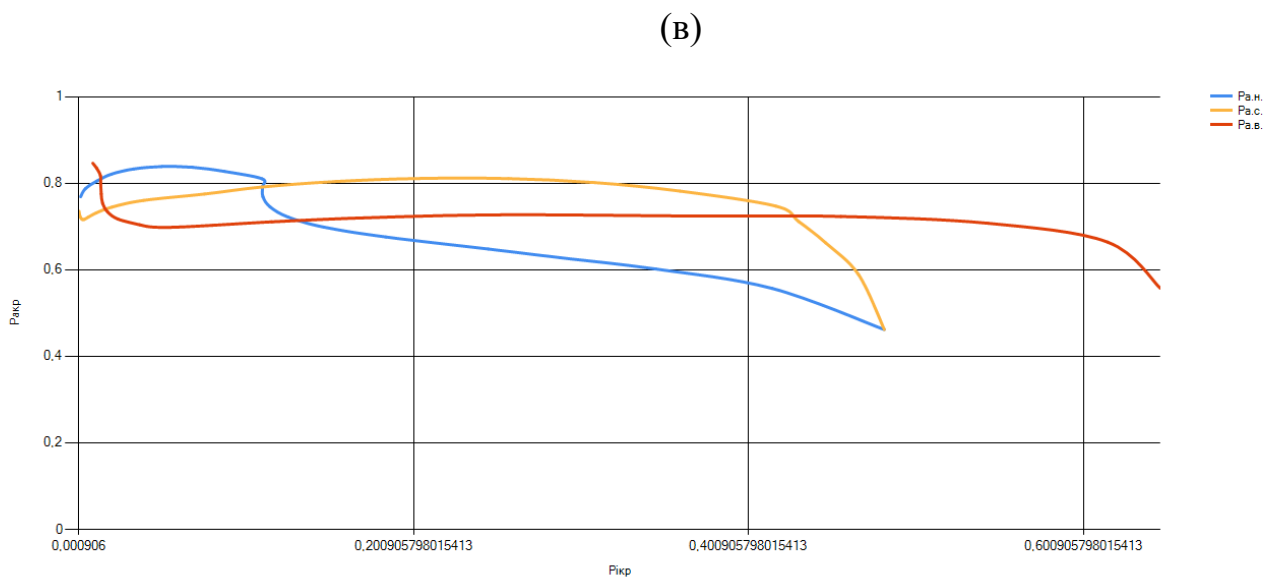


(a)



(б)





(Г)

Рисунок Б.6 – КНП за удару блискавки в опору ЛЕП 330 кВ РАЕС – Ковель
 - в абсолютних (а) і відносних (б) одиницях за удару блискавки в опору;
 - в абсолютних (в) і відносних (г) одиницях за удару блискавки в трос

Додаток В

Порівняння результатів розрахунку надійності грозозахисту отриманих за методикою [1,2] та за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

Для порівняння результатів, отриманих на розробленій математичній моделі розрахунку надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів з результатами, отриманими згідно методики, викладеною в [1,2] проводимо розрахунки ЛЕП 500 кВ протяжністю 500 км. Середня висота місцевості, по якій проходить ЛЕП становить 300 м. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 40 грозових год. Досліджуємо проміжну металеву опору типу ПБ-2.

ЛЕП виконана проводом марки 3*АС 500/64 (к-сть кіл -1, к-сть проводів у фазі -3) з ізоляторами типу ПС – 12Б (к-сть ізоляторів в гірлянді – 22) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 70, розміщеним по всій довжині ЛЕП.

На рисунках В.1, В.2 наведено графіки перенапруг на ізоляції під час удару блискавки в досліджувану опору. Аналізуючи графіки необхідно відзначити характерні особливості:

- Залежності напруг на ізоляції фаз під часу удару блискавки відрізняються кратністю перенапруг та характером залежності, внаслідок врахування миттєвого значення робочої напруги;
- Значення ВСХ відрізняються величиною внаслідок перерахунку ВСХ відповідно до реальних метеорологічних умов та стану ізоляції, що відображає реальний запас міцності ізоляції;

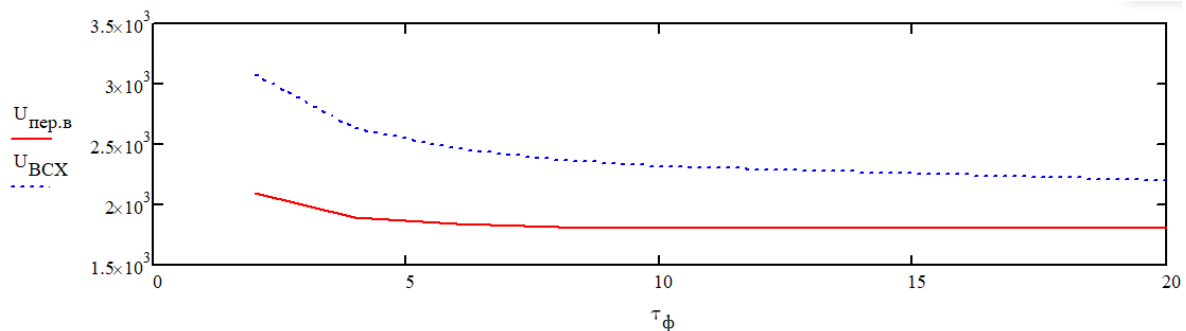


Рисунок В.1 Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 500 кВ, виконаних за методикою [1,2]

- Необхідно виконувати розрахунки перенапруг на ізоляції для 3 фаз, оскільки миттєве значення робочої напруги може викликати перекриття ізоляції середньої та нижньої фази;

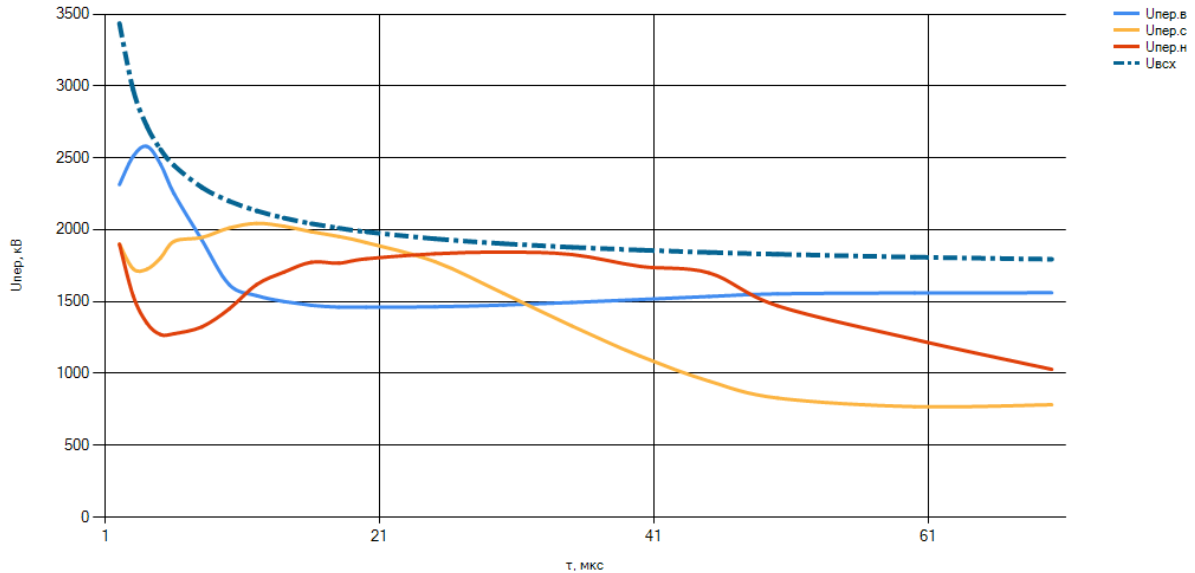


Рисунок В.2 Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 500 кВ виконаних за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

На рисунках В.3, В.4 наведено графіки КНП в абсолютних одиницях під час удару блискавки в досліджувану опору. КНП відрізняються величиною зони безпечих та небезпечних параметрів.

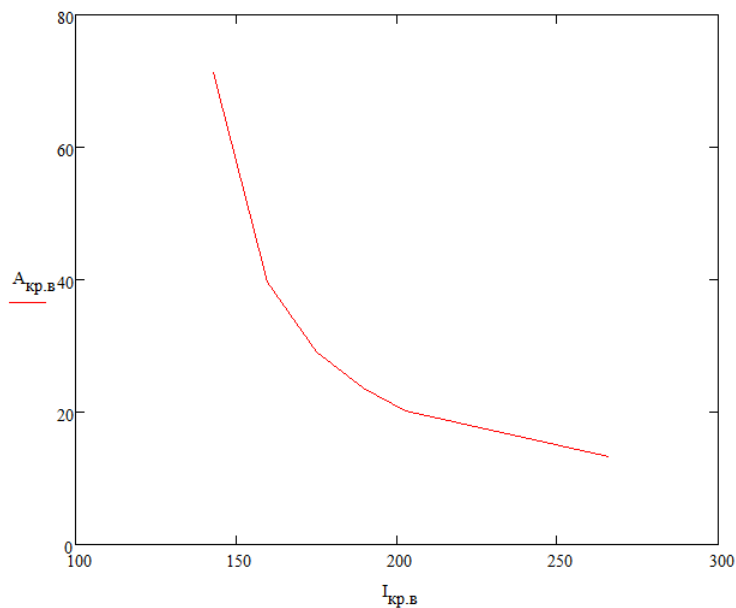


Рисунок В.3 КНП під час удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 500 кВ,
виконаних за методикою [1,2]

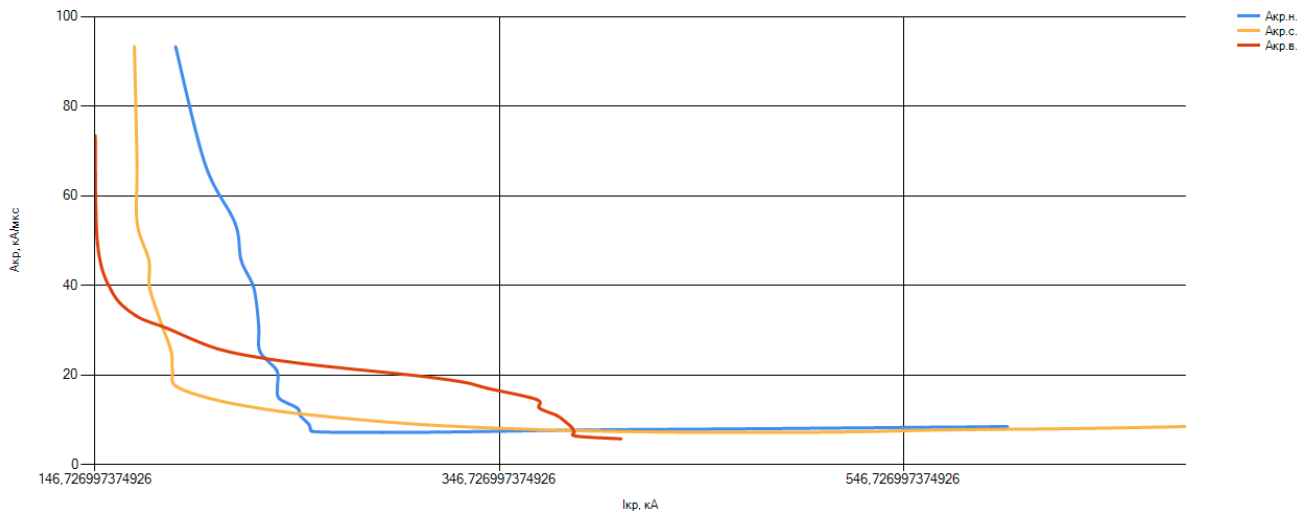


Рисунок В.4 КНП під час удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 500 кВ,
виконаних за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

На рисунках В.5, В.6 наведено графіки перенапруг на ізоляції під час удару блискавки в трос досліджуваної опори. Графіки перенапруг відрізняються кратністю перенапруг та характером залежностей.

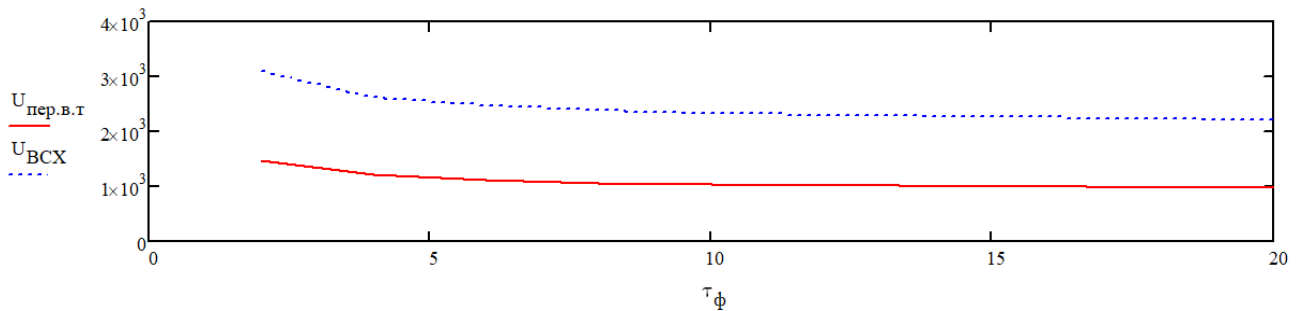


Рисунок В.5 Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос досліджуваної опори ЛЕП 500 кВ, виконаних за методикою [1,2]

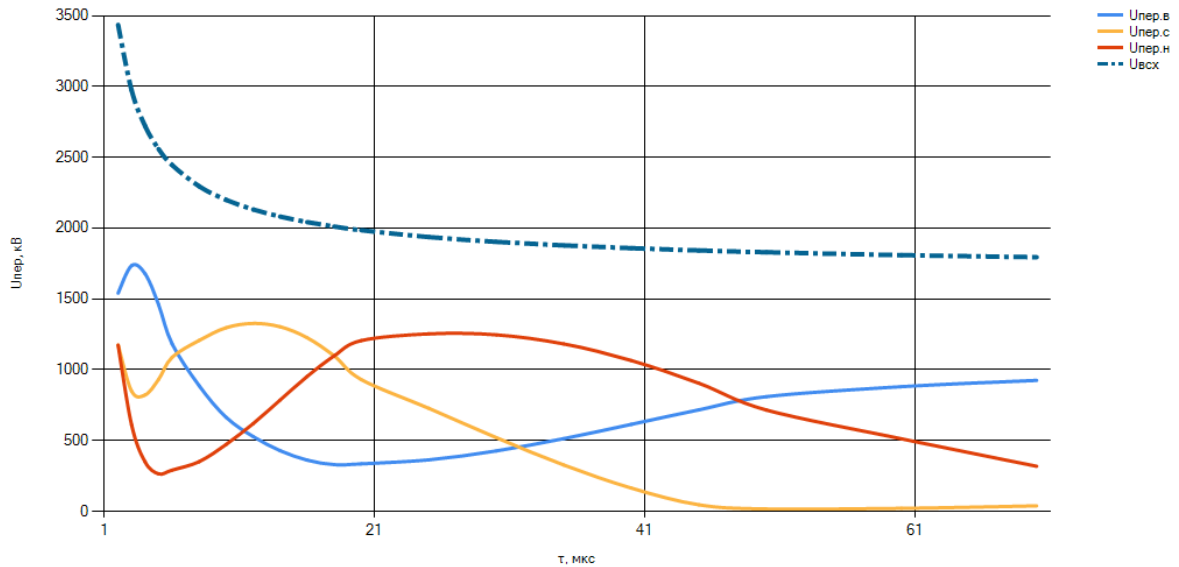


Рисунок В.6 Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос досліджуваної опори ЛЕП 500 кВ, виконаних за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

На рисунках В.7, В.8 наведено графіки КНП в абсолютних одиницях під час прориву тросового захисту досліджуваної опори. КНП відрізняються величиною зони безпечих та небезпечних параметрів.

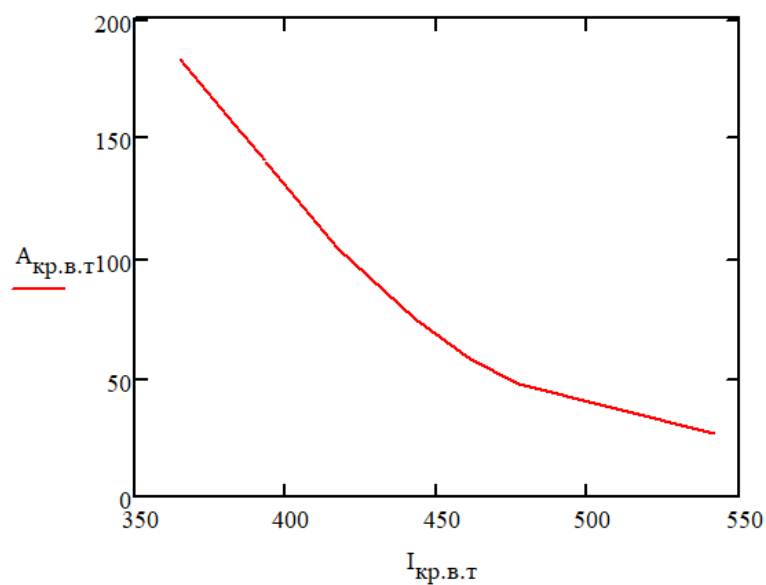


Рисунок В.7 КНП під час прориву тросового захисту досліджуваної опори ЛЕП 500 кВ виконаної за методикою [1,2]

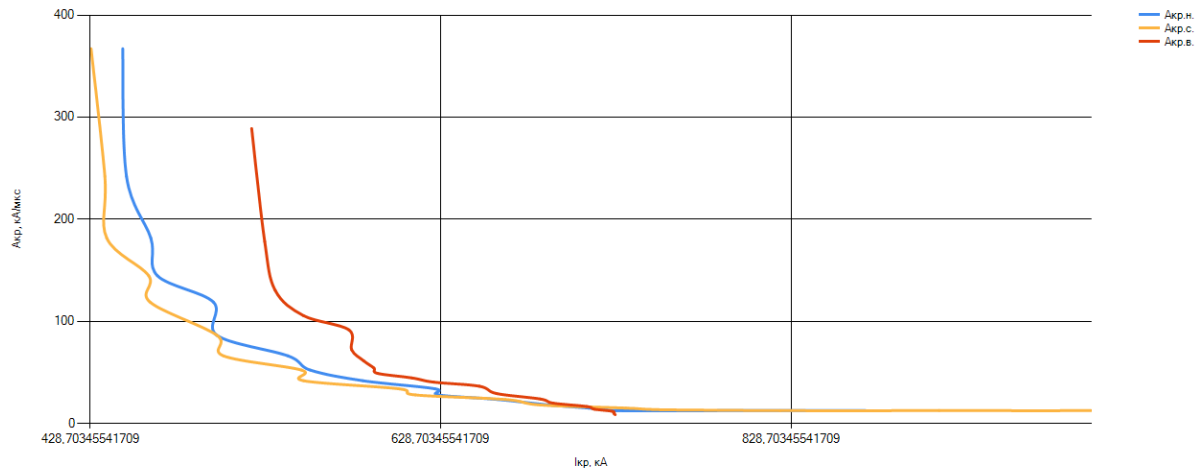


Рисунок В.8 КНП під час прориву тросового захисту досліджуваної опори ЛЕП 500 кВ виконаних за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

На рисунку В.9 наведено графіки перенапруг на ізоляції під час прориву тросового захисту досліджуваної опору виконаних, за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП». Методика [1,2] не передбачає можливості визначення перенапруг під час прориву тросового захисту.

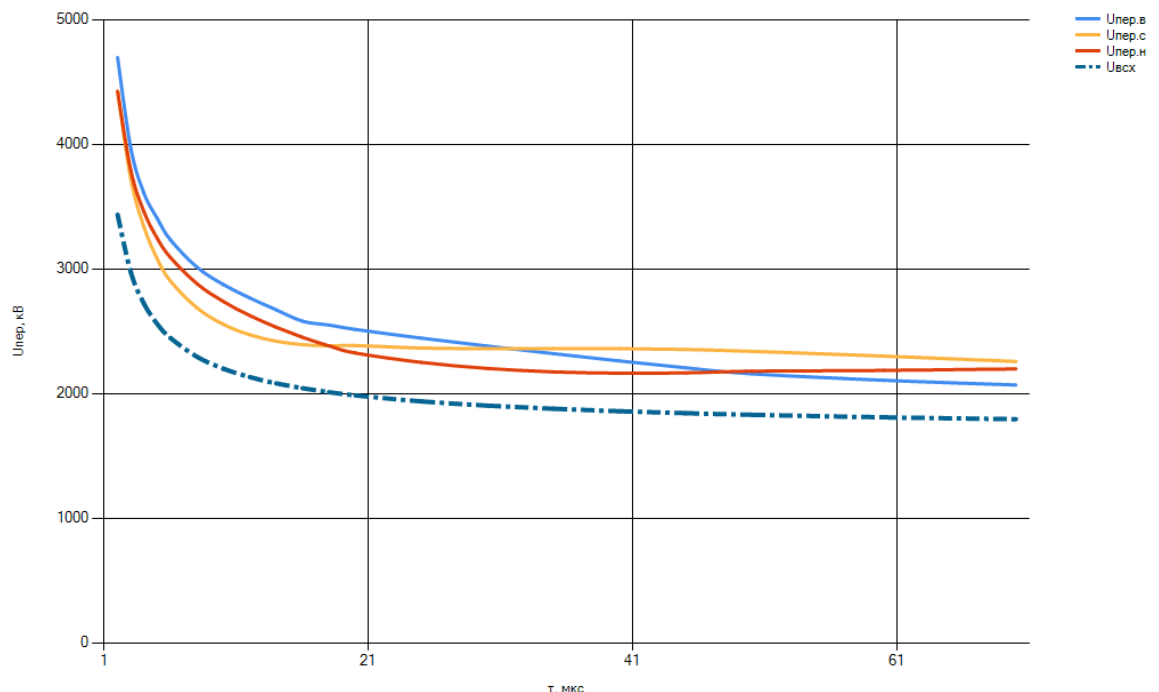


Рисунок В.9 Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву тросового захисту досліджуваної опори ЛЕП 500 кВ, виконаних за допомогою цифрового комплексу «ГЛЕП»

У таблиці В.1 наведено порівняння значень ймовірностей пошкодження ізоляції під час ударів блискавки та питомі показники пошкоджуваності ЛЕП.

Таблиця В.1 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Цифровий комплекс «ГЛЕП»			[1,2]
	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза	Верхня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к- сть	0,824	0,8463	0,813	-
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,15236	0,14963	0,15082	0,00242
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,0352	0,03107	0,035054	0,00001412
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896	0,638

Характерною особливістю є те, що ймовірності, розраховані цифровим комплексом «ГЛЕП» є більші ніж розраховані за [1,2]. Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП за [1,2] не розраховуються. Врахування випадкових факторів дозволяє точніше розрахувати надійність грозозахисту.

Додаток Г

Г. 1 Результати розрахунків надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – Львів південна

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувану опору ПЛ 220 кВ Стрий – Львів південна протяжністю 45,5 км. Середня висота місцевості, по якій проходить ЛЕП становить 296 м. ЛЕП проходить по території Львівської області (рисунок Г.1 а). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 86 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №130 типу ПБГ-4 (рисунок Г.1 б).

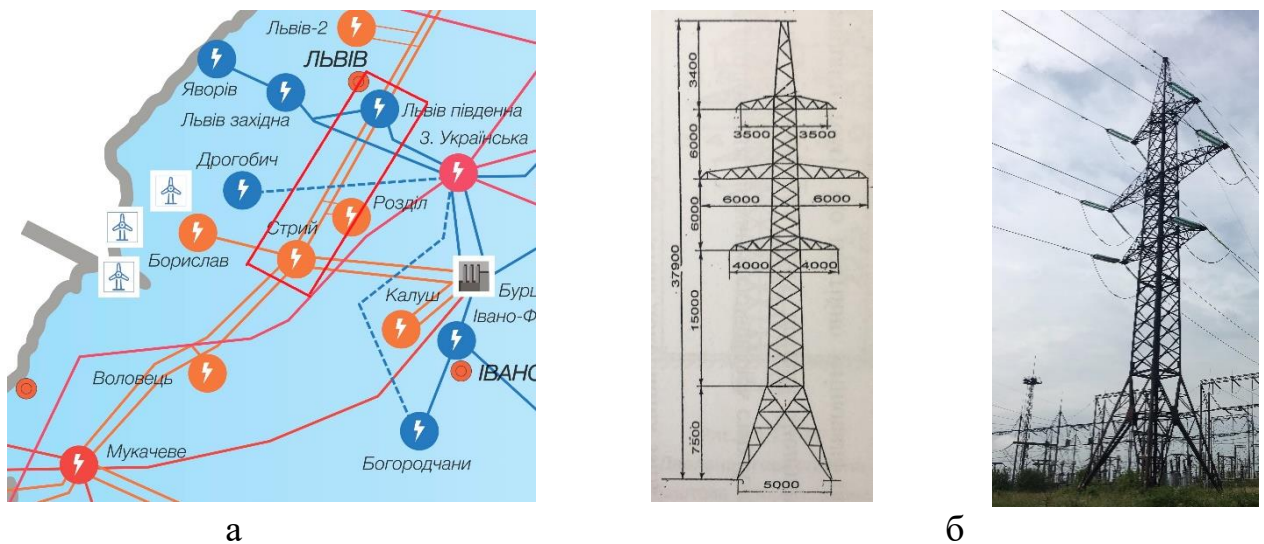


Рисунок Г.1 - Фрагмент схеми магістральних мереж ОЕС - а; ескіз проміжної опори типу ПБГ- 4 - б

ЛЕП виконана проводом марки АС 500/64 (к-сть кіл -2, к-сть проводів у фазі - 1) з ізоляторами типу ПС – 12А (к-сть ізоляторів в гірлянді – 18) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 70.

Для досліджуваної опори було проведено вимірювання опору заземлення опори (протокол №11/2017) та встановлено, що опір заземлення становить 21,5 Ом (значення опору перевищує норму 10 Ом, оскільки питомий опір ґрунту - 88 Ом·м).

Для досліджуваної опори розраховано напруги за удару блискавки в опору для поточного (рисунок Г.2) та нормованого опорів заземлення (рисунок Г.3).

Аналізуючи рисунок Г.2 бачимо, що можливе перекриття ізоляції під час удару блискавки в опору на верхній фазі за поточного значення опору заземлення, а також відсутність перекриття ізоляції за нормованого опору заземлення (рисунок Г.3).

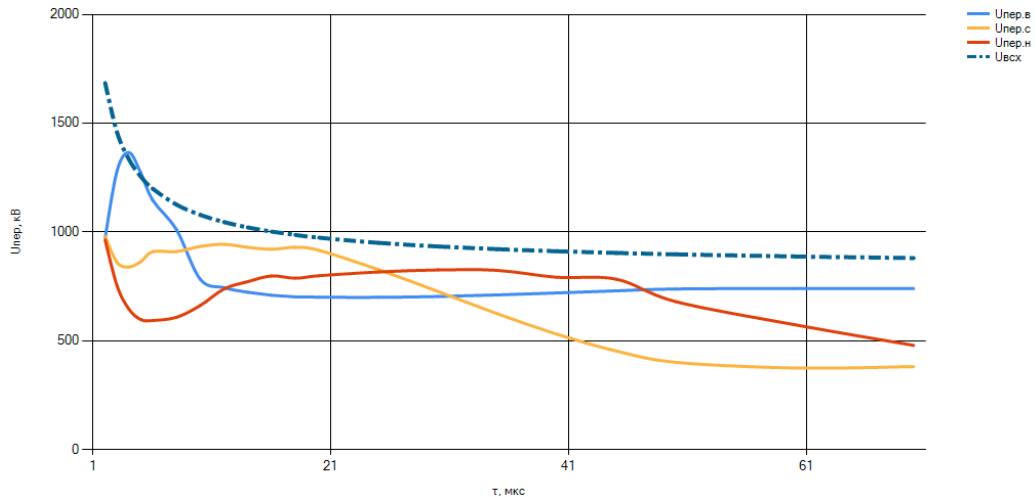


Рисунок Г.2 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №130 для поточного опору заземлення 220 кВ Стрий – Львів південна

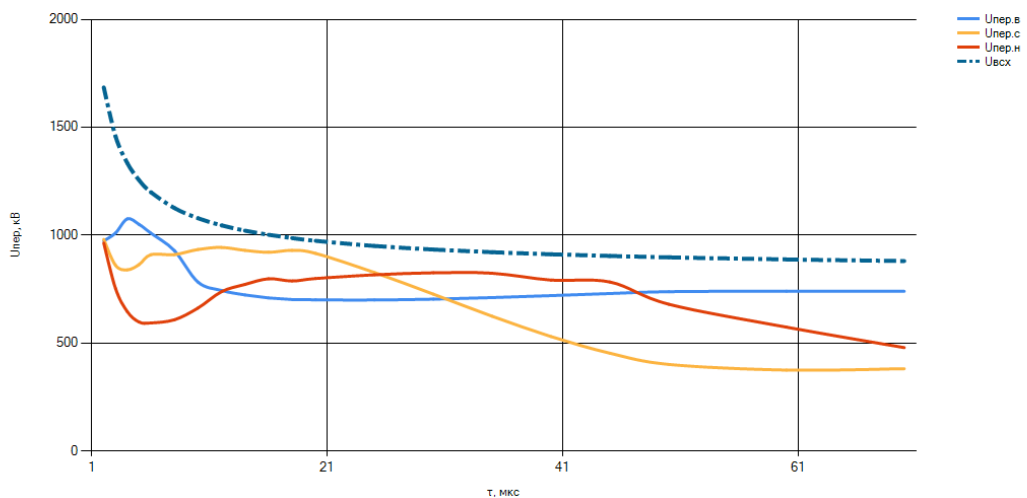


Рисунок Г.3 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №130 для нормованого опору заземлення 220 кВ Стрий – Львів південна

Також для даної лінії були побудовані графіки перенапруг під час удару блискавки в трос в середині прогону, а також прорив тросового захисту (рисунки Г.4, Г.5).

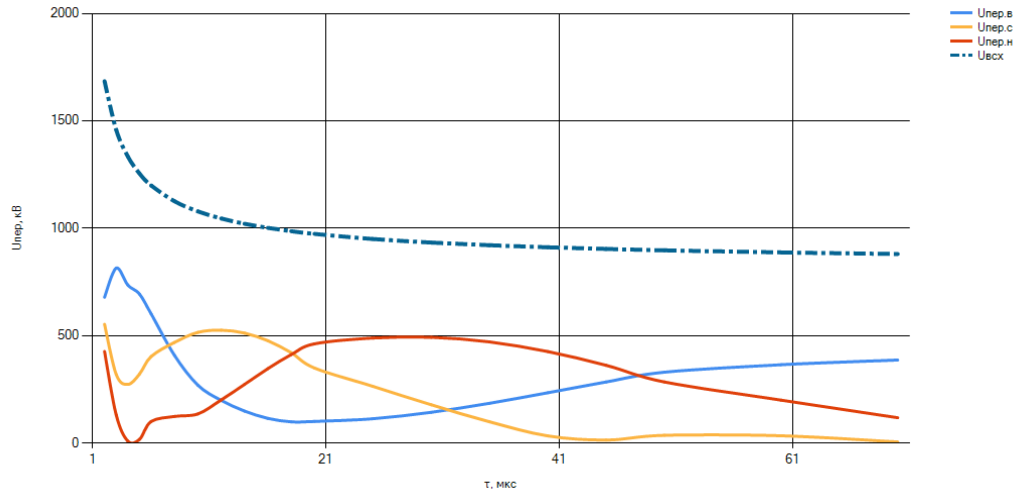


Рисунок Г.4 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос опори №130 ЛЕП 220 кВ Стрий – Львів південна

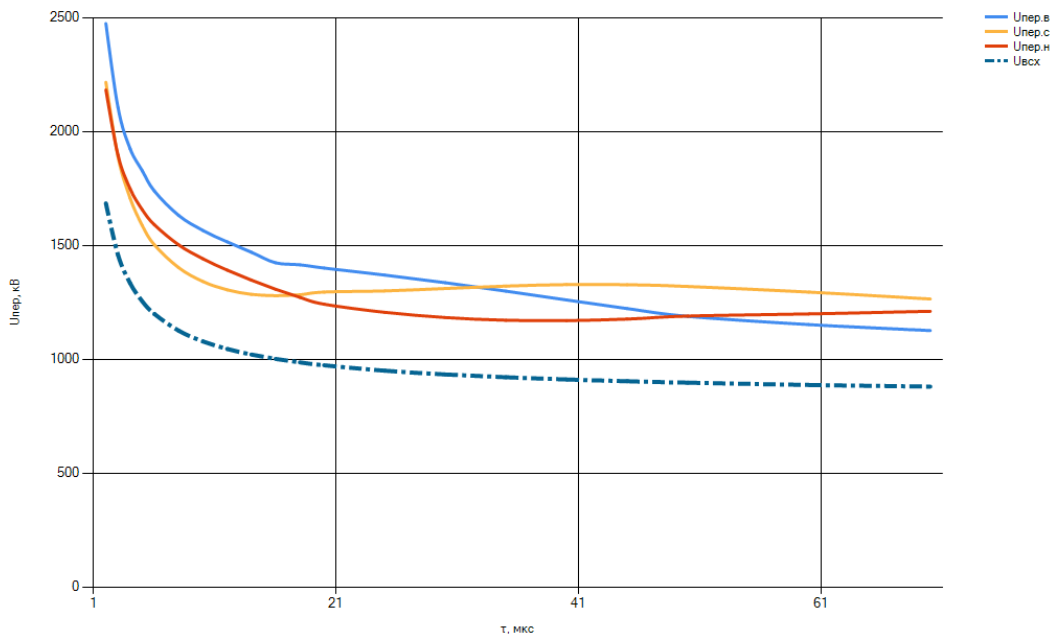


Рисунок Г.5 - Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву блискавки через тросовий захист опори №130 ЛЕП 220 кВ Стрий – Львів південна

Під час удару в трос (рисунок Г.4) перекриття ізоляції ЛЕП відсутнє, а під час прориву тросового захисту (рисунок Г.5) наявне перекриття ізоляції всіх трьох фаз. Також для досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз (таблиця Г.1), та побудовано КНП в абсолютних та ймовірнісних координатах (Додаток Б.3).

Таблиця Г.1 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть	7,421	6,6838	6,2786
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,120318	0,095011	0,097845
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,016752	0,014013	0,013887
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896

Г. 2 Результати розрахунків надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – Мукачево

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево протяжністю 80,4 км. Середня висота місцевості по якій проходить ЛЕП становить 130 м. ЛЕП проходить по території Львівської та Закарпатської областей (рисунок Г.6 а). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 95 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №186 типу ПБГ-4/4 (рисунок. Г.6 б).

ЛЕП виконана проводом марки АС 500/64 (к-сть кіл -2, к-сть проводів у фазі - 1) з ізоляторами типу ПС – 120 (к-сть ізоляторів в гірлянді – 16) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 70.

Для досліджуваної опори було проведено вимірювання опору заземлення опори (протокол №13/2009) та встановлено, що опір заземлення становить 14,58 Ом (значення опору перевищує норму 10 Ом, оскільки питомий опір ґрунту не перевищує 100 Ом·м).

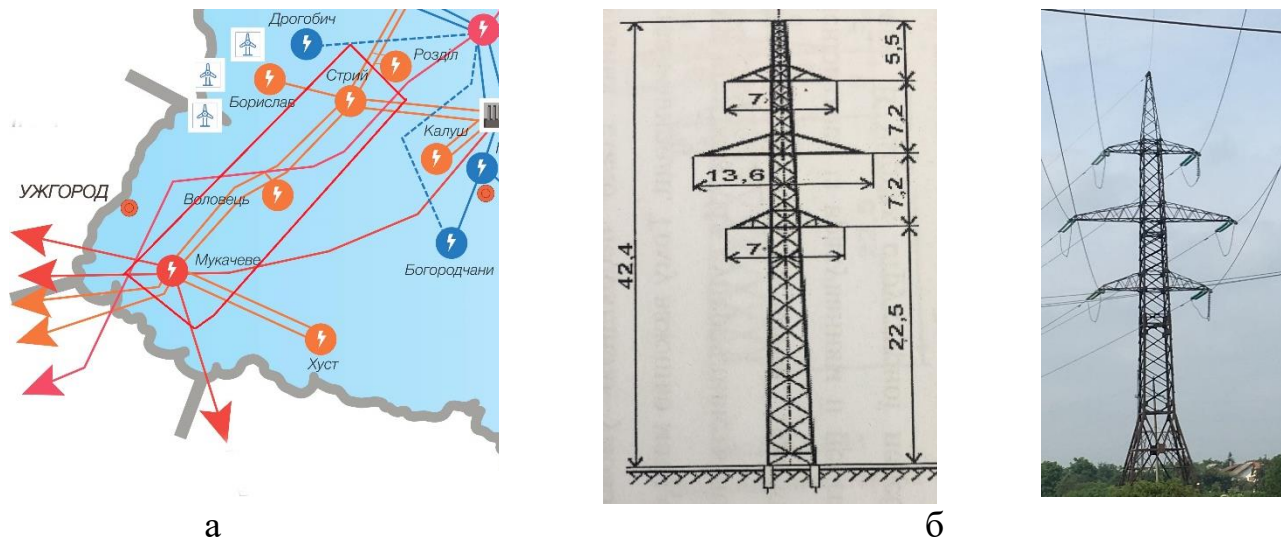


Рисунок Г.6 - Фрагмент схеми магістральних мереж ОЕС - а ; ескіз проміжної опори типу ПБГ- 4/4 - б

Для досліджуваної опори розраховано напруги за удару блискавки в опору для поточного (рисунок Г.7) та нормованого опорів заземлення (рисунок Г.8).

Аналізуючи рисунки Г.7 та Г.8, констатуємо відсутність перекриття ізоляції, проте за поточного значення опору заземлення наявні більші величини перенапруг ніж за нормованого.

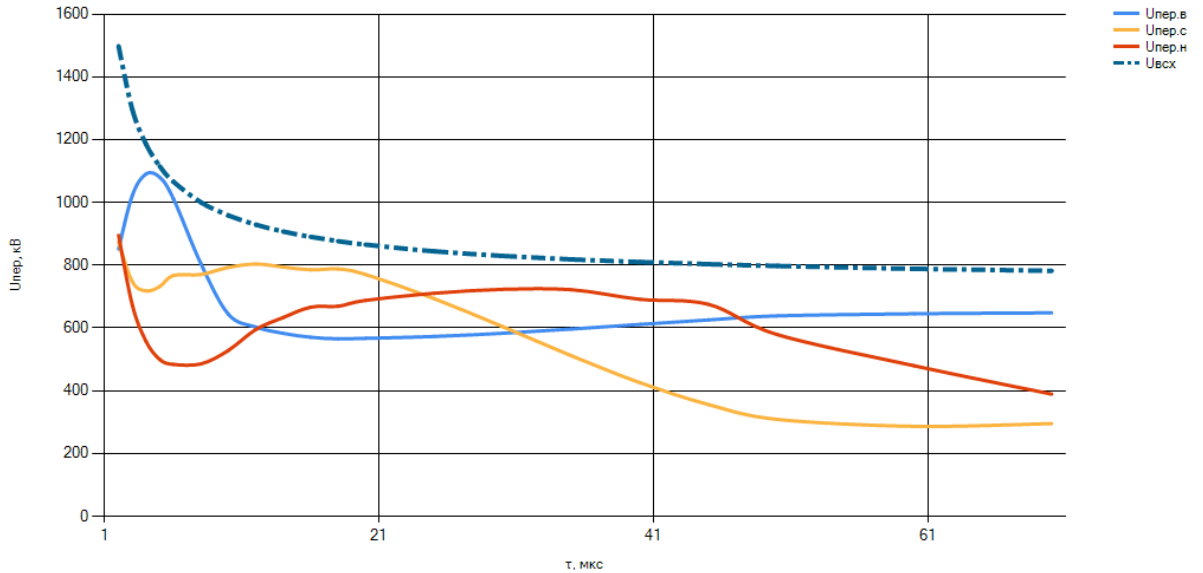


Рисунок Г.7 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №186 для поточного опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево

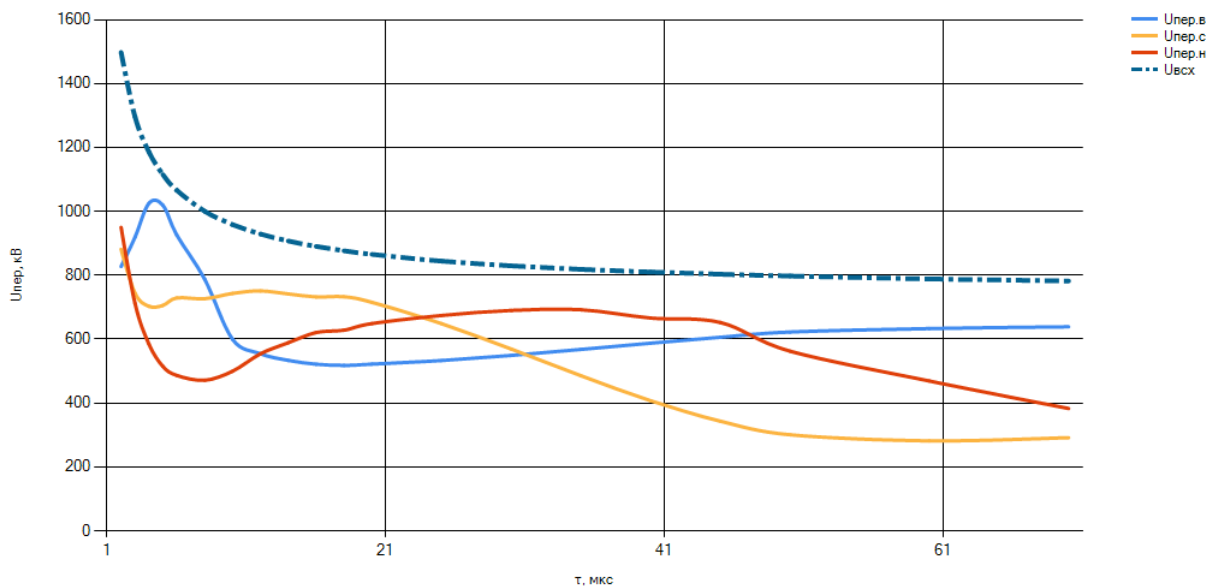


Рисунок Г.8 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №186 для нормованого опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачево

Для даної лінії були побудовані графіки перенапруг за удару блискавки в трос в середині прогону, а також за прориву тросового захисту (рисунки Г.9, Г.10).

Під час удару в трос (рисунок Г.9) перекриття ізоляції ЛЕП відсутнє, а під час прориву тросового захисту (рисунок Г.10) наявне перекриття ізоляції всіх трьох фаз.

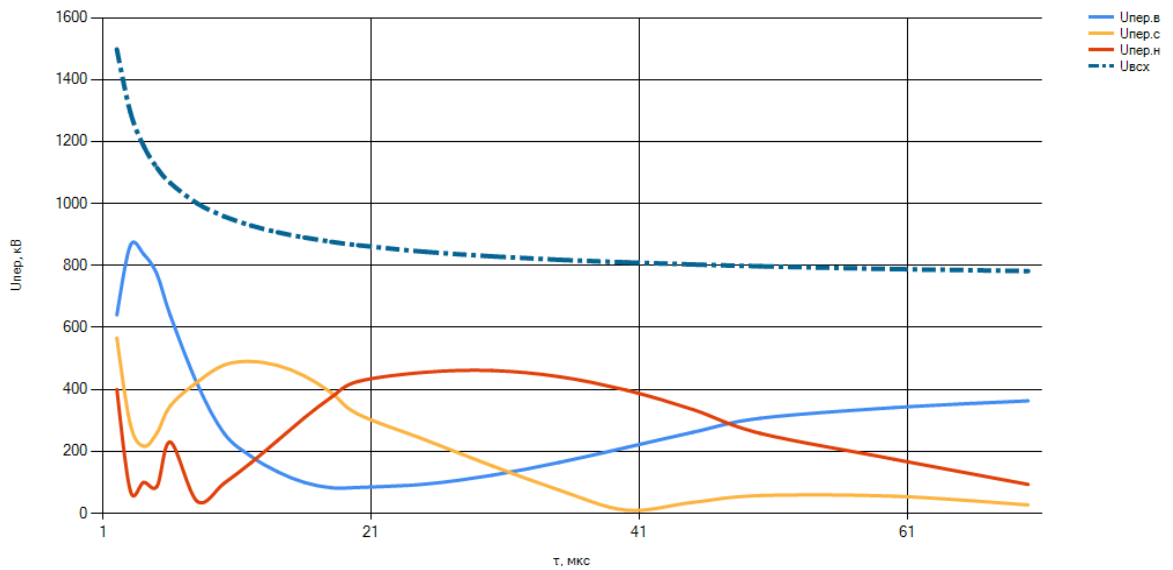


Рисунок Г.9 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос опори №186 ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво

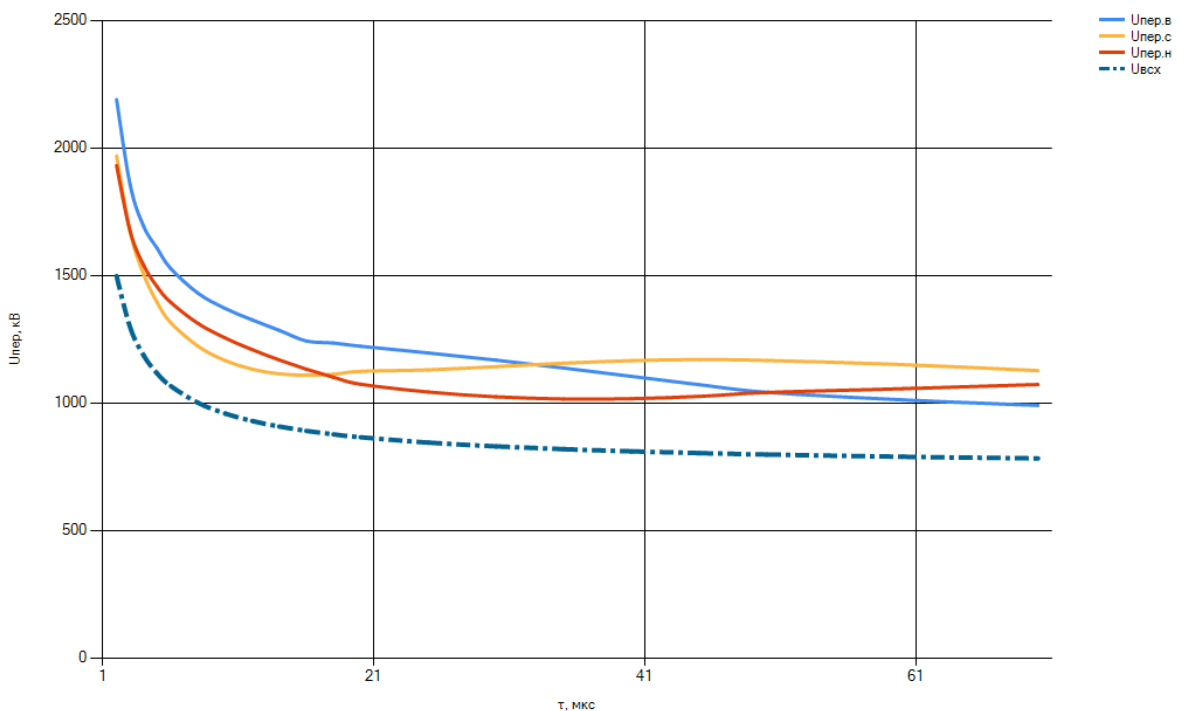


Рисунок Г.10 - Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву блискавки через тросовий захист опори №186 ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво

Для досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз (таблиця Г.2), та побудовано КНП в абсолютних і ймовірнісних координатах (Додаток Б.4).

Таблиця Г.2 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к -сть	10,6008	8,3285	5,7867
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,134195	0,096688	0,051145
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,015279	0,010768	0,008386
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896

Г. 3 Результати розрахунків надійності грозозахисту лінії 220 кВ Стрий – БуТЕС

Нижче наведено результати розрахунків напруг за удару блискавки в досліджувану опору ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС протяжністю 43,61 км. Середня висота місцевості, по якій проходить ЛЕП становить 237 м. ЛЕП проходить по території Львівської та Івано - Франківської областей (рисунок Г.11 а). Середньорічна температура змінюється в межах -40°C - $+35^{\circ}\text{C}$. Середньорічна тривалість гроз в регіоні становить 80 гроз. год. Досліджуємо проміжну металеву опору №85 типу П-26 (рисунок Г.11 б).

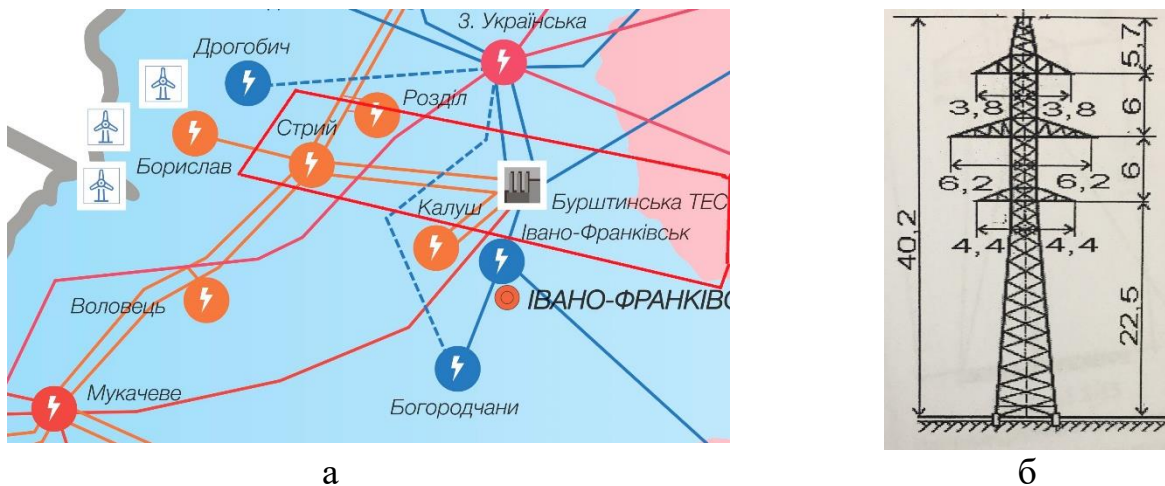


Рисунок Г.11 - Фрагмент схеми магістральних мереж ОЕС -а; б – ескіз проміжної опори типу П- 26 - б

ЛЕП виконана проводом марки АС 500/64 (к-сть кіл -2, к-сть проводів у фазі - 1) з ізоляторами типу ПС – 6Б (к-сть ізоляторів в гірлянді – 16) та оснащена грозозахисним тросом марки С – 70.

Для досліджуваної опори було проведено вимірювання опору заземлення опори (протокол №4/2009) та встановлено, що опір заземлення становить 13 Ом (значення опору перевищує норму 10 Ом, оскільки питомий опір ґрунту не перевищує 100 Ом·м).

Для досліджуваної опори було проведено розрахунки перенапруг під час удару блискавки в опору для поточного (рисунок Г.12) та нормованого опору заземлення (рисунок Г.13).

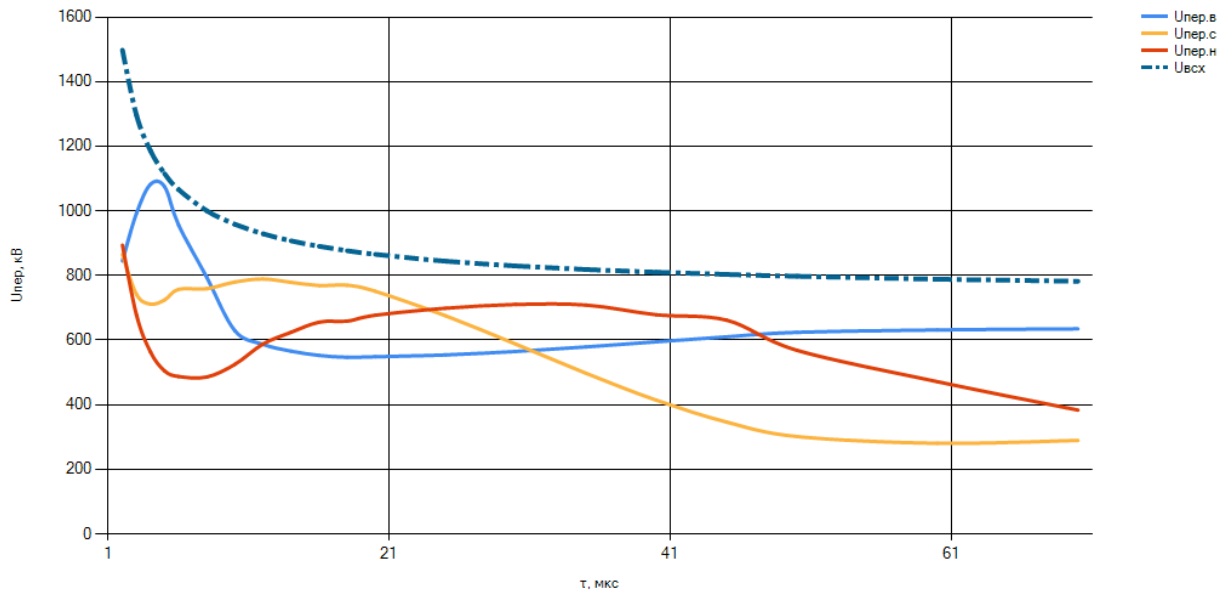


Рисунок Г.12 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опорі №85 для поточного опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС

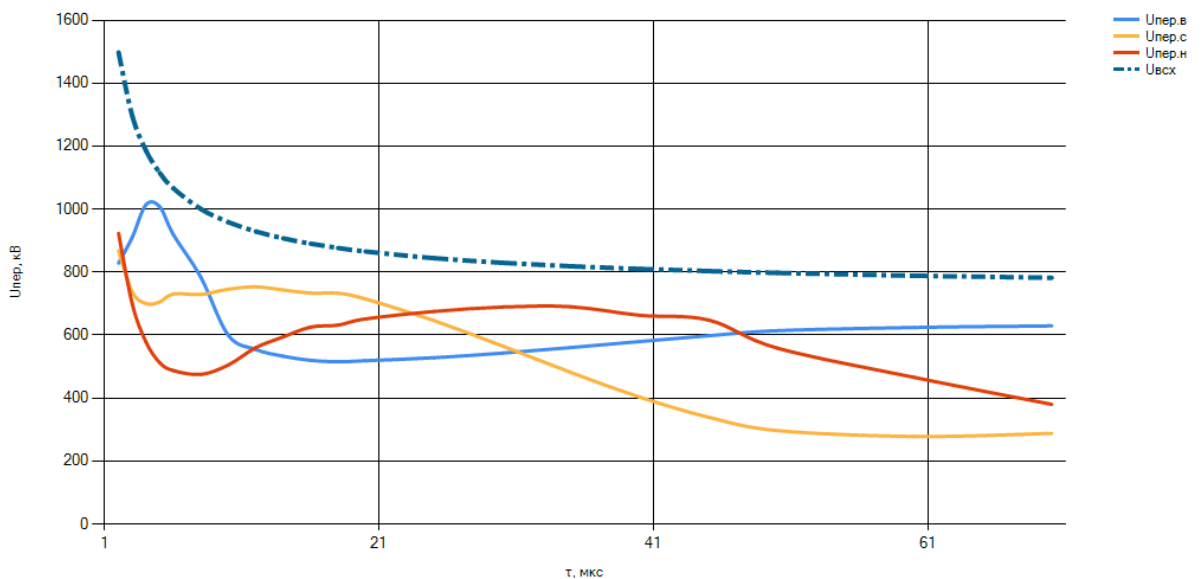


Рисунок Г.13 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опорі №85 для нормованого опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС

Аналізуючи рисунок Г.12 та Г.13 констатуємо відсутність перекрыття ізоляції, проте для поточного значення опору заземлення наявні більші величини перенапруг ніж для нормованого значення. Для даної лінії були побудовані графіки перенапруг під час удару блискавки в трос в середині прогону, а також для прориву тросового захисту (рисунок Г.14, Г.15).

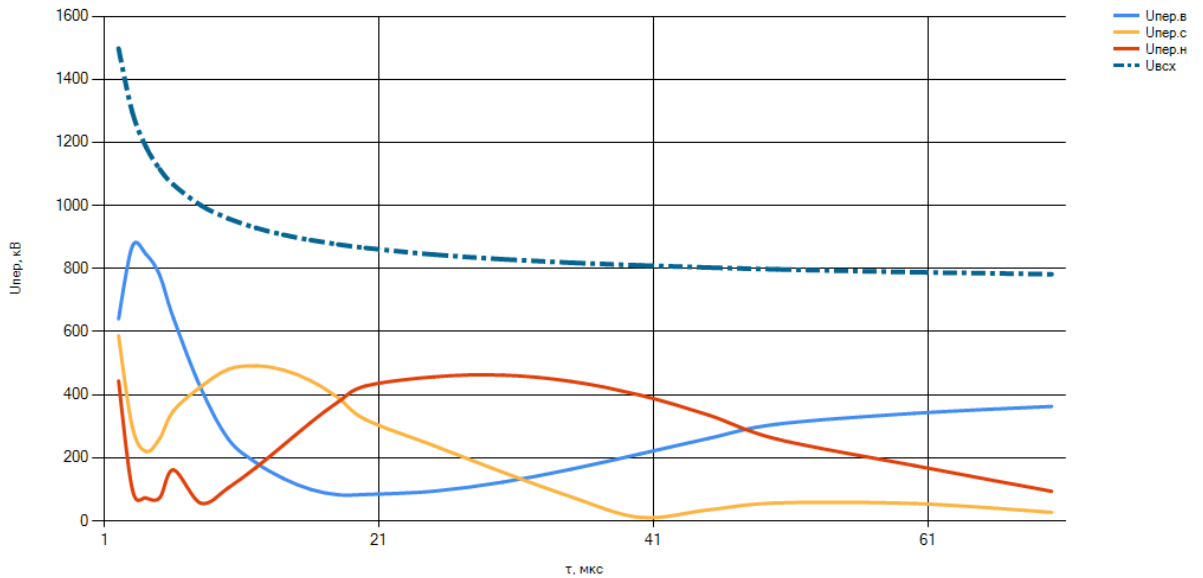


Рисунок Г.14 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в трос опори №85 ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС

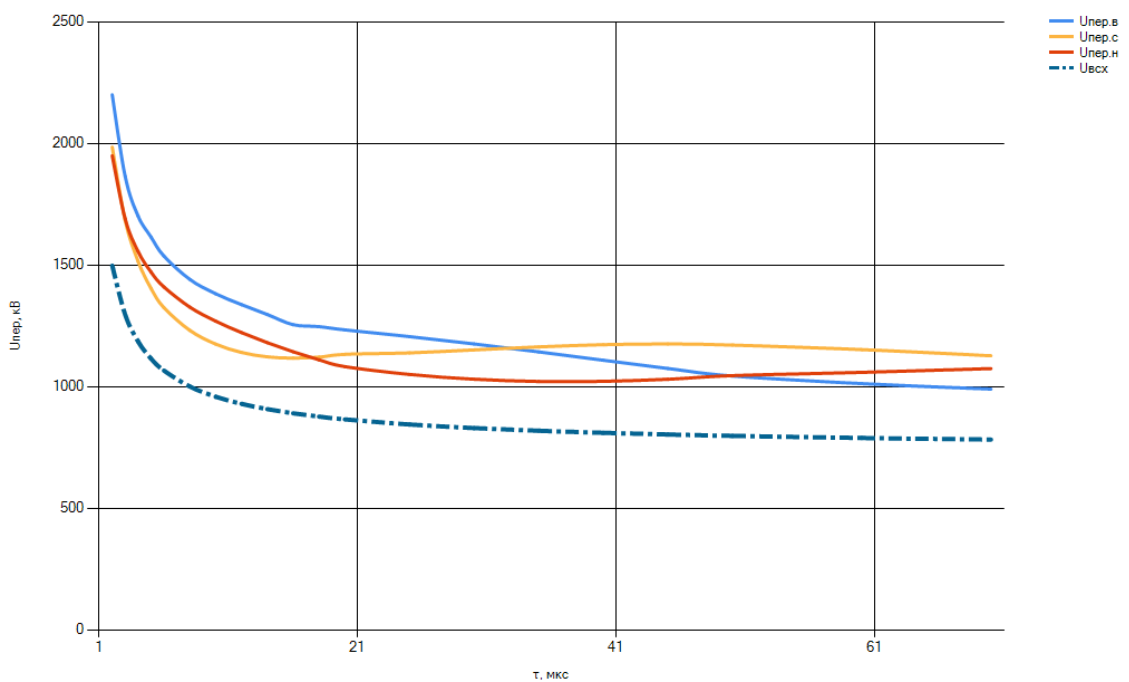


Рисунок Г.15 - Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву блискавки через тросовий захист опори №85 ЛЕП 220 кВ Стрий – БуТЕС

Під час удару в трос (рисунок Г.14) перекриття ізоляції ЛЕП відсутнє, а під час прориву тросового захисту (рисунок Г.15) наявне перекриття ізоляції всіх трьох фаз. Для досліджуваної лінії було розраховано показники пошкоджуваності ЛЕП та

ймовірності перекриття фаз (таблиця Г.3), та побудовано КНП в абсолютних і ймовірнісних координатах (рисунок Б.5).

Таблиця Г.3 Показники пошкоджуваності ЛЕП та ймовірності перекриття фаз

	Верхня фаза	Середня фаза	Нижня фаза
Питомі показники пошкоджуваності ЛЕП, к-сть	8,2344	6,6883	4,4361
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в опору	0,100463	0,074758	0,036474
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в трос	0,007421	0,005903	0,004475
Ймовірність пошкодження ізоляції під час удару в провід	0,97523	0,95236	0,93896

Додаток Д

Діагностика елементів ЛЕП, які впливають на надійність грозозахисту

Нижче наведено огляд основних рекомендацій та особливостей проведення діагностики елементів ЛЕП, що впливають на надійність грозозахисту. Рекомендації отримані з доступних джерел і планується використати їх в подальшому для проведення уточнених розрахунків цифровим комплексом надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів.

У [115,126-131,136] зазначено, що основним завданням діагностики грозозахисту є виявлення проблем, які можуть призвести до пошкодження або неправильної роботи систем захисту, вимірювання, управління та зв'язку, а також до ураження персоналу електричним струмом. На жаль, на даний момент експлуатаційний контроль систем блискавкозахисту не регламентують жодні нормативні документи, зокрема, наприклад, «Обсяг і норми випробування електроустановок». Однак, найчастіше за результатами діагностики виявляється, що грозозахист об'єктів енергетики не в повній мірі задовольняє вимоги нормативних документів [116].

Під час огляду і перевірки пристроїв блискавкозахисту в [117] рекомендується:

- ✓ візуально перевірити (за допомогою бінокля) цілісність тросового захисту, надійність з'єднання та кріплення до опори;
- ✓ виявити елементи пристроїв блискавкозахисту, які потребують заміни або ремонту внаслідок порушення їх механічної міцності;
- ✓ визначити ступінь руйнування корозією окремих елементів пристроїв блискавкозахисту, вжити заходів щодо антикорозійного захисту і посилення елементів, пошкоджених корозією;
- ✓ перевірити надійність електричних з'єднань між струмопровідними частинами всіх елементів пристроїв блискавкозахисту;
- ✓ уточнити схеми пристроїв блискавкозахисту і визначити шляхи розтікання струму блискавки по її елементах під час розряду блискавки

- методом імітації розряду блискавки за допомогою спеціалізованого вимірювального комплексу;
- ✓ виміряти значення опору розтікання імпульсного струму за допомогою спеціалізованого вимірювального комплексу;
 - ✓ виміряти значення імпульсних перенапруг під час удару блискавки, розподілу потенціалів по металоконструкціях і системі заземлення методом імітації удару блискавки за допомогою спеціалізованого вимірювального комплексу.

В [23] зазначено, що на даному етапі запропоновано ряд методів і систем для діагностики елементів ЛЕП, які мають вплив на надійність грозозахисту, проте вони, як правило, є трудомісткими, мають підвищену небезпеку і, крім того, вимагають вимкнення обладнання від напруги. Там же [23] описано високопродуктивний метод обстеження ЛЕП вертолітним патрулюванням (можливе застосування квадрокоптерів). За день роботи (5 – 6 год) оглядають до 200 км ліній. Застосування тепловізорів дозволяє набагато спростити процес контролю стану розрядників, встановлених на повітряних лініях 35, 110 кВ. На основі термограм можна визначати не тільки фазу розрядника з підвищеним струмом провідності, а й конкретний дефектний елемент, який вплинув на зростання цього струму. Своєчасна заміна і ремонт дефектних елементів дозволяє продовжити подальшу експлуатацію розрядників. Використання авіаційних інспекцій у міру розвитку технологій обстеження збільшується і в зарубіжних країнах. Наприклад, фірма TVA [23] працює над застосуванням під час авіаційних інспекцій інфрачервоних камер з високою роздільною здатністю на стабілізованій підвісці камери DayCor для виявлення корони на елементах ЛЕП в денний час, радара для виявлення гниючих дерев'яних опор тощо. Наявність корони на елементах ЛЕП свідчить про замикання, тріщини або забруднення ізоляторів, або обривах жил проводів. Під час корони виникає слабе ультрафіолетове випромінювання, яке не можна побачити в денний час. Камера DayCor завдяки фільтру, що пропускає тільки ультрафіолетове випромінювання в діапазоні довжин хвиль 240 - 280 нм, дозволяє виявити корону і в денний час.

Для оперативної діагностики стану опорно-стрижневих ізоляторів і кераміки високовольтних вводів використовується малогабаритний переносний вібродіагностичний прилад «Аякс-М» [23]. За допомогою приладу «Аякс-М» можна проводити діагностику стану опорної ізоляції та пошук дефектів наступних типів: наявність тріщин в кераміці ізолятора або місцях закладення кераміки в опорні башмаки; наявність пористості в кераміці ізолятора; визначення коефіцієнта технічного стану ізолятора. За підсумками діагностики визначаються категорії стану ізолятора - «вимагає заміни», «вимагає додаткового контролю» або «може експлуатуватися». Зареєстровані параметри стану ізолятора можуть бути записані в довготривалу пам'ять приладу і, в подальшому, в пам'ять комп'ютера для зберігання та обробки. За допомогою додаткової програми, можна проводити оцінку зміни параметрів ізолятора від вимірювання до вимірювання. За допомогою приладу може проводитися діагностика стану ізоляторів практично будь-якого типу і марки.

Для оцінки стану вентиляльних розрядників використовуються наступні випробування [23]: вимірювання опору; вимірювання струму провідності за випрямленої напруги; вимірювання пробивної напруги; тепловізійний контроль.

Для оцінки стану обмежувачів перенапруг використовуються наступні випробування [23]: вимірювання опору; вимірювання струму провідності; тепловізійний контроль.

Діагностика проводів. Для визначення можливих проблемних місць на лініях електропередачі, що виникають через вібрації, використовується прилад для контролю та аналізу вібрації проводів ліній електропередачі. Прилад дозволяє оцінювати на місці в реальних погодних умовах характеристики вібрації ліній електропередачі різної конструкції, натягом проводів і технічним забезпеченням, визначати номінальний термін служби проводів, що піддаються вібрації. Прилад являє собою вібраційний інструмент, який використовується на місці для контролю та аналізу вібрації проводів повітряних ліній електропередач під дією вітру. Він вимірює частоти та амплітуди всіх циклів вібрації, зберігає дані в матриці з високою

чіткістю та обробляє результати для забезпечення оцінки середньої тривалості терміну служби.

Дефектоскопія проводів і грозозахисних тросів ЛЕП. Надійність ЛЕП залежить від міцності сталевих канатів, що використовуються в якості струмопровідних, несучих елементів в комбінованих проводах, грозозахисних тросах, відтяжках. Контроль технічного стану ЛЕП та її елементів ґрунтується на порівнянні виявлених дефектів з вимогами норм і допусками, наведеними в проектних матеріалах досліджуваної ЛЕП, та нормативних документах. Стан проводів і тросів зазвичай оцінюється під час візуального огляду. Однак такий метод не дозволяє виявляти обриви всередині проводів. Для достовірної оцінки стану проводів і тросів ЛЕП необхідно застосовувати неруйнуючий інструментальний метод за допомогою дефектоскопа, який дозволяє визначити як втрату їх перетину, так і внутрішні обриви дротів.

Додаток Е

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



АКТ


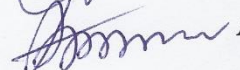
використання дисертаційної роботи аспіранта Т. Бінкевича «Надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропередачі з врахуванням впливу випадкових факторів»

Комісія в складі керівника групи з діагностики електрообладнання ВДЗП Західної електроенергетичної системи С. Ятчука та професора кафедри «Електроенергетика та системи управління» Національного університету «Львівська політехніка» А. Журахівського склали даний акт про наступне.

Цифровий комплекс «ГЛЕП» розроблений дисертантом Т. Бінкевичем та висвітлений в дисертаційній роботі може бути використаний для оцінки стану грозозахисту ліній електропередач, тим самим дасть змогу експлуатаційному персоналу Західної ЕС своєчасно виявляти «вузькі місця» стосовно грозозахисту ЛЕП та ефективніше впроваджувати заходи щодо підвищення надійності цих систем.

В даний час дисертантом Т. Бінкевичем сумісно з експлуатаційним персоналом підстанції «Стрий 220» проведено вимірювання опорів заземлення декількох опор ПС «Стрий 220» кВ та встановлено реальну картину деяких показників надійності (розрахункові напруги та ймовірність пошкодження ізоляції ліній, криві небезпечних параметрів тощо) ЛЕП, що підходять до даної підстанції.

В подальшому отримані в дисертаційній роботі результати планується використовувати під час експлуатації ліній електропередач Західної ЕС.

 С. Ятчук
 А. Журахівський



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»проф. Н. І. Чухрай
2018 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи «Надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів» аспіранта кафедри електроенергетики та систем управління Бінкевича Тараса Володимировича, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, при виконанні госпдоговору № 738 від 29.09.2017 р.

Ми, що нижче підписались, начальник НДЧ, к.т.н., доц. Жук Л. В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г. В.; заст. начальника планово-фінансового відділу Чулой Т. М. та завідувач кафедри електроенергетики та систем управління Сегеда М.С. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри електроенергетики та систем управління Бінкевича Т.В. використано під час виконання госпдоговору № 738 від 29.09.2017 р. «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації».

Бінкевичем Т.В. проведено критичний огляд існуючої технічної літератури стосовно предмету досліджень, встановлено можливі причини пошкоджень вимірних трансформаторів в електричних мережах, сформовано математичні моделі для розрахунку параметрів повітряної лінії електропередавання, складових перенапруг на ізоляції під час удару блискавки в опору та трос, рівнів перенапруг на підході до підстанції та проведено комп'ютерне моделювання з використанням інструментарію програмного комплексу «ГЛЕП» для дослідження надійності грозозахисту повітряної лінії електропередавання 110 кВ, сформульовані висновки та рекомендації за госпдоговором щодо підвищення надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання на підходах до підстанції.

Начальник НДЧ
к.т.н., доцент

Л. В. Жук

Члени комісії:
Зав. відділу НОСНД
к.т.н.

Г. В. Лазько

/ Заст. Начальника ПФВ

Т. М. Чулой

Завідувач кафедри ЕСУ
д.т.н., професор

М. С. Сегеда