Фізико-математичні науки

УДК 004.94

Мірошник Костянтин Артурович
магістрант кафедри передачі електричної енергії
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
Мирошник Константин Артурович
магистрант кафедры передачи электрической энергии
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт»
Miroshnyk Kostiantyn
Master of the Department of Electric Power Transmission of the
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВЗДОВЖ ГІРЛЯНДИ ІЗОЛЯТОРІВ ЛЕП НВН
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ ЛЭП СВН
RESEARCHING OF DISTRIBUTION OF PARAMETERS OF ELECTRIC FIELD ALONG THE GARLAND OF INSULATORS OF EHV TRANSMISSION LINES

Анотація. *У статті запропоновано метод розрахунку розподілу напруженості електричного поля та падіння напруги вздовж гірлянди підвісних ізоляторів ЛЕП у програмному середовищі Mathcad.*

Ключові слова: *напруженість електричного поля, падіння напруги, програмне середовище Mathcad.*

Аннотация. *В статье предложен метод расчёта распределения напряжённости электрического поля и падения напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов ЛЭП в программной среде Mathcad.*

Ключевые слова: *напряжённость электрического поля, падение напряжения, программная среда Mathcad.*

Summary. *The article describes the using of Mathcad software environment for the computation of distribution of the electric field and the voltage drop along the garland hanging insulators of transmission lines*

Key words: *electric field strength, voltage drop, Mathcad software environment.*

Теоретичні відомості. Ізолююча підвіска дротів розташовується в сильно неоднорідному полі між дротом і траверсою (рис.1). Ця обставина визначає нерівномірність розподілу напруги вздовж ізолюючої підвіски. Найбільш навантаженими в електричному відношенні виявляються частини ізолюючої підвіски, розташовані поблизу дротів в області найбільшої напруженості поля. По мірі віддалення від дроту напруженість поля зменшується, але при наближенні до траверси знову збільшується.

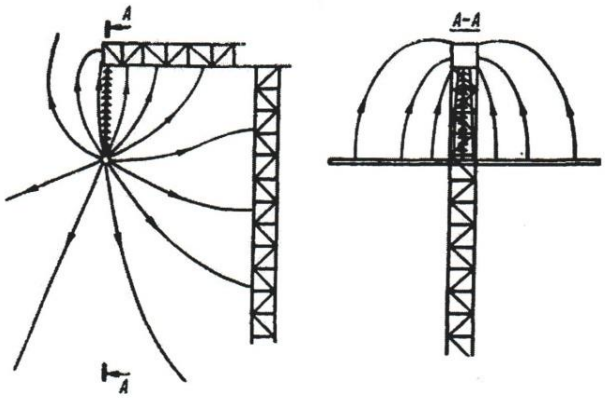


Рис. 1. Силові лінії магнітного поля між проводом і опорою

Розподіл напруженості поля вздовж стрижневих порцелянових і полімерних ізоляторів повністю визначається полем дроту і зчіпної арматури відносно опори. Гірлянда з тарілчастих ізоляторів, прохідна ємність яких

становить 70-100 пФ, спотворює поле дроту, вирівнюючи розподіл напруги вздовж його осі. Цей вирівнюючий вплив гірлянди істотний при відносно невеликій її довжині, коли прохідна ємність гірлянди порівнянна з ємністю дроту відносно опори (близько 100-200 пФ залежно від конструкції дроту і розмірів опори). При великих довжинах гірлянд (більше 25 ізоляторів) їх прохідна ємність становить лише кілька відсотків ємності дроту на опору. Відповідно струм зміщення майже повністю визначається полем дроту, яке визначає також і розподіл напруги вздовж гірлянди. Ці міркування підтверджуються експериментальними даними (рис. 6). При відносно невеликому числі ізоляторів в гірляндах, що відповідає лініям класу 220-330 кВ, збільшення кількості ізоляторів ($n_{из}$) призводить до значного зменшення частки напруги на електрично найбільш навантажених ізоляторах, що примикають до дроту. Однак при $n_{из}$ >25 відношення найбільшого падіння напруги на ізоляторі до напруги на гірлянді зберігається незмінним аж до дуже великих довжин гірлянд. Відповідно абсолютне значення найбільшого падіння напруги на ізоляторах гірлянди при $n_{из}$>25 збільшується пропорційно номінальній напрузі лінії (рис. 7).

Розподіл напруги вздовж гірлянди може бути обчислено за розподілом потенціалу поля вздовж осі дроту гірлянди. В зоні розташування опори поле дроту суттєво відрізняється від плоскопаралельного. Тривимірне поле може бути проаналізоване шляхом розбиття дроту і опори на окремі ділянки з заданим потенціалом в результаті рішення системи рівнянь Максвелла з потенційними коефіцієнтами з числом невідомих зарядів, рівним числу ділянок дроту і опори. Потенціал в довільній точці на осі гірлянди знаходиться як сума потенціалів від усіх знайдених зарядів. Це рішення не складне, однак, не забезпечує можливості наочного представлення результату. Щоб наближено врахувати вплив опори на поле дроту вздовж осі підтримуючої гірлянди ізоляторів необхідно перетворити тривимірне поле в плоскопаралельне. Для цього скористаємося тим, що поле між двома

зарядженими протяжними мимобіжними тілами на лінії найкоротшої відстані між ними з високим ступенем точності збігається з полем паралельних дротів, що знаходяться на тій самій відстані один від одного і над землею, як і в місці схрещування. Ця обставина дозволяє замінити реальне положення траверси і стійки опори (поперек дротів) на поздовжній: траверси – над дротом в місці кріплення підтримуючої гірлянди, стійки – на висоті розташування проводу $H_{ст}$-$H_{пр}$. При цьому погонні заряди на дроті ($q_{пр}$), траверсі (q_m), та стійці ($q_{ст}$) можуть бути визначені в результаті рішення системи трьох потенційних рівнянь:

$$\begin{cases} U_{ф} = a_{11}q_{пр} + a_{12}q_m + a_{13}q_{ст} \\ 0 = a_{21}q_{пр} + a_{22}q_m + a_{23}q_{ст} \\ 0 = a_{31}q_{пр} + a_{32}q_m + a_{33}q_{ст} \end{cases},$$

де власні потенційні коефіцієнти дроту, траверси і стійки та їх взаємні потенційні коефіцієнти обчислюються за формулами:

$$a_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2H_{пр}}{r_{пр3}}; \qquad a_{22} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2H_T}{r_{m3}}, \qquad a_{33} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2H_{ст}}{r_{ст3}},$$

$$a_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{H_{пр}+H_m}{H_m-H_{пр}}; \qquad a_{13} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\sqrt{1+\left(\frac{2H_{пр}}{l_{пр.ст}}\right)^2}; \qquad a_{23} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\sqrt{\frac{(H_m+H_{пр})^2+l_{пр.ст}^{\ 2}}{(H_m-H_{пр})^2+l^2}}$$

Еквівалентний радіус дроту визначається за формулою, а для траверси і стійки – з умови рівності периметрів перерізів траверси і стійки довжині кіл: $П = 2\pi r_{т.э}$; $П = 2\pi r_{ст.э}$; $l_{пр.ст}$ – відстань між осями дроту і стійки.

При розщепленні фазного дроту з урахуванням заряду на дроті і на траверсі падіння напруги на k-му ізоляторі гірлянди $(1 \le k \le n_{из})$:

$$\Delta U_k = \frac{q_{пр}}{2\pi\varepsilon_0}\ln\sqrt{\frac{r_p^2+x_k^{\ 2}}{r_p^2-x_{k-1}^{\ 2}}} - \frac{q_m}{2\pi\varepsilon_0}\ln\sqrt{\frac{H_T^{'}+H_{пр}+x_{k-1}}{H_T^{'}-H_{пр}+x_k}}$$

Оскільки визначальне практичне значення має найбільше падіння напруги на найближчому до дроту ізоляторі, зарядом стійки $q_{ст}$ можна знехтувати, так як складова вектора напруженості поля заряду стійки,

спрямована вздовж гірлянди, мала. Також можна знехтувати і всіма відображеними в землі зарядами через мізерність їх впливу порівняно з зарядом дроту і траверси.

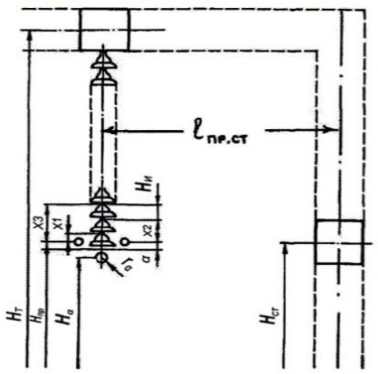


Рис. 2. Розрахункова схема для обчислення розподілу напруги вздовж одноцепної підтримуючої гірлянди при розщепленні дроту

При збільшенні числа складових у фазі обчислити розподіл напруги вздовж гірлянди можна за наведеними раніше формулами з урахуванням розташування дротів відносно осі гірлянди. При цьому падіння напруги на кожному ізоляторі визначається як сума складових від кожної пари дротів. Однак для обчислення найбільшого падіння напруги простіше виходити з картини розподілу напруженості поля вздовж гірлянди. Для дроту, розташованого по осі гірлянди: $\Delta U_1 = \frac{q_{пр}}{2\pi\varepsilon_0 x} - \frac{q_T}{2\pi\varepsilon_0 (H_T - H_{пр} - x)}$, де координата x відраховується від осі дроту.

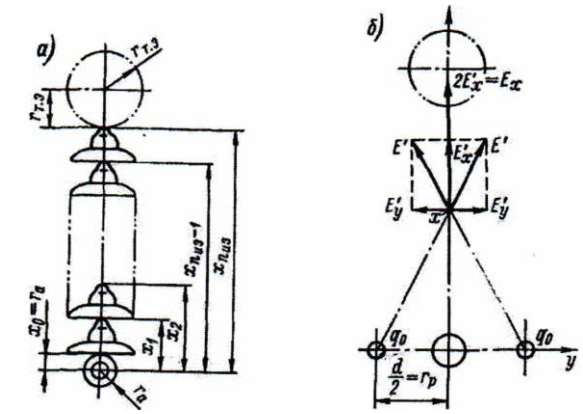


Рис. 3. Розрахункові схеми для обчислення розподілу напруженості поля вздовж гірлянди

Для пари дротів, розташованих симетрично відносно осі гірлянди, розподіл напруженості поля від заряду на дроті визначається сумою поздовжніх складових напруженості поля E'_x кожного з дротів (рис. 3, б)

$$E_{xnp} = \frac{q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 r_p}\frac{x}{r_p}\frac{1}{1+\left(\frac{x}{r_p}\right)^2} = \frac{q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 r_p}\Phi\left(\frac{x}{r_p}\right)$$

Максимум $E_{x\,np}$ можна знайти, прирівнявши нулю похідну $\Phi(x/r_p)$ по x. При цьому отримуємо, що $E_{x\,np}$ досягає максимуму при $x_{экс} = r_p$. Чим більше радіус розщеплення, тим більше зміщується максимум $E_{x\,np}$ в бік від дроту. Максимальна напруженість поля (при $x = x_{экс}$): $E_{xnp\max} = \frac{q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 2r_p}$ убуває зворотньо пропорційно відстані між дротами $d = 2r_p$. При довільному числі пар дротів у фазі $n/2$ для підсумовування напруженості поля від зарядів усіх пар дротів доцільно початок координат поєднати з віссю симетрії дроту. Для парного числа складових:

$$E_{xnp} = \frac{2q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 n}\sum_{k=1}\frac{n}{x^2 + r_p^2 - 2xr_p\cos\frac{\pi}{n}(2k-1)} = \frac{2q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 nr_p}\frac{r_p}{x}\sum_{k=1}^{n/2}\frac{1-\frac{r_p}{x}\cos\frac{\pi}{n}(2k-1)}{1+(r_p/x)^2 - 2(r_p/x)+\cos\frac{\pi}{n}(2k-1)}$$

Для дроту з вісьмома складовими: максимум напруженості поля несуттєво зсунутий відносно максимуму для найближчої до гірлянді пари дротів з координатою

$$x_{экс} = r_p\left(\cos\frac{\pi}{n}+\sin\frac{\pi}{n}\right) = r_p\sqrt{2}\sin(\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{4})$$

У зв'язку з цим максимум напруженості поля може бути обчислений при підстановці у формулу $x_{экс}$:

$$E_{np\max} = \frac{q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 n r_p} \frac{2}{\sqrt{2}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{n}\right)} \sum_{k=1}^{n/2} \frac{1-\frac{\cos\frac{\pi}{n}(2k-1)}{\sqrt{2}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{n}\right)}}{1-\frac{\sqrt{2}\cos\frac{\pi}{n}(2k-1)}{\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{n}\right)}+\frac{1}{2\sin^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\pi}{n}\right)}} = \frac{q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 n r_p} F(n)$$

де *F(n)* – функція тільки числа складових у фазі. Розрахунки показали, що *F(n)* є лінійною функцією числа складових у фазі

$$F(n) = 0{,}72\,(n - 0{,}6)$$

і, відповідно: $E_{np\max} = \frac{0{,}72 q_{np}}{2\pi\varepsilon_0 n r_p}\left(1-\frac{0{,}6}{n}\right) = \frac{0{,}72 C U_\phi}{2\pi\varepsilon_0 n r_p}\left(1-\frac{0{,}6}{n}\right)$

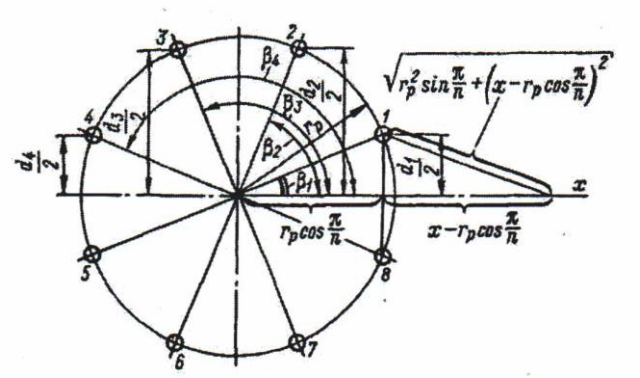


Рис. 4. До розрахунку розподілу напруженості поля вздовж осі гірлянди для багаторазово розщепленого дроту

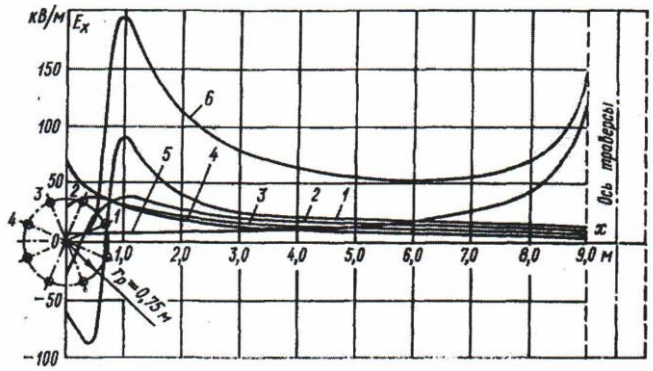


Рис. 5. Розподіл напруженості електричного поля вздовж осі підтримуючої гірлянди ізоляторів, при підвісці проводу 8АС 300/66

Тут (рис. 5): 1-4 – складові напруженості поля від заряду на 1,2,3 і 4-й парі складових відповідно; 5 – те ж від заряду на траверсі; 6 – сумарна напруженість поля від заряду дроту і траверси.

З урахуванням заряду на несучій рамі підтримуючого затискача і заряду траверси максимальна напруженість поля

$$E_{\max} = \frac{0{,}72 q_{пр}}{2\pi\varepsilon_0 r_p}\left(1 - \frac{0{,}6}{n}\right) + \frac{q_a}{2\pi\varepsilon_0\left(x_{экс} - x_a\right)} - \frac{q_T}{2\pi\varepsilon_0\left(H_T^{'} - H_{пр} - x_{экс}\right)},$$

де x_a – координата арматури (центру рами).

Найбільше падіння напруги на ізоляторі може бути визначено як добуток максимальної напруженості поля на будівельну висоту ізолятора: $\Delta U_{наиб} = E_{\max} H_u$.

Тому зменшення будівельної висоти ізоляторів є ефективним засобом обмеження падіння напруги на них.

При збільшенні величини ($x_{экс}$-x_a) найбільше падіння напруги зменшується. Найменше значення $\Delta U_{наиб}$ може бути отримано при розташуванні несучої рами поблизу від осі симетрії дроту $(x_a \approx 0)$.

Максимальне падіння напруги на ізоляторах гірлянди пропорційно робочій напрузі, робочій ємності фази і зворотньо пропорційно радіусу розщеплення дроту. Аналіз кривої 6 на рис. 5 дозволяє зробити висновок про те, що зміщення ізолятора від координати $x_{экс}$ до дроту призводить до зменшення падіння напруги на першому ізоляторі: $\Delta U_1 = \int_{x1}^{x2} E_{\max} dx$.

При цьому, оскільки відстань від арматури гірлянди, що знаходиться під високим потенціалом, до другого ізолятора більше, ніж до першого, максимальне падіння напруги на другому ізоляторі, наблизившомуся до зони максимуму напруженості поля, не досягає максимального значення на першому від дроту ізоляторі. Тому зменшення висоти a підвісу дроту до гірлянді призводить до зменшення найбільшого падіння напруги на ізоляторах гірлянди. При заглибленні ізолятора в простір між дротами (при

негативних значеннях *a*), зменшення падіння напруги на першому ізоляторі триває. Найменше значення $\Delta U_{наиб}$ може бути отримано при розташуванні несучої рами поблизу від осі симетрії дроту (X_a = 0). При цьому ізолятори повинні бути введені всередину розщепленої фази можливо ближче до несучої рами в область слабкого поля. Однак, слід зауважити, що при збільшенні числа складових у фазі відносне значення заряду на несучій рамі (по відношенню до заряду на дроті) зменшується, що зумовлює значно менший вплив заряду на рамі, ніж у розглянутому раніше випадку дворазово розщепленого дроту. Для глибокого утоплення гірлянди в дріт необхідно використовувати дві несучі рами, розташовані на деякій відстані одна від іншої. У цьому випадку найбільше падіння напруги зменшується до 5 % при r_p =0,6 м і до 3,5 % при r_p = 1 м. При збільшенні радіуса розщеплення до 1,5 м $\Delta U_{наиб}$ зменшується до 0,027 $U_ф$. Виходячи з допустимого падіння напруги на ізоляторі (40 кВ) і користуючись співвідношенням $U_{пн} = \Delta U_{доп} \frac{1}{\Delta U_{ном\%}} \frac{\sqrt{3}}{1{,}05}$ отримуємо відповідно до приведених радіусів розщеплення значення номінальних напруг лінії електропередачі: $U_{л.н}$= $U_{л.н}$=1320 кВ; $U_{л.н}$ = 1880 кВ и $U_{л.н}$ = 2400 кВ.

Таким чином, при відносно великих радіусах розщеплення $r_p \geq 1$ м утоплення гірлянди всередину розщепленого проводу приблизно до 1/3 від радіусу розщеплення забезпечує можливість використання тарільчастих ізоляторів на лініях електропередачі надвисокої напруги.

Мінімальний радіус розщеплення, необхідний для обмеження $\Delta U_{наиб}$ до допустимого значення $\Delta U_{доп}$, в залежності від найбільшої робочої напруги і висоти підвіски *a* може бути оцінений за наближеними формулами:

для одноланцюгових гірлянд:

$$r_{p.\min} = \left[\frac{(5{,}5 + 5a) U_{н.р.}^{0{,}6}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot \Delta U_{доп}} \right]^m$$

і для двохланцюгових гірлянд:

$$r_{p.\min} = \left[\frac{\left(5,5 + 5a\right) U_{н.р.}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot \Delta U_{доп}} \right]^m$$

де m = 3 при $r_p \geq 1{,}5$; m =4 при r_p>1,5 м, $a \geq$ -0,33 r_p; $U_{н.р.}$ і $\Delta U_{доп}$ – в мегавольтах. Як видно, для двохланцюгових гірлянд, припустимо використовувати менший радіус розщеплення (при розміщенні другого ланцюга вздовж проводу).

Таким чином, шляхом зміни конструкції вузла зчленування підтримуючої гірлянди з розщепленим дротом може бути забезпечена необхідна ступінь обмеження падіння напруги на ізоляторах без застосування додаткових екранів. Однак, слід зауважити, що в зоні розташування опори заряд на дротах, і відповідно напруженість поля збільшуються приблизно на 12 % у порівнянні з зарядом і напруженістю поля на дротах в прольоті. Для зменшення напруженості поля на дротах доцільно зменшити радіус розщеплення дроту в зоні розташування опори у порівнянні з радіусом розщеплення в прольоті. Зменшення r_p призводить до зменшення напруженості поля тільки при $r_p \geq 3{,}3nr_0$. При цьому відстань між осями сусідніх складових згідно з формулою:

$$d_{\min} = 2r_p \sin\frac{\pi}{n} = 6{,}6nr_0 \sin\frac{\pi}{n} \approx 6{,}6nr_0$$

Програма розрахунку розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів на лінії СВН.

Наведений вище алгоритм розрахунку розподілу напруги і напруженості вздовж гірлянди ізоляторів СВН, було реалізовано в якості функції користувача в програмному середовищі «MathCad». Текст функції користувача та результати розрахунків наведено нижче:

ORIGIN := 1

RASST(a, He, n, ro, rst, rtr, Hst, Htr, Dst, Dtr, Lstr, U) :=

$\alpha \leftarrow \frac{2 \cdot \pi}{n}$

$rr \leftarrow \frac{\frac{a}{200}}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$ if $a \neq 0$

$rr \leftarrow 0$ otherwise

$HET \leftarrow \frac{n}{2}$

$Man \leftarrow HET - floor(HET)$

if $Man \leq 0$

  for $i \in 1..n$

    $hz_i \leftarrow rr \cdot \cos\left[\pi - \alpha \cdot (i - 1) + \frac{\alpha}{2}\right]$

    $D_i \leftarrow rr \cdot \sin\left[\pi - \alpha \cdot (i - 1) + \frac{\alpha}{2}\right]$

    $h_i \leftarrow He - hz_i$

    $d_i \leftarrow Dtr - D_i$

    $h_{n+1} \leftarrow Hst$

    $h_{n+2} \leftarrow Htr$

    $d_{n+1} \leftarrow Dst$

    $d_{n+2} \leftarrow Dtr$

  d

if $Man > 0$

  for $i \in 1..n$

    $hz_i \leftarrow rr \cdot \cos[\pi - \alpha \cdot (i - 1)]$

    $D_i \leftarrow rr \cdot \sin[\pi - \alpha \cdot (i - 1)]$

    $h_i \leftarrow He - hz_i$

    $d_i \leftarrow Dtr - D_i$

    $h_{n+1} \leftarrow Hst$

    $h_{n+2} \leftarrow Htr$

    $d_{n+1} \leftarrow Dst$

    $d_{n+2} \leftarrow Dtr$

  d

$m \leftarrow n + 2$

for $i \in 1..m$

  for $j \in 1..m$

    if $i \neq j$

      $dr_{i,j} \leftarrow \sqrt{(d_i - d_j)^2 + (h_i - h_j)^2}$

      $hr_{i,j} \leftarrow \sqrt{(d_i - d_j)^2 + (h_i + h_j)^2}$

$$dr_{i,j} \leftarrow \frac{ro}{200}$$

$$dr_{i,j} \leftarrow rst \quad \text{if } i > n$$

$$dr_{i,j} \leftarrow rtr \quad \text{if } i > n + 1$$

$$hr_{i,j} \leftarrow 2 \cdot h_i$$

for $i \in 1..m$

$$Vu_i \leftarrow 1 \quad \text{if } i \le n$$

$$Vu_i \leftarrow 0 \quad \text{otherwise}$$

for $i \in 1..m$

for $j \in 1..m$

$$ko_{i,j} \leftarrow \ln\left(\frac{hr_{i,j}}{dr_{i,j}}\right)$$

$$K \leftarrow lsolve(ko, Vu)$$

for $j \in 1..m$

$$K_j \leftarrow K_j \cdot \left(55.56 \cdot U \cdot 0.81649 \cdot 10^{-9}\right)$$

$$hg \leftarrow \frac{Htr - He}{Lstr}$$

$$Ng \leftarrow floor(hg)$$

$$xo \leftarrow He + \frac{a}{2} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{n}\right)$$

for $i \in 1..hg$

$$x_i \leftarrow i \cdot Lstr$$

if $Man \le 0$

for $j \in 1..m - (m - n)$

$$\xi_j \leftarrow \operatorname{atan}\left[\frac{d_j}{\left(xo - h_j\right) + x_i}\right]$$

$$\theta_j \leftarrow \cos\left(\xi_j\right)$$

θ

$$E_i \leftarrow \left[\sum_{j=1}^{m-(m-n)} \frac{K_j}{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot n} \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{x_i - rr \cdot \cos\left[\frac{\pi}{n} \cdot (2 \cdot k - 1)\right]}{\left(x_i\right)^2 + rr^2 - 2 \cdot x_i \cdot rr \cdot \left[\cos\left[\frac{\pi}{n} \cdot (2 \cdot k - 1)\right]\right]}\right] \ldots + \frac{K_m}{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \left(Htr - He - x_i\right)}$$

$$Emax \leftarrow \left[\sum_{j=1}^{m-(m-n)} \frac{0.72 \cdot K_j}{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot rr} \cdot \left(1 - \frac{0.6}{n}\right)\right] \ldots + \frac{K_m}{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot \left(Htr - He - rr \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{n}\right)\right)}$$

$$rez_{i,1} \leftarrow E_i$$

$$\Delta Umax \leftarrow Emax \cdot Lstr$$

$$rez_{i,2} \leftarrow Emax$$

$$rez_{i,4} \leftarrow \Delta Umax$$

for $i \in 1..hg - 1$

$$\Delta U_i \leftarrow \frac{\left|E_{i+1} - E_i\right|}{\left|x_{i+1} - x_i\right|}$$

$$\Delta U_{i+1} \leftarrow \frac{\left|E_{i+1}\right|}{\left|x_{i+1}\right|}$$

$$rez_{i,3} \leftarrow \Delta U_i$$

rez

```
Programm := | U ← 750
            | a ← 50
            | He ← 15
            | ro ← 21.6 / 20
            | n ← 6
            | Lstr ← 650·10^-3
            | Htr ← 30
            | Hst ← 15
            | Dst ← 15
            | Dtr ← 0
            | ast ← 70
            | bst ← 70
            | atr ← 40
            | btr ← 40
            | rst ← 2·(ast + bst) / 2·π·100
            | rtr ← 2·(atr + btr) / 2·π·100
            | G ← RASST(a, He, n, ro, rst, rtr, Hst, Htr, Dst, Dtr, Lstr, U)
            | G
```

Programm =

	1	2	3	4
1	$1.862 \cdot 10^5$	$1.893 \cdot 10^5$	$1.129 \cdot 10^5$	$1.231 \cdot 10^5$
2	$1.128 \cdot 10^5$	$1.893 \cdot 10^5$	$5.642 \cdot 10^4$	$1.231 \cdot 10^5$
3	$7.616 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$2.835 \cdot 10^4$	$1.231 \cdot 10^5$
4	$5.773 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$1.694 \cdot 10^4$	$1.231 \cdot 10^5$
5	$4.671 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$1.122 \cdot 10^4$	$1.231 \cdot 10^5$
6	$3.942 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$7.932 \cdot 10^3$	$1.231 \cdot 10^5$
7	$3.427 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$5.864 \cdot 10^3$	$1.231 \cdot 10^5$
8	$3.045 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^5$	$4.47 \cdot 10^3$	$1.231 \cdot 10^5$

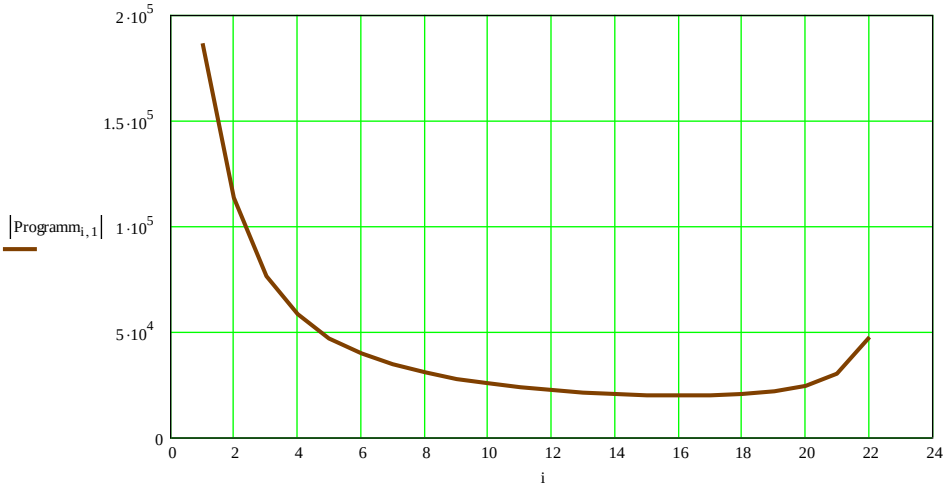


Рис. 6. Розподіл напруженості поля вздовж гірлянди ізоляторів

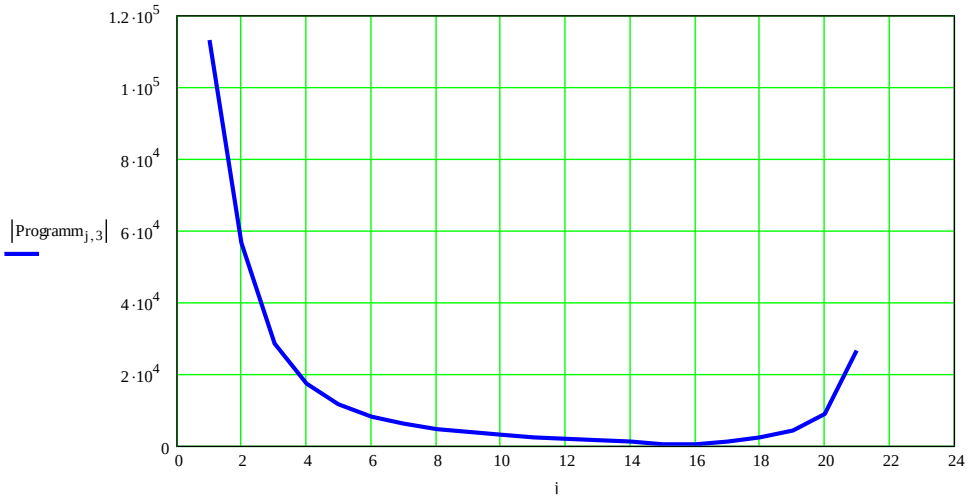


Рис. 7. Розподіл падіння напруги вздовж гірлянди ізоляторів

Висновок. В даній статті було проведено дослідження розподілу падіння напруги та напруженості електричного поля вздовж гірлянди підвісних ізоляторів, а також було запропоновано програмне рішення для простого та ефективно оціночного розрахунку зазначених параметрів ЛЕП. Результати використання програми показали правильну тенденцію зміни напруженості електричного поля вздовж ізолюючої підвіски для типової лінії 750 кВ з конструктивним виконанням фази 6xAC-240. Максимальне значення напруженості досягається поблизу фази і становить 189,3 кВ/м, а максимальне падіння напруги становить 123,1 кВ на ділянку.

Література

1. Техника высоких напряжений: учебное пособие / В.А. Бутенко, В.Ф. Важов, Ю.И. Кузнецов, Г.Е. Куртенков, В.А. Лавринович, А.В. Мытников, М.Т. Пичугина, Е.В. Старцева – Томск, 2008. – 119 с.
2. Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения): курс лекций / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко – Минск: БНТУ, 2011. – Ч.1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.
3. Теоретические основы электротехники. Учебник / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман и др. – СПб: Питер, 2003. - Т. 3. - 377 с.

4. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2011. – № 3. – С. 136 - 141.
5. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. / И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др.; Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб: изд. ПЭИПК, 1998. - 700 с.
6. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высш. школа. - 1973. - 528 с.
7. Кучинский Г.С., Кизевеггер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
8. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.