

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**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»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Журахівський Анатолій Валентинович**,  
професор кафедри електроенергетики та  
систем управління  
Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Лежнюк Петро Дем'янович**,  
завідувач кафедри електричних станцій та систем  
Вінницького національного технічного університету

кандидат технічних наук, доцент  
**Саравас Вікторія Євгенівна**,  
завідувач кафедри електротехнічних комплексів та  
систем Приазовського державного технічного  
університету

Захист відбудеться «15» березня 2019 р. о 12 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка», 79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «30» січня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради, к. т. н., доцент



Коруд В. І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Для об'єднаних енергетичних систем несанкціоновані відключення, 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 електропересилання 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 електропересилання 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 аналізу та удосконалення існуючих пристроїв та систем захисту 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, які визначають грозостійкість об'єктів, а це негативно впливає на достовірності показників надійності та ускладнює оптимізацію схем грозозахисту тому проблему, досліджену в кваліфікаційній роботі, слід вважати актуальною.

Запропоновані математична модель та цифровий комплекс для розрахунків й оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропересилання 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 0115U004699, 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 урахуванням сукупності випадкових факторів.

4. Розроблення математичної моделі для розрахунків надійності грозозахисту, в якій враховано випадкові фактори, що 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 й основні положення, що виносяться на захист**

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

2. На основі статистичного аналізу випадків перекриття ізоляції окремих фаз повітряних ліній електропередачі 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 електропередачі, з врахуванням 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 врахуванням 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 електропересилання та презентація розробленої математичної моделі, яка враховує випадкові фактори, що впливають на грозостійкість повітряної лінії електропересилання; [2,7] – проведення аналізу існуючих методів та засобів грозозахисту повітряних ліній електропересилання 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 електропересилання класів напруги 110-750 кВ; [14] - дослідження впливу конструктивних параметрів повітряної лінії електропересилання на показники надійності грозозахисту; [15] - дослідження впливу стану ізоляції на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися на VI і VII Міжнародних молодіжних наукових форумах “Litteris et Artibus”: конференції ЕРЕС-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 (Scopus); 4 тез доповідей у збірниках наукових конференцій; 7 матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та 6 додатків. Обсяг дисертації складає 218 сторінок, із них: 102 рисунки, 15 таблиць, а також 6 додатків на 45 сторінках, 139 назв використаної літератури на 16 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, на основі яких визначено предмет, об’єкт та методи дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, дані про зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, апробацію результатів дисертації, кількість публікацій за матеріалами дисертації, особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах, структуру та об’єм дисертації.

**У першому розділі** розглянуто публікації з результатами досліджень статистичних та амплітудно – часових характеристик, ймовірнісних показників розряду блискавки. Проведено аналіз нових існуючих зарубіжних і вітчизняних систем грозозахисту повітряних ліній електропереєсилання у сучасних мережах 6-750 кВ. Розглянуто відомі конструкції, технічні характеристики та особливості роботи пристроїв грозозахисту

Внаслідок електромагнітної індукції близький удар блискавки створює індуковану перенапругу, котра зазвичай призводить до збільшення напруги на ізоляції. Удари блискавки, як правило, відбуваються за дії робочої напруги лінії, що призводить до коротких замикань та вимкнення пошкодженої ЛЕП. 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.

Спостережувані та реєстровані чисельні параметри блискавки носять імовірнісний характер і відтворюють їх переважно в табличному або графічному видах, які наведено в роботі.

У розділі критично проаналізовані пропоновані моделі та засоби грозозахисту ЛЕП 6-35 кВ. Основними недоліками відомих засобів грозозахисту, на наш погляд, є: відносна складність конструкції (порівняно з ОПН, ІІІ тощо) РДІ та мультикамерних розрядників (велика кількість отворів, електродів, розрядних проміжків тощо, на які впливає навколишнє середовище); застосування в якості

ізоляції силіконової гуми в мультикамерних розрядниках (очевидно, це 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); мультикамерна система допускає об'єднання окремих розрядів, що відбуваються між суміжними електродами, в єдиний канал (а це негативно позначається на електрообладнанні лінії електропересилання, а також знижується термін експлуатації самого ізолятора); випробування та досвід експлуатації підтверджують, що не завжди РДІ - П може захистити ізоляцію на сусідніх опорах, тобто на наступних двох опорах, де він не встановлений на цій фазі.

У розділі критично проаналізовані пропоновані моделі та засоби грозозахисту ЛЕП 110-755 кВ. Основними недоліками відомих засобів грозозахисту, на наш погляд, є: випадки прориву блискавки на проводи є визначальними в сумарному числі небезпечних уражень ЛЕП 330 кВ, тому необхідно вдосконалювати конфігурацію тросового захисту; забезпечення нормованого опору заземлення традиційними методами не завжди є можливим (особливо в гірських умовах); застосування АПВ, як методу грозозахисту ускладнює експлуатацію вимикачів, які вимагають при цьому позачергової ревізії.

Таким чином, наявні засоби грозозахисту, як правило, забезпечують певну грозостійкість, але проблема аналізу та удосконалення існуючих систем захисту залишається актуальною.

У другому розділі проведено аналіз та систематизацію випадкових факторів, які впливають на надійність та ефективність грозозахисту ЛЕП (рис. 1).

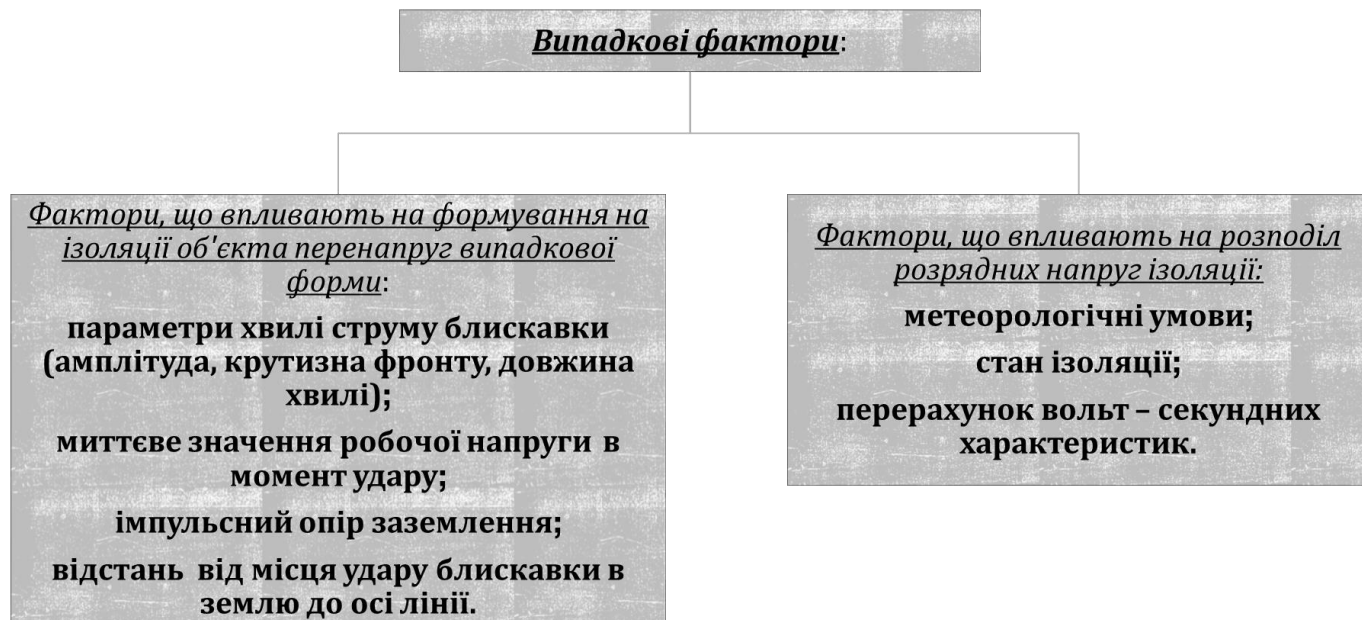


Рисунок 1 – Систематизація випадкових факторів, які впливають на надійність грозозахисту

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

Розглянемо спосіб визначення області  $D$  для випадку, коли ізоляція характеризується допустимим рівнем впливу  $u_{oon}$ . Зафіксувавши значення розрядної напруги ізоляції величиною  $u_{oon}$ , ми тим самим розподіл випадкових факторів  $\vec{x}$  замінюємо їх математичним сподіванням. Тому ймовірність  $P$  імпульсного розряду зводиться до вигляду:

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

Чисельне інтегрування виразу (1) пропонуємо здійснювати за елементами  $\Delta\vec{x}$  простору  $\vec{x}$ , що належить області небезпечних параметрів. Очевидно, що кожному елементу простору відповідає певне значення вектора  $\vec{x}$ . Для виявлення приналежності розглянутого елемента до області небезпечних параметрів необхідно для заданого поєднання координат вектора  $\vec{x}$  обчислити значення напруги  $u$  на ізоляції і порівняти його з  $u_{oon}$ . Умова  $u \geq u_{oon}$  є ознакою приналежності розглянутого елемента до області небезпечних параметрів.

З метою здійснення чисельного інтегрування вираз (1) представимо у вигляді:

$$P = \sum_{x_m} \Delta F(x_m) \cdot \sum_{x_{m-1}} \Delta F(x_{m-1}) \dots \sum_{x_2} \Delta F(x_2) \cdot \sum_{x_1} \Delta F(x_1) = \prod_{k=1}^m \sum_{x_k} \Delta F(x_k), \quad (2)$$

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.

Оскільки процес інтегрування поширюється тільки на область  $D$ , то після досягнення її межі, тобто умови  $u = u_{oon}$ , слід відновити початкове значення першого фактора, змінити на  $\Delta x_2$  значення другого і знову варіювати по першому фактору до повторного досягнення умови  $u = u_{oon}$ . Пройшовши таким чином весь або частину діапазону зміни другого чинника, слід змінити на  $\Delta x_3$  значення третього і т.д. Отже, ознакою межі області  $D$ , а також ознакою необхідності зміни на величину  $\Delta x_{k+1}$  фактора  $x_{k+1}$  і відновлення початкового значення фактора  $x_k$  є досягнення умови  $u = u_{oon}$ .

Для раціональної побудови алгоритму розрахунку ймовірності необхідно в (2) врахувати  $P(u)$  - ймовірність порушення міцності ізоляції, за впливу напруги  $u$ ,



сформованої вектором випадкових факторів. У зв'язку з цим представимо формулу (2) у вигляді

$$P = \prod_{k=m}^n \sum_{x'_k} \Delta F(x'_k) \cdot \prod_{k=1}^m \sum_{x''_k} \Delta F(x''_k) = \prod_{k=1}^{n-m} \sum_{x'_k} \Delta F(x'_k) \cdot P(u). \quad (3)$$

В роботі проведено аналіз випадкових факторів, які визначають грозостійкість об'єкта. Параметри хвилі струму блискавки  $I, a, \tau$  є предметом багаторічних досліджень. У відомих публікаціях наведено узагальнені результати досліджень амплітуд і крутизи фронту хвиль струмів блискавки та рекомендується для практичних розрахунків користуватись експоненційними законами розподілу цих параметрів

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.

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  $u'_n(t)$ , яка буде більшою ніж відповідна напруга  $u_s(t)$ . 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  $\frac{m}{n}$ , де  $m$  – кількість інтервалів, для яких ймовірність перекриття ізоляції становить 1;  $n$  – загальна кількість інтервалів поділу. При цьому можна визначити також ймовірність перекриття ізоляції в кожній фазі окремо.

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

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

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.

Аналізуючи існуючі методики врахування метеорологічних умов, поправочні коефіцієнти та графіки залежностей необхідно зазначити суттєві недоліки та суперечності існуючих результатів досліджень.

Наведено метод врахування метеорологічних умов із використанням поправочних коефіцієнтів, а також визначено числові характеристики метеорологічних умов та виразів для їх визначення. Виконано розрахунки числових характеристик метеорологічних умов залежно від зміни висоти розташування ЛЕП.

Вольт-секундні характеристики широко використовуються для здійснення координації ізоляції високовольтного обладнання, тобто для захисту від впливу грозових і комутаційних перенапруг. 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 наведено відповідні теорії та методи.

**У третьому розділі** розглянуто створену математичну та цифрову моделі для аналізу та оцінки надійності систем грозозахисту ЛЕП з врахуванням випадкових факторів.

Проведено аналіз існуючих моделей ймовірнісної оцінки інтенсивності вимкнень повітряних ліній електропересилання, спричинених розрядами блискавки. 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 недосконалість показників надійності та ускладнює оптимізацію схем грозозахисту.

Наведено вплив конструктивних параметрів ЛЕП і природо – кліматичних умов та особливостей траси на показники її грозостійкості, отримані з доступних джерел та нормативних документів.

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

$$U_{iz}(t) = U_R(t) + U_{in.m}(t) + U_{in.e}(t) - U_{in.mp}(t) + U_{роб}(t) \geq U_i^+(t) \quad (4)$$

За удару блискавки в ЛЕП імпульсна напруга на ізоляції складається з: складової, викликаной спадом напруги на опорі заземлення опори; магнітної складової індукованої напруги, що створюється струмом в опорі та струмом в каналі блискавки; електричної складової індукованої напруги; складовою напруги, індукованою в проводі струмом в тросі; миттєвим значенням 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 (рис. 2).

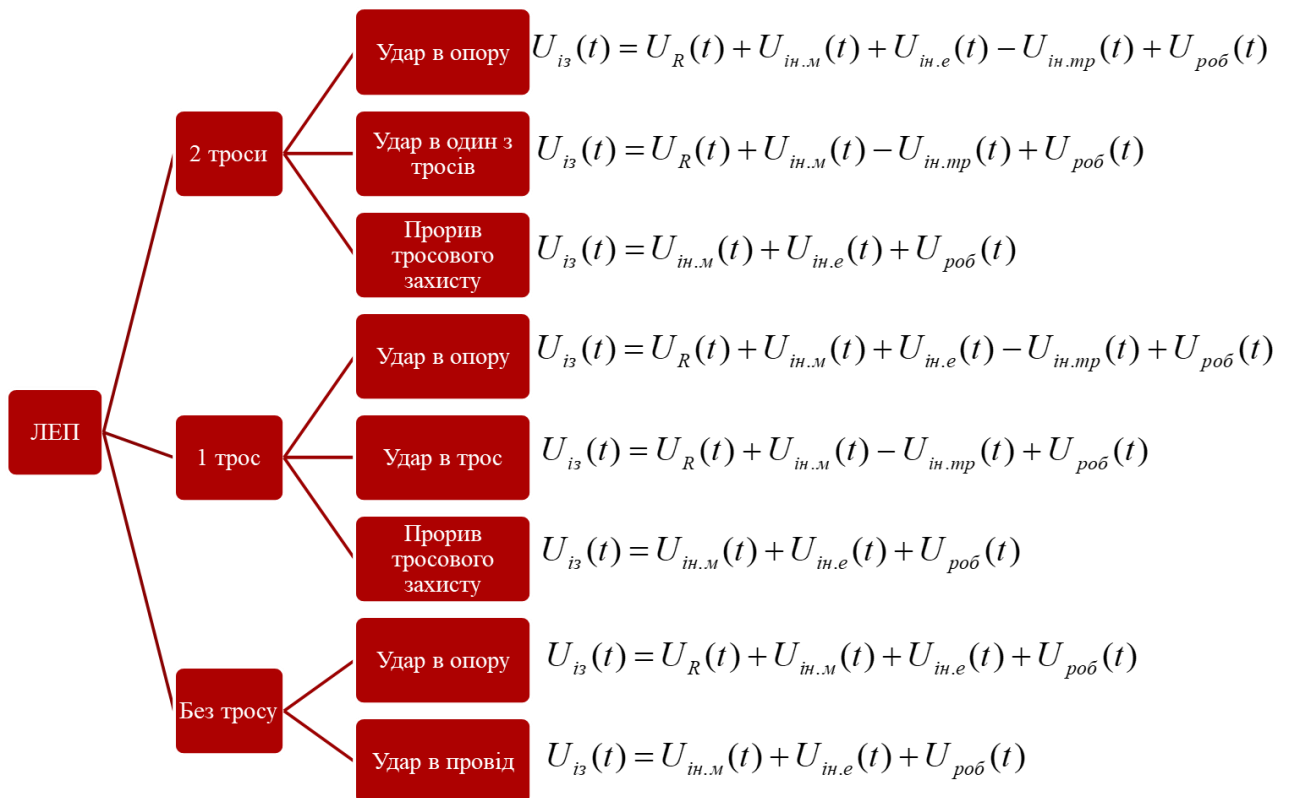


Рисунок 2 – Складові перенапруг на ізоляції залежно від конструкції опори та розрахункових випадків грозових уражень ЛЕП

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

$$P = \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_A \Delta F(A) \cdot \sum_{\tau_\phi} \Delta F(\tau_\phi) \cdot \sum_{R_{имн}} \Delta F(R_{имн}) \cdot \sum_R \Delta F(R) \times \\ \times \sum_{u_0} \Delta F(u_0) \cdot \sum_{u_p} \Delta F(u_p) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot P\left(\bar{u}(t)\right) \quad (5)$$

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;

$\Delta F(R_{imm})$  - 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.

Використовуючи можливості сучасної комп'ютерної техніки, математична модель 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.

Умовно структурну схему цифрового комплексу (рис. 3), можна розділити 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 криві небезпечних перенапру в абсолютних та відносних координатах, а також показники надійності грозозахисту ЛЕП.

Програму цифрового комплексу оцінки надійності грозозахисту повітряних ліній електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів (далі «ГЛЕП») 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.

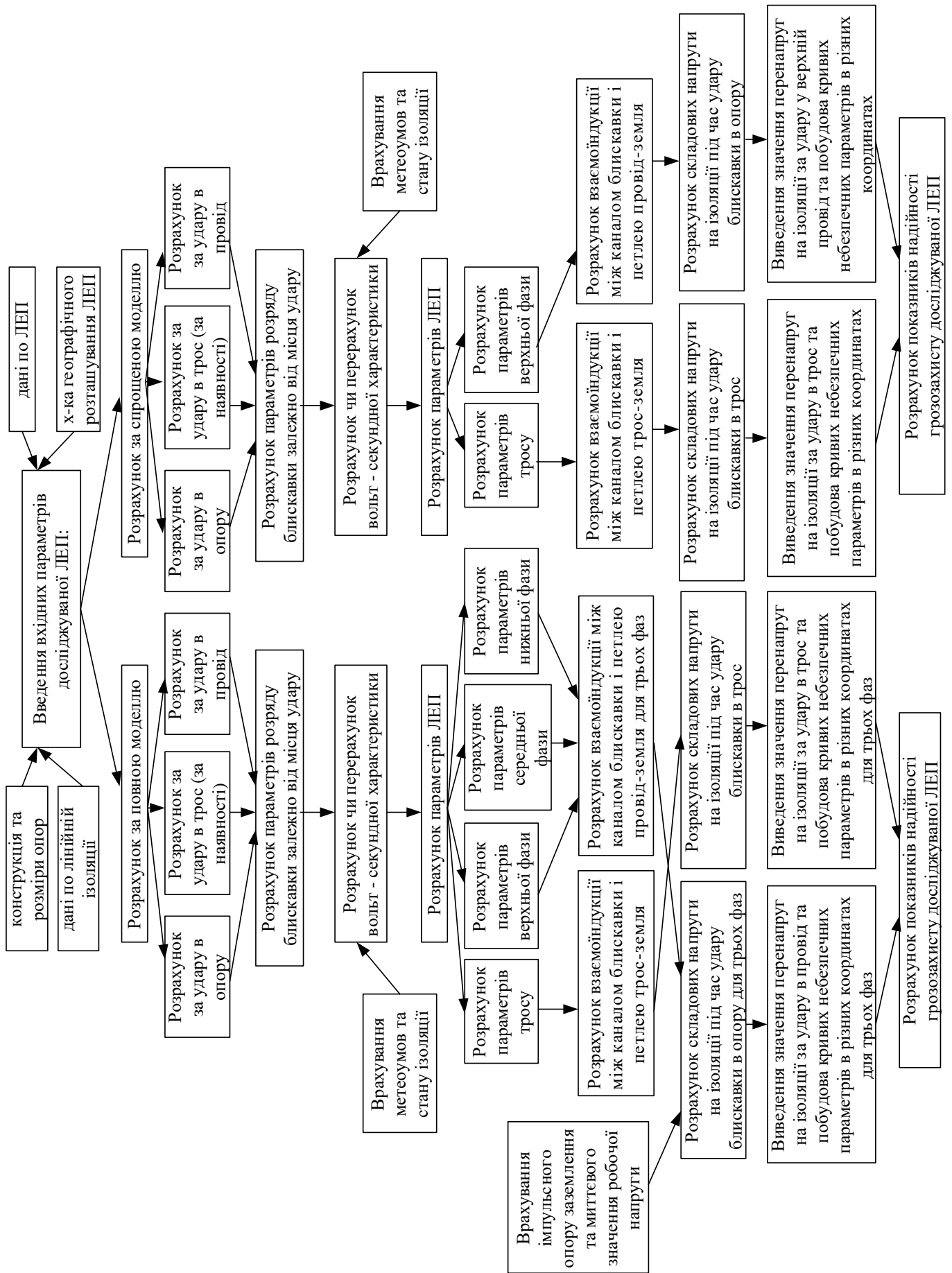


Рисунок 3 – Структурна схема цифрового комплексу «ГЛЕП»

Після запуску цифрового комплексу для розрахунку перед користувачем відкривається головне вікно програми (рис. 4), яке містить інформаційні вкладки та кнопки вибору типу розрахунку. Результатами розрахунку «ГЛЕП» є: розрахункові напруги на ізоляції, КНП в абсолютних та ймовірнісних координатах для розрахункових випадків, а також показники надійності грозозахисту ЛЕП (рис. 5).

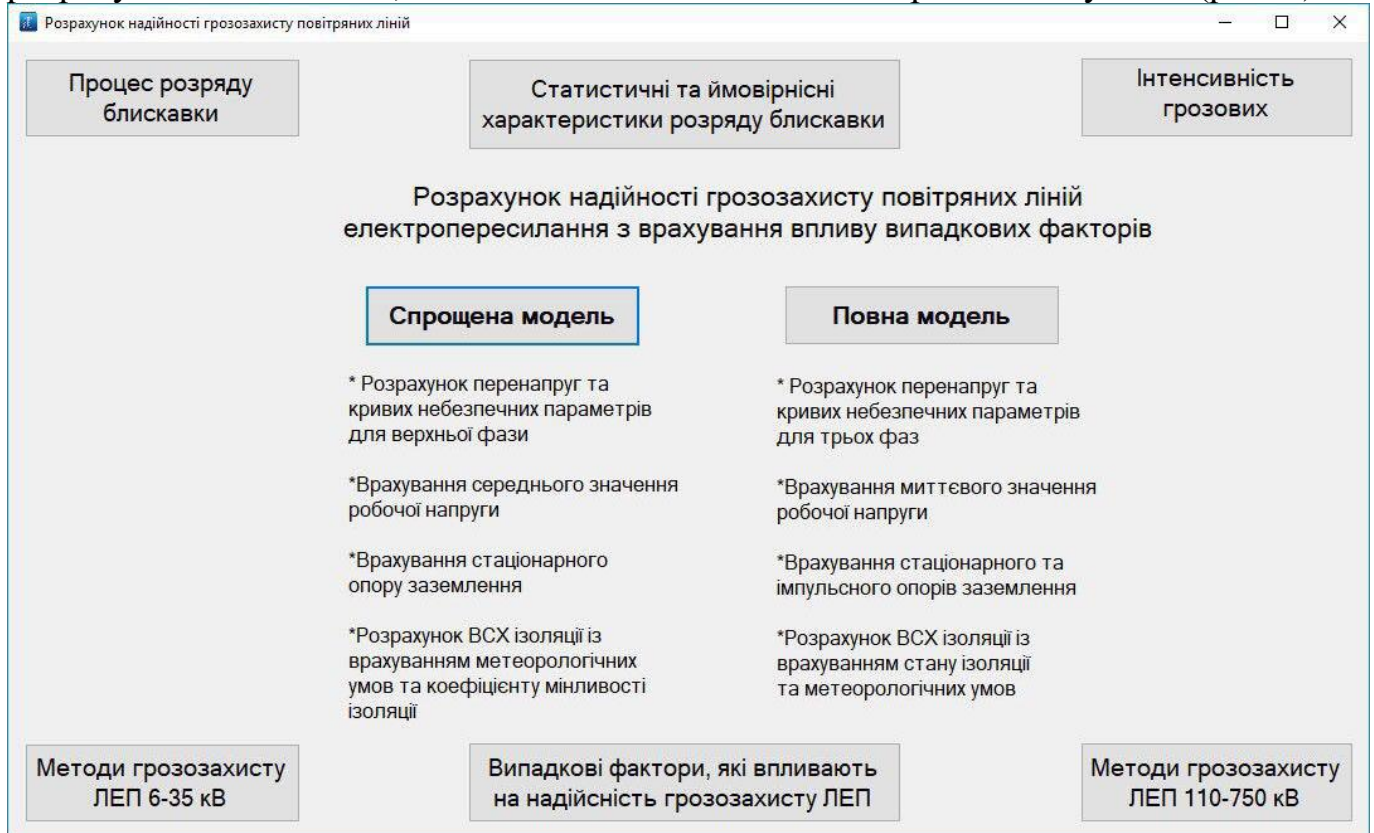


Рисунок 4 – Головне вікно програми «ГЛЕП»

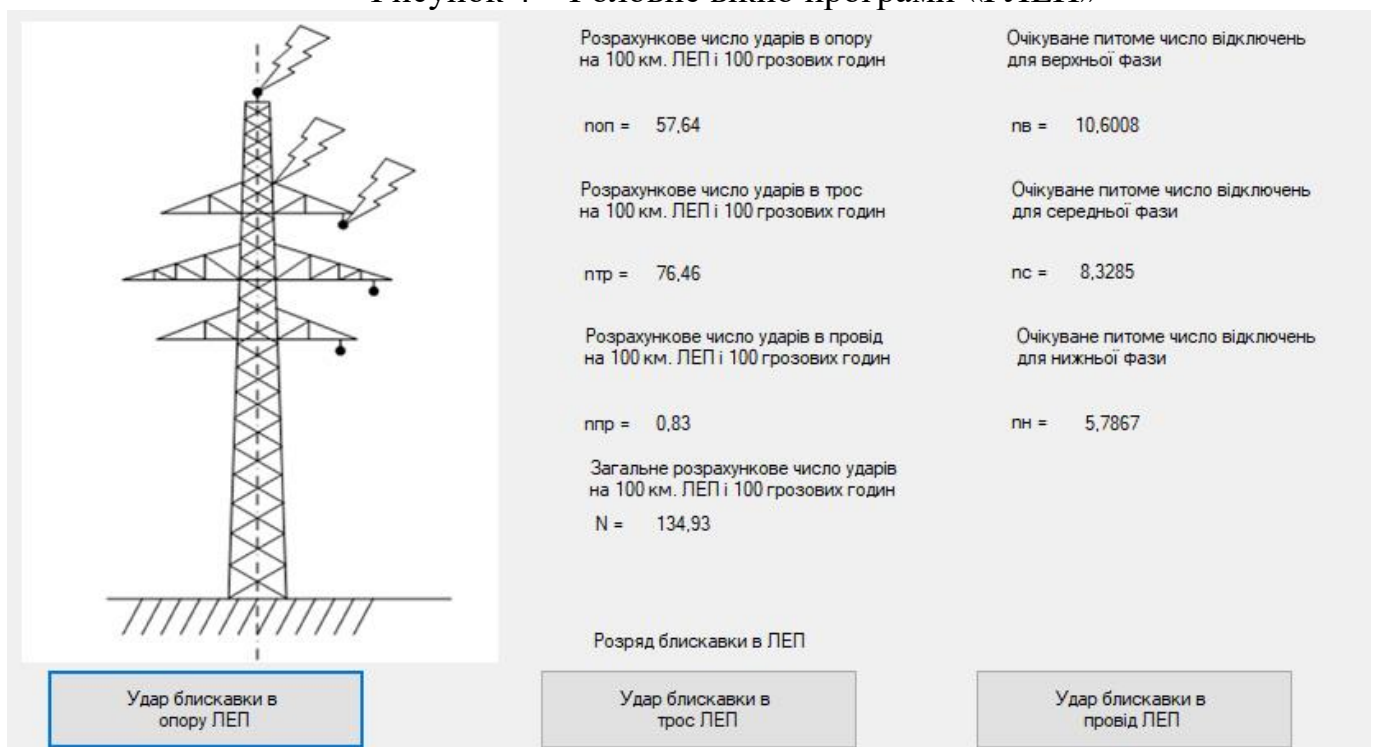


Рисунок 5 – Головне вікно результатів програми «ГЛЕП»

У четвертому розділі наведено результати розрахунків надійності грозозахисту ЛЕП 110 – 330 кВ електромереж Західного регіону України.

Для прикладу проведено розрахунки параметрів надійності (таблиця) за застосування різних засобів грозозахисту ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво (рис. 6,7).

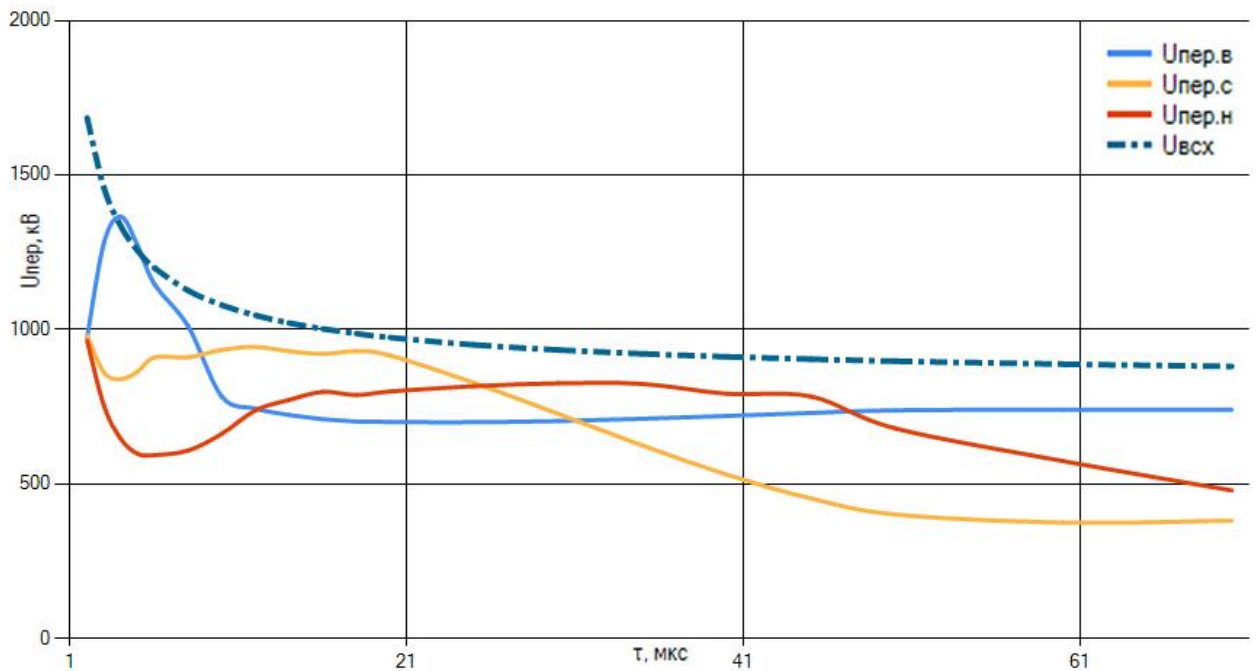


Рисунок 6 - Розрахункові напруги на ізоляції під час удару блискавки в опору №186 для поточного опору заземлення ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво

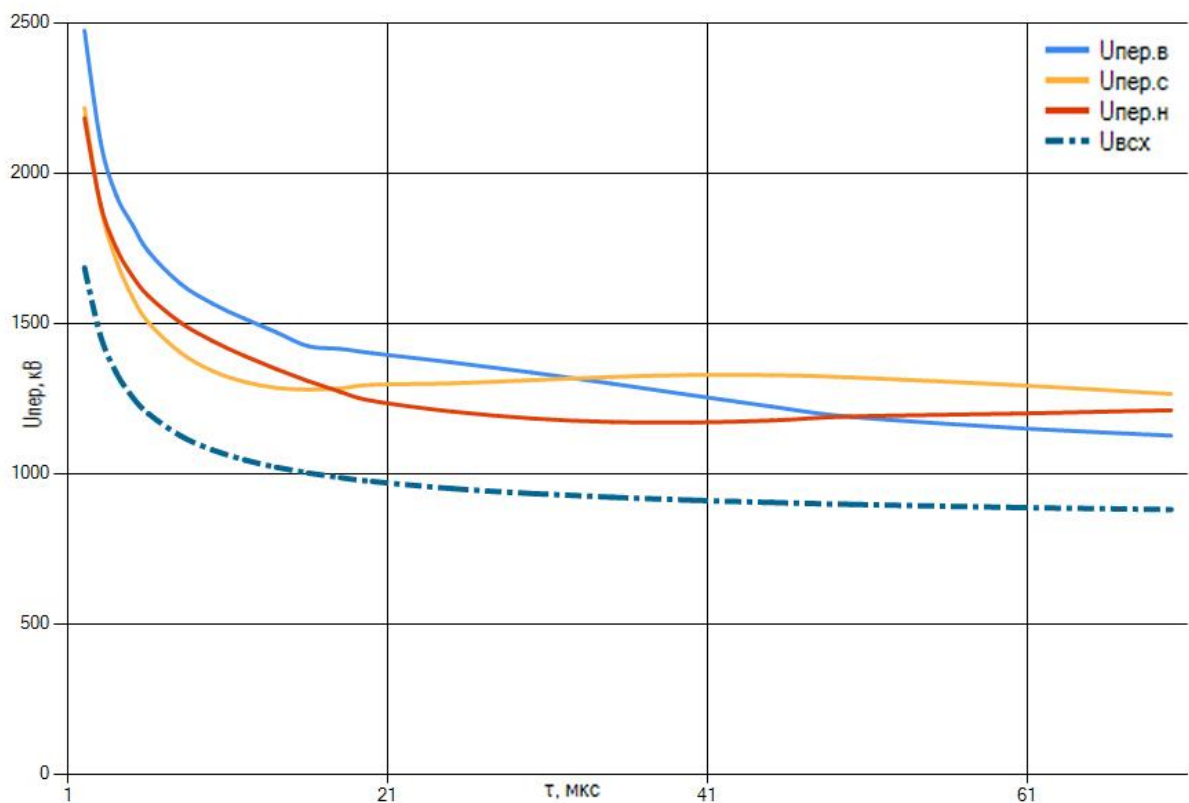


Рисунок 7 - Розрахункові напруги на ізоляції під час прориву блискавки через тросовий захист опори №186 ЛЕП 220 кВ Стрий – Мукачєво

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 (ОПН чи ВР)

Аналізуючи результати розрахунків можна зробити висновок, що найефективнішим є поєднання засобів захисту, оскільки окремі засоби захисту ефективні лише за удару блискавки в опору, трос чи провід.

Таблиця

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

Таким чином, за результатами розрахунків найефективнішими поєднаннями засобів захисту є такі комбінації:

1. Встановлення нормативного значення опору заземлення та збільшення довжини гірлянди ізоляторів;
2. Встановлення нормативного значення опору заземлення та застосування пристроїв захисту (ОПН чи ВР);
3. Встановлення нормативного значення опору заземлення, збільшення довжини гірлянди ізоляторів та застосування пристроїв захисту (ОПН);
4. Встановлення нормативного значення опору заземлення та додаткового грозозахисного троса чи зміна конфігурації тросового захисту.

Для вибору оптимального поєднання заходів для конкретної ЛЕП необхідно провести техніко – економічне обґрунтування вказаних пропозицій.

За результатами розрахунків поєднань засобів та пристроїв грозозахисту можна зробити висновок, що основою надійного та ефективного грозозахисту є нормоване значення опору заземлення. Для зменшення опору заземлення застосовують традиційні та нетрадиційні засоби. В якості традиційних рішень застосовуються модульні системи стрижневого заземлення.

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.



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 доцільне, 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  $+60$  °С.

На величину опору заземлення та стан заземлювального пристрою також впливають корозійні процеси в ґрунті. 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).

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 та 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.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача оцінки надійності систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання 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 електропередавання. 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 розширену сукупність випадкових факторів, що впливають на надійність грозозахисту повітряних ліній електропередавання. В результаті проведених досліджень запропоновано розраховувати ймовірність грозового ураження об'єкта, враховуючи розширену сукупність поєднань випадкових факторів, що дозволить адекватніше оцінити надійність грозозахисту та підвищити його ефективність.

3. Запропоновано, з урахуванням розширеної сукупності випадкових факторів, метод 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. Розроблено математичну модель оцінки грозостійкості ЛЕП, в якій враховано розширену сукупність випадкових факторів, 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 електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів. В комплексі використано основні принципи розрахунків, обґрунтовані в запропонованій математичній моделі, з врахуванням розширеної сукупності 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.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zhurakhivskiy A. V. Models of probabilistic evaluation of intensity of disconnection of overhead transmission lines caused by a lightning discharge / A. V. Zhurakhivskiy, T. V. Binkevych // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2018. - № 2. - С. 80–86
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 електропересилання шляхом зниження опорів заземлювальних пристроїв / А. Журахівський, Т. Бінкевич // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2018. - № 1, с. 59-65.
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

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. Ґжицького. - 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. Ґжицького. - 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. Ґжицького. - 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. Ґжицького. - 2014. - Т. 16, № 2(4). - С. 3-11.

## АНОТАЦІЇ

**Бінкевич Т.В. Надійність систем грозозахисту повітряних ліній електропередавання 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 електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів, що має важливе значення для підвищення надійності функціонування електричних систем.

У дисертації запропоновано розраховувати ймовірність грозового ураження повітряної лінії електропередавання, 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, з урахуванням сукупності випадкових факторів, які впливають на надійність грозозахисту.

Запропоновано математичну модель розрахунку надійності грозозахисту, в якій враховано всі, наявні на сьогоднішній день, випадкові фактори, що визначають грозостійкість повітряних ліній електропередавання, 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 електропередавання з врахуванням впливу випадкових факторів.

Запропонованим цифровим комплексом розраховано надійність грозозахисту повітряних ліній електропередавання 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 електропередавання, надійність грозозахисту, випадковий фактор, ймовірність імпульсного розряду, крива небезпечних параметрів, число грозових відключень, перенапруга, система захисту.

**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 with the expediency of taking into account the influence of random factors and the development of a mathematical and digital model for calculating the reliability of lightning protection, taking into account the influence of random factors.

It was proposed to calculate the probability of lightning strike of an overhead 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 of taking them into account when calculating the reliability of lightning protection were determined.

In thesis was proposed to calculate the probability of lightning strike of an overhead 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 of taking them into account when calculating the reliability of lightning protection were determined.

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

The analysis of probabilistic assessment models for the intensity of overhead transmission line outages found in available sources revealed their significant drawback - taking into account only a limited number of random factors that determine the lightning of objects, which negatively affects the accuracy of reliability indicators and makes it difficult to optimize lightning protection schemes.

A mathematical model was proposed for calculating the reliability of lightning protection, which it was taken into account all the 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 developed 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, 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, effective combinations of lightning protection devices were determined.

It was proposed to use special chemical impurities with gelling additives, as a method of non-traditional reduction of grounding resistance.

To assess the reliability and efficiency of the lightning protection systems of overhead transmission lines, taking into account the influence of random factors, it was recommended to timely diagnose the elements of overhead transmission lines, which could be performed using the developed complex.

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

**Бинкевич Т.В. Надежность систем грозозащиты воздушных линий электропередачи с учетом влияния случайных факторов.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции, сети и системы». – Национальный университет «Львовская политехника», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи оценки надежности систем грозозащиты воздушных линий электропередачи с учетом влияния случайных факторов, имеет важное значение для повышения надежности функционирования электрических систем.

В диссертации предложено рассчитывать вероятность грозового поражения воздушной линии электропередачи, учитывая совокупность сочетаний случайных факторов, что позволит адекватно оценить надежность грозозащиты и повысить его эффективность. Определены законы распределения случайных факторов и способы их учета при расчете надежности грозозащиты.

Разработан способ определения области опасных параметров, с учетом совокупности случайных факторов, влияющих на надежность грозозащиты.

Предложена математическая модель расчета надежности грозозащиты, в которой учтены все, имеющиеся на сегодняшний день, случайные факторы, определяющие грозоупорность воздушных линий электропередачи, а разработанные принципы расчета обеспечивают адекватность полученных результатов соответствующим естественным процессам. Получено, с применением численного интегрирования, выражение для расчета вероятности перекрытия изоляции, с учетом влияния случайных факторов.

Разработан эффективный цифровой комплекс для расчета и оценки надежности систем грозозащиты воздушных линий электропередачи с учетом влияния случайных факторов.

Предложенным цифровым комплексом рассчитана надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи Западного региона Украины класса напряжений 110-330 кВ. На примере линии 220 кВ выполнены расчеты надежности грозозащиты с учетом влияния случайных факторов за применение различных средств грозозащиты. По результатам расчетов определены эффективные сочетания этих средств.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, надежность грозозащиты, случайный фактор, вероятность импульсного разряда, кривая опасных параметров, число грозовых отключений, перенапряжение, система защиты.