

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СХЕМ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

© Ліщак І.В., Бінкевич Т.В., 2014

Проаналізовано наявні математичні моделі для визначення надійності схем грозозахисту, а також запропоновано узагальнену математичну модель, яку реалізовано програмним методом.

*Ключові слова:* грозозахист, лінія електропересилання, перенапруга, крива небезпечних параметрів, вольт – секундна характеристика.

The analysis of existing mathematical models to determine the reliability of lightning protection schemes, and proposed the generalized mathematical model, which is implemented by software.

*Key words:* lightning protection, transmission line, overstrain, dangerous curve parameters, volt-second characteristic.

### Актуальність проблеми грозозахисту. Аналіз останніх досліджень

Математичне моделювання є основним методом дослідження надійності грозозахисту повітряних ліній електропересилання (ЛЕП). Розроблені математичні моделі використовуються переважно для кількісної оцінки грозової стійкості об'єктів електроенергетичної системи. При цьому визначають такі показники: середнє за рік число коротких замикань в розподільчих пристроях електростанцій та підстанцій, зумовлених прямим попаданням блискавки; середнє число небезпечних перенапруг, які виникають на підстанціях протягом року внаслідок набігання хвиль з ЛЕП; середнє за рік число грозових від'єднань ЛЕП. Наведені вище показники демонструють інтенсивність грозових відмов визначених видів.

Існуючі математичні моделі надійності грозозахисту не мають єдиної методологічної бази. Різниця їх полягає у відмінності алгоритмів визначення показників  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $n_p$  [1–4]. Деякі моделі характеризуються вузько спеціалізованим призначенням [1, 3]. Існуючі математичні моделі надійності грозозахисту об'єктів ЕЕС передбачають два етапи розрахунків, які об'єднуються графічними побудовами [2–4]. Наявність двох окремих етапів розрахунків та недостатнє використання числових методів аналізу вказує на відсутність узагальненої формалізації алгоритмів, а тому й визначає низьку ефективність програмної реалізації. Наявні моделі можуть враховувати лише обмежену кількість випадкових факторів, які визначають грозову стійкість об'єктів, що відображається на точності показників надійності і ускладнює оптимізацію схем грозозахисту.

### Формування цілі статті

Метою статті є аналіз існуючих математичних моделей визначення надійності схем грозозахисту, а також опис розробленої математичної моделі, яку реалізовано програмним методом.

### Виклад основного матеріалу

Будучи методологічно неформалізованими, наявні математичні моделі надійності грозозахисту мають одночасно загальні закономірності побудови. За допомогою проведених досліджень було

встановлено такі деталі моделей. По перше, розрахункові вирази для  $\beta, \beta_1, n_p$  у всіх моделях можуть бути приведені до єдиної структури:

$$\beta \vee \beta_1 \vee n_p = N_0 \cdot \eta_0 \cdot p_0 + N_n \cdot \eta_n \cdot p_n, \quad (1)$$

де  $N_0, N_n$  – середня за рік кількість ударів блискавки в опору або блискавкоприймач, в проводі ЛЕП або струмопровідну частину розподільчого пристрою;  $h_0, h_n$  – імовірність переходу імпульсного перекриття в дугу відповідно при зворотних перекриттях або проривах;  $p_0, p_n$  – імовірність порушення імпульсної стійкості ізоляції ЛЕП при розрядах в опору (блискавкоприймач) і проривах відповідно, яке відноситься до одного удару блискавки з випадковими значеннями параметрів хвилі перенапруги, а також при випадкових значеннях інших величин, які визначають грозову стійкість об'єкта. По-друге, алгоритми розрахунку ймовірностей  $p_0, p_n$  для ЛЕП можна звести до одного алгоритму, який ґрунтується на використанні  $n$ -кратного інтегралу по області  $D$  від щільності розподілу  $f(\vec{x})$   $n$ -вимірного вектора випадкових величин.

$$p = \oint \dots \oint f(\vec{x}) \prod_{k=1}^n dx_k, \quad (2)$$

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

Різноманітність моделей надійності грозозахисту виникла внаслідок застосування різних підходів до розв'язання трьох основних задач, які виникають під час визначення імовірності  $p$ : визначення щільності розподілу  $f(\vec{x})$  визначення області небезпечних параметрів  $D$  і безпосереднього здійснення процесу інтегрування. Спосіб та об'єм розв'язання кожної із задач залежать від вибору вектора випадкових величин  $\vec{x}$ . Для ЛЕП в якості основних випадкових величин приймають параметри хвилі струму блискавки – амплітуду  $I$  і крутизну фронту  $a$  і розв'язують другу і третю задачі, оскільки розподіл параметрів  $I$  та  $a$  відомий [1, 4]. Для ЛЕП розв'язується друга і третя задачі, проте необхідно враховувати додатковий фактор – випадкове віддалення  $l$  місця удару від шини підстанції. Область інтегрування  $D$  обмежується кривою грозостійкості  $I(l)$  [3] або сімейством кривих небезпечних параметрів [2]. У такому разі не виникає принципів обмежень на кількість випадкових факторів, які враховуються під час розрахунку.

У зв'язку з наведеним виразом (2) для ймовірності  $p$  порушення міцності ізоляції у разі одного удару блискавки і випадкових значень всіх величин, які визначають надійність грозозахисту об'єкта з метою реалізації числового інтегрування, подамо у вигляді:

$$p = \sum_{x_n} \Delta F(x_n) \dots \sum_{x_2} \Delta F(x_2) \cdot \sum_{x_k} \Delta F(x_k) = \prod_{k=1}^n \sum_{x_k} \Delta F(x_k), \quad (3)$$

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

Чисельно інтегрування згідно із (3) реалізується варіюванням величини по елементах, які належать до області небезпечних параметрів. Формула (3) справедлива для незалежних випадкових величин, проте її можна застосовувати для корельованих величин, якщо використовувати умовні закони розподілу.

Виділимо із координат вектора  $\vec{x}$  величини, які формують на ізоляції об'єкта перенапругу  $u(t)$  випадкової форми. Це параметри хвилі струму блискавки  $I, \alpha, \tau$ , миттєве значення робочої напруги  $u_0$  в момент розряду блискавки, віддалення  $l$  місця удару блискавки від об'єкта, який захищається, відстань  $b$  від місця удару блискавки в землю до осі лінії, яке враховується під час взаємодії індуктованих напруг. Згрупуємо їх в окремий вектор  $\vec{x}' = (l, b, I, \alpha, \tau, u_0)$ , і в формулу (3) запишемо так:

$$p = \sum_l \Delta F(l) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_\alpha \Delta F(\alpha) \cdot \sum_\tau \Delta F(\tau) \cdot \sum_{u_0} \Delta F(u_0) \cdot p(u) \quad (4)$$

де  $p(u)$  – імовірність порушення міцності ізоляції об'єкта під час дії на нього напруги  $u(t)$ , сформованого компонентами вектора за фіксованих значень.

Імовірність  $p(u)$  використовується як критерій приналежності вектора  $\vec{x}'$  до області небезпечних параметрів  $[p(u) \neq 0]$ . Обчислення на кожному кроці значення  $p(u)$  дозволяє втілити в життя процес інтегрування без попереднього встановлення границь області небезпечних параметрів.

Імовірність  $p(u)$  визначається розподілом величин, які враховують метеорологічні умови  $m$ , стан ізоляції  $c$ , нормальний розкид розрядних напруг  $u_p$ , а також параметри діючої напруги  $u(t)$ . Відповідно до (3), цю імовірність необхідно розраховувати за формулою

$$p(u) = \sum_m \Delta F(m) \cdot \sum_c \Delta F(c) \cdot \sum_{u_p} \Delta F(u_p), \quad (5)$$

з одночасним контролем на кожному кроці приналежності напруги  $u(t)$  до області небезпечних параметрів, тобто виявлення факту наявності чи відсутності розряду.

В існуючих моделях надійності гроззахисту імовірність  $p(u)$  визначається порівнянням напруги  $u(t)$  з координатами вольт-секундної характеристики для зовнішньої ізоляції і лінії допустимих імпульсних впливів – для внутрішньої. При цьому  $p(u)$  приймає лише два значення;  $p(u) = 1$  – розряд відбувся – крива  $u(t)$  перетнула криву допустимого рівня  $p(u) = 0$  – розряд не відбувся. Зазвичай використовують ВСХ і рівні допустимих імпульсних дій для нормованих хвиль, які не дають можливості врахувати імпульсну міцність ізоляції від форми прикладеної перенапруги. Проте про необхідність врахування такої залежності акцентується в багатьох роботах, а також ця необхідність враховує потребу адекватності моделі до реальних природних процесів.

Зі всіх існуючих способів врахування залежності імпульсної стійкості зовнішньої ізоляції від форми прикладеної перенапруги [6] є найбільш прийнятним як у відношенні програмної реалізації, так і у відношенні точності. Моделюється переміщення головки лідера в проміжку і фіксується поступове скорочення довжини  $s$  непробитої лідером частини проміжку. Відповідно до умови  $s = 0$  встановлюється факт виникнення розряду. Наведений в [6] алгоритм розрахунку удосконалений. У межах кожного розрахункового кроку способом ітерації відбувається уточнення довжини  $s$  і середньої швидкості переміщення головки лідера. За такого уточнення факт виникнення  $[p(u) = 1]$  чи відсутності  $[p(u) = 0]$  розряду при діючій напрузі заданої форми встановлюється з більшою точністю.

Для здійснення числового інтегрування згідно із (4) необхідно знати функцію розподілу величини  $l, b, l, \alpha, \tau, u_0$ . Для параметрів хвилі струму блискавки вони відомі. Випадкові величини  $l, b$  підпорядковуються нормальному закону розподілу:

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

де  $l_{max}$  – максимальна довжина небезпечної зони;  $b_{max}, b_{min}$  – максимальна і мінімальна відстані до осі лінії,  $b_{min}$  залежить від висоти підвісу проводу.

Попереднього визначення  $b_{min}, l_{max}$  не потрібно, оскільки постійні величини виносяться за знак суми (4) і у разі визначення показників надійності по (1) скорочуються з відповідними величинами, які входять до складу  $N_0, N_n$ .

Деякі труднощі виникають у разі врахування миттєвого значення  $u_0$  робочої напруги електропередавання в момент розряду блискавки. Вплив  $u_0$  робочої напруги на імовірність порушення міцності ізоляції не можна врахувати безпосереднім застосуванням його функції розподілу. В існуючих моделях вплив  $u_0$  на грозостійкість об'єктів еквівалентують збільшенням напруги на ізоляції  $u(t)$  розрахованого без врахування робочої напруги, на величину  $u_{cp}$  середньої за півперіод значення фазної робочої напруги. Такий спосіб врахування  $u_0$  є штучним, точність його не оцінювалась.

Було запропоновано такий спосіб врахування впливу  $u_0$ . Розділимо період робочої напруги на  $n$  інтервалів. Розрахуємо для всіх  $n$  інтервалів миттєве значення робочої напруги  $u_0$ , напруги на ізоляції  $u(t) = u_0 + u(t)$  та імовірність  $p(u)'$  для кожної із трьох фаз. Якщо для  $m$  інтервалів  $p(u)' = 1$  хоча б для однієї фази, то імовірність порушення міцності ізоляції об'єкта з врахуванням впливу робочої напруги  $p(u, u_0)$  дорівнюватиме відношенню  $m/n$ . Аналогічно можна визначити імовірності перекриття ізоляції в кожній фазі окремо.

Розрахункову формулу для імовірності  $p$  порушення міцності ізоляції за випадкових значень всіх величин, які визначають грозостійкість об'єкта, запишемо у вигляді

$$p = \sum_l \Delta F(l) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_a \Delta F(a) \cdot \sum_\tau \Delta F(\tau) \cdot p(u, u_0) \quad (7)$$

Розрахунок імовірності  $p$  проводиться окремо для зворотних перекриттів і проривів блискавки  $p_n$ , оскільки умова формування напруги на ізоляції  $u(t)$  для цих випадків різна.

Враховуючи багатокомпонентність грозового розряду, обчислюють спочатку за розподілом  $I$ ,  $a$ ,  $t$  першої компоненти, потім переходимо на розподіл наступної компоненти і враховується збільшення  $p$  за рахунок розширення області небезпечних параметрів, спричинене впливом цієї компоненти розряду.

Цю математичну модель було реалізовано програмним методом. Для спрощення підготовки даних до розрахунку, зміни параметрів досліду, подання результатів у зручному вигляді був розроблений інтерфейс програми.

Під час запуску програми користувачу відкривається головне вікно програми (рис. 1), на якому розміщені кнопки керування, а також вікно відображення вхідної інформації.

The screenshot shows the main window of the program with a menu bar at the top containing 'Файл', 'Вигляд', 'Розрахунок', and 'Допомога'. The main area is divided into three sections:

- Дані по лінії електропересялення:** Fields include Назва ЛЕП, Номінальна напруга ЛЕП, кВ, Найбільша (лінійна) робоча напруга, кВ, Довжина ЛЕП, км, Середній опір заземлення опори, Ом, Кількість тросів, Радіус тросу, м, Радіус проводу, м, Число складових розщепленого проводу, Радіус розщеплення, м, Середньорічна тривалість гроз в районі проходження лінії, год, and Середня висота місцевості над рівнем моря, м.
- Конструкція проміжної опори:** Fields include Тип опори, Висота точки кріплення тросу, м, Висота точки кріплення верхнього проводу, м, Висота точки кріплення середнього проводу, м, Висота точки кріплення нижнього проводу, м, Середня висота прольоту, м, Найменша допустима віддаль по вертикалі між тросом і верхнім проводом, м, Найменша допустима віддаль від нижнього проводу до землі, м, Стріла провисання тросу в умовах грозового сезону, м, Стріла провисання проводу в умовах грозового сезону, м, Захисний кут тросу на опорі, град, and Віддаль між тросами.
- Дані по лінійній ізоляції:** Fields include Марка ізолятора, Висота ізолятора, м, Кількість ізоляторів в пір'ячці, 50%-на імпульсна розрядна напруга для від'ємної полярності, кВ, and 50%-на імпульсна розрядна напруга для додатньої полярності, кВ.

Each section has a 'Редагувати...' button on the right.

Рис. 1. Головне вікно програми

У вікні програми містяться такі кнопки керування:

Кнопки **Файл Вигляд Розрахунок Допомога** з подальшими контекстними вікнами (рис. 2)

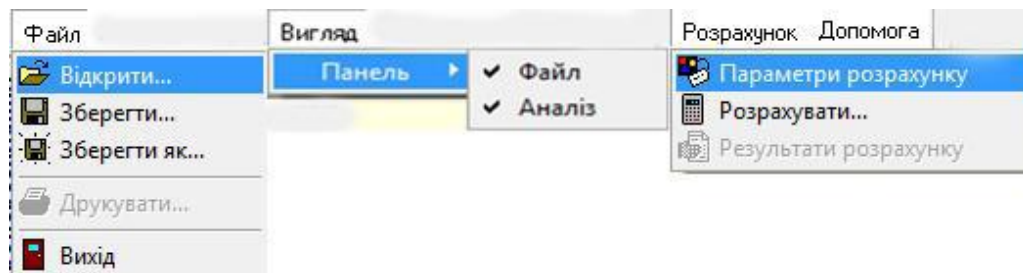



Рис. 2. Вікна контекстних меню кнопок керування

□ Кнопки



Вікно відображення вхідної інформації складається з трьох блоків: «дані по лінії електропересилання», «конструкція проміжної опори», «дані по лінійній ізоляції». У разі натиснення кнопки **Редагувати ...** можливе введення вхідних параметрів шляхом заповнення комірок діалогового вікна (рис. 3). Варто також відзначити можливість завантаження вхідної інформації комплексно чи зокрема кожного блока. Для цього передбачено кнопку  для завантаження комплексної інформації, а також **Відкрити...** для завантаження вхідної інформації кожного блока зокрема.

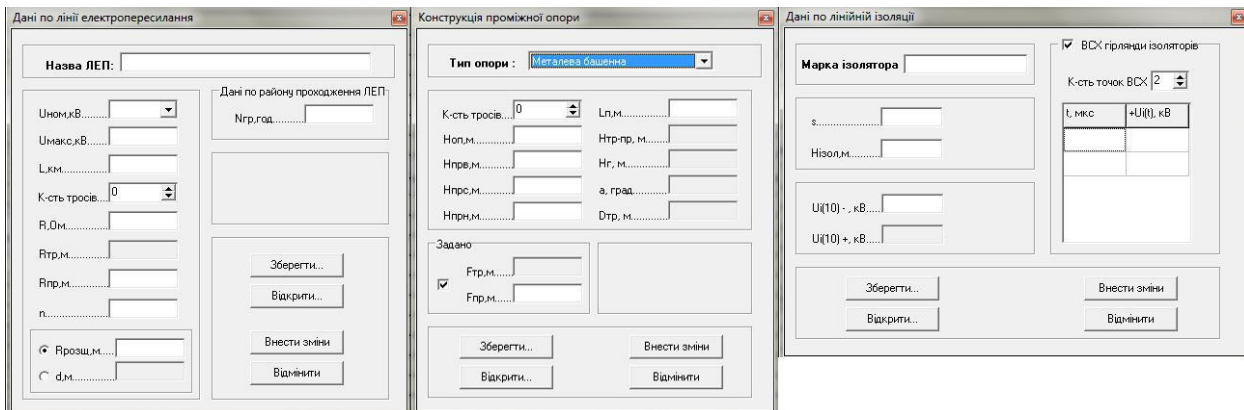


Рис. 3. Діалогові вікна для введення вхідних параметрів

Для зручності введення інформації у блоці «конструкція проміжної опори» передбачено можливість вибору з контекстного меню типу опори, в якій вже закладено вхідну інформацію про той чи інший тип опори. (рис. 4)

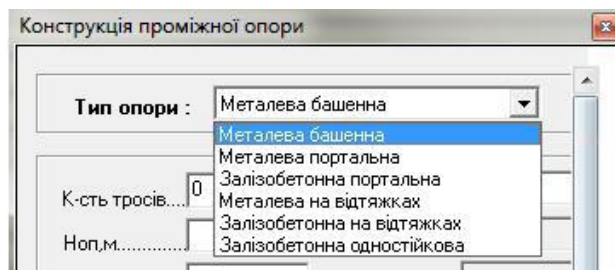





Рис. 4. Контекстне меню для вибору типу опори

Після введення вхідної інформації необхідно натиснути кнопку  для проведення розрахунку надійності грозозахисту об'єкта.

Результати розрахунку виводяться в графічній формі і містять три блоки інформації: «Вольт-секундна характеристика», «Криві небезпечних параметрів при ударі в опору», а також «Криві небезпечних параметрів при ударі в трос» (рис. 5). Варто зазначити, що користувачу надається можливість вибору представлення графіків у різних координатах, тобто у координатах  $A = f(I)$  і  $PA = f(PI)$ . У вікні результаті міститься також блок, який відображає інформацію про питому кількість вимкнень ЛЕП при ударі блискавки в трос, опору, провід, а також сумарна питома кількість грозових вимкнень і абсолютна кількість грозових вимкнень. Також передбачено можливість роздруку результатів у разі натиснення кнопки . Для виходу з програми необхідно натиснути кнопку .

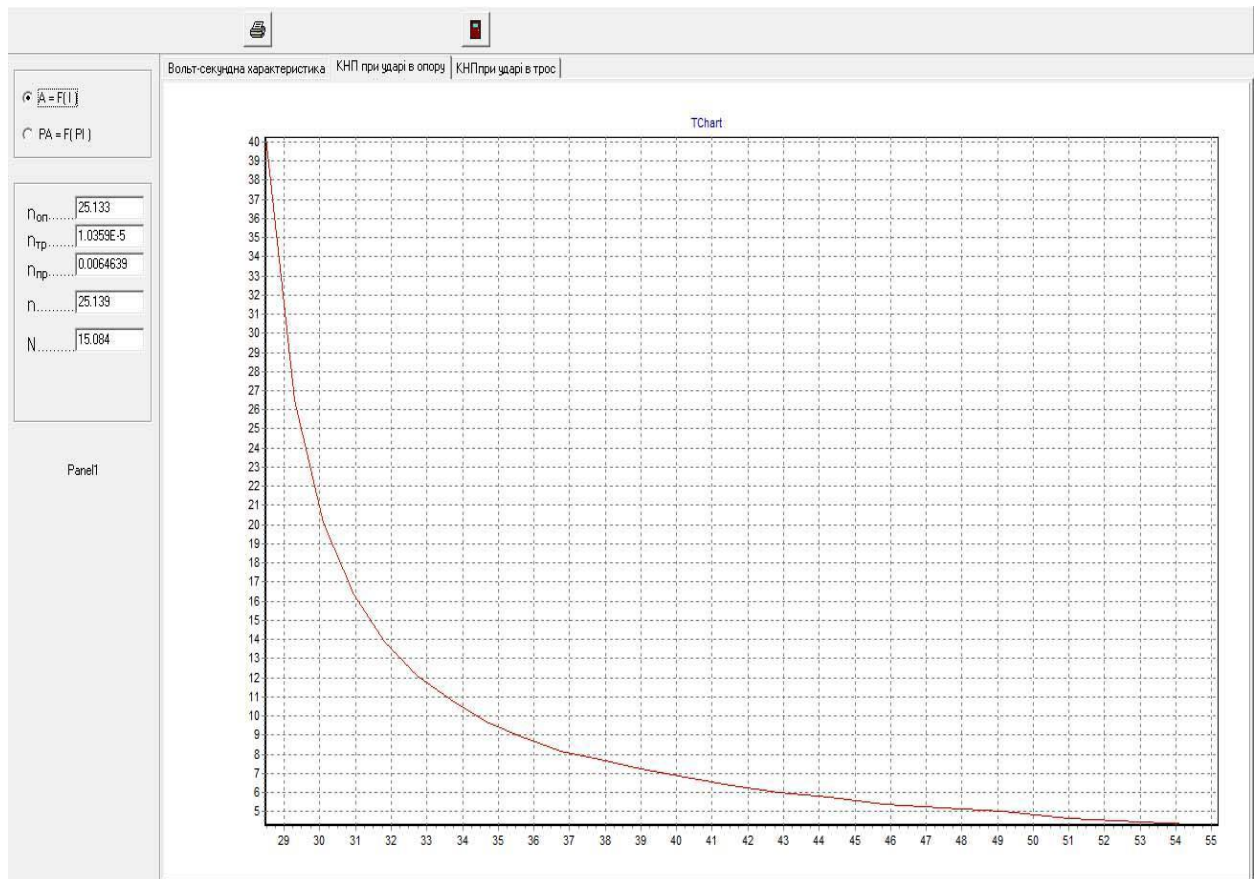
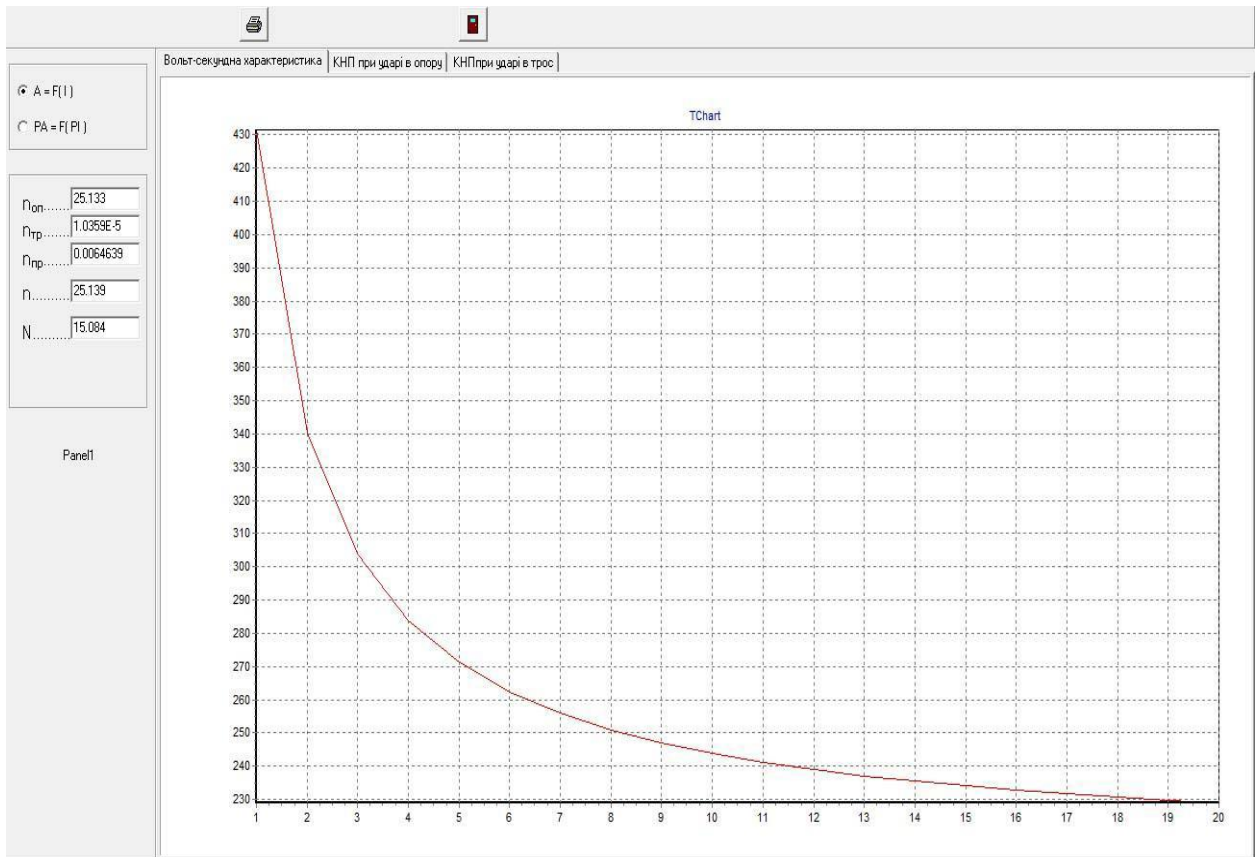


Рис. 5. Результати розрахунку грозозахисту ЛЕП



Рис. 5. (Продовження). Результати розрахунку грозозахисту ЛЕП

### Висновки

Модель є узагальненою, оскільки показники надійності грозозахисту ЛЕП під час прямих ударів блискавки і набігаючих хвиль розраховуються за єдиним алгоритмом, визначеним за виразами (1) і (7). Враховуються всі випадкові величини, які визначають грозостійкість об'єкта, а розроблені методи їх розрахунків забезпечують адекватність та відповідність до природних процесів.

Вхідні дані для розрахунку надійності передбачають геометричні розміри елементів об'єкта, який досліджується, характеристики захисних апаратів, експлуатаційні та експериментальні характеристики ізоляції та корони. З метою досягнення максимальної точності моделі та вхідних даних необхідно усунути варіацію випадкових величин, які мають найбільший вплив на точність результату. Факт обґрунтовується також вимогами зменшення тривалості цифрового моделювання. Це одна із важливих функцій запропонованої моделі. Точність моделі надійності грозозахисту не може бути обґрунтована формально. Основним критерієм точності потрібно враховувати відповідність результатів розрахунків щодо досвіду експлуатації. Така відповідність спостерігалась майже у всіх випадках використання створеної моделі, для яких були наявні дані досвіду експлуатації.

1. Труды НИИПТ, «Передача энергии постоянным и переменным током». – Л.: Энергия, 1985. – Вып. 21–22. – С. 172–191. 2. Костенко М.В. Физика грозового розряда и защита линий электропередачи : навч. посіб. / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов. – Львів: ЛПИ, 1982. – 79 с. 3. Kokkonen M. Development of Lightning Protection for Covered Conductor / Kokkonen M. – ICCS, 2000. 4. Kuffel E. High Voltage Engineering / E. Kuffel, W. S. Zaengl. – Pergamon Press, Great Britain, 2000. – P. 554. 5. Chowdhuri P. The effects of nonstandard lightning voltage waveshapes on the impulse strength of short air gaps, / P. Chowdhuri, A.K. Mishara, P.M. Martin – IEEE Transactions on power delivery. – 1994. – Vol. 09, No. 45. – P.1991–1999. Venkatesan S. Impulse Volt-Time Characteristics of Oil and OIP insulation / S. Venkatesan – USA American J. Appl. Sci., Vol. 2, No. 2, 2005. – P. 591–596. 6. William A. Lightning and Grounding EPRI AC Transmission Line Reference Book / A. William, Chisholm John G. Anderson – 200 kV and Above, Third Edition.