

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

КРИКУНОВ Юрій Володимирович



УДК 621.315

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЄМНІСНИХ
ТА СІТЧАСТИХ ЕКРАНІВ В ПРИСТРОЯХ
ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Спеціальність: 05.09.05 - теоретична електротехніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 1997

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України, м.Київ.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Кравченко Адольф Микитович,
Інститут електродинаміки НАН України,
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
член-кореспондент НАН України
Резцов Віктор Федорович,
Інститут електродинаміки НАН України,
керівник відділення;

- кандидат технічних наук
Онанко Анатолій Федорович,
Акціонерна компанія "ЕНПАС-ЕЛЕКТРО",
керівник відділу.

Провідна установа: Національний технічний університет України
"КПІ", кафедра техніки і електрофізики
високих напруг, МО України, м. Київ.

Захист відбудеться 29 жовтня 1997 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.98.02 при Інституті електродинаміки НАН України, за адресою: 252680, м. Київ - 57, просп. Перемоги, 56, тел. 446-91-15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України, за адресою: 252680, м. Київ-57, просп. Перемоги, 56

Автореферат розісланий "26" 09 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

ЛННБ України ім.В.Стефаника

Федій В.С.



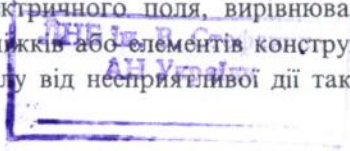
00751543 (P)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В електротехніці існує достатньо широке коло пристроїв, високовольтна ізоляція яких знаходиться в неоднорідному електричному полі. Для забезпечення необхідної електричної міцності цієї ізоляції, а для багатьох вимірювальних пристроїв також і для досягнення мінімальної похибки вимірювань необхідно створити однорідне або близьке до нього електричне поле. До таких пристроїв належать високовольтні вимірювальні трансформатори струму та напруги, прецизійні високовольтні подільники напруги, електрофізичні пристрої, електротехнологічні установки, високовольтні повітряні лінії електропередачі (ПЛ) тощо. Крім того, існуючі в ПЛ та відкритих розподільчих пристроях (ВРП) 500 - 1150 кВ рівні напруженості електричного поля перевищують допустимі для обслуговуючого персоналу норми і тому несприятливо впливають на людей та навколишнє середовище. Тому на робочих місцях в зоні обслуговування ПЛ та ВРП, на підходах до них, ділянках доріг, що перетинають лінії електропередачі, в багатьох випадках необхідно знизити напруженість електричного поля до допустимого рівня.

Проблема створення однорідного або близького до нього електричного поля в робочому об'ємі високовольтних пристроїв або його вирівнювання в певному виділеному напрямку вирішується шляхом застосування різних засобів: дією на джерела збудження поля (керуванням поля), створенням елементів конструкції цих пристроїв з правильно підібраними радіусами кривини, застосуванням напівпровідникових покриттів для послаблення поля біля гострих країв електродів, градируванням ізоляції в міжелектродному проміжку, гофруванням поверхонь ізоляційної конструкції, профільуванням ізоляційних покришок, розщепленням проводів, застосуванням поодиноких, подвійних та інших тороїдальних екранів, а також іншими спеціальними засобами.

Високоєфективним засобом вирівнювання електричного поля та зниження його напруженості до допустимого рівня є металічні сітчасті та ємнісні екрани, що мають достатньо високий коефіцієнт екранування і досить просту конструкцію. Проте широке застосування таких екранів у високовольтній техніці з метою екранування електричного поля, вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційних проміжків або елементів конструкції високовольтних пристроїв, захисту персоналу від несприятливої дії такого



поля в значній мірі стримується відсутністю ефективних і точних методів розрахунку таких екранів, а також у зв'язку з цим складністю створення їх оптимальних конструкцій.

Ця дисертаційна робота, що присвячена розробці методів розрахунку сітчастих та смісних екранів в пристроях високої напруги, якраз і спрямована на усунення цього недоліку. Впровадження результатів дисертації сприятиме підвищенню надійності роботи електричних мереж України.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами пошукових робіт Інституту електродинаміки НАН України: на 1994 - 1996 рр. НДР "Трансформатор - 1П", на 1997 - 1999 рр. НДР "Обмежувач".

Мета роботи - розробити ефективні методи розрахунку сітчастих екранів для екранування електричної складової поля високовольтних ліній електропередачі, а також смісних екранів для вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційних конструкцій високовольтних пристроїв.

Основні задачі дослідження:

- розвинути теорію крайових задач з усередненими граничними умовами на задачі електричного екранування сітчастими екранами;
- розробити методики розрахунку сітчастих екранів для екранування полів ПЛ та ВРП;
- обґрунтувати способи вирівнювання розподілу напруги уздовж довгих одноланцюгових і складених гірлянд ізоляторів;
- розробити методики розрахунку смісних екранів для вирівнювання напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних пристроїв.

Наукова новизна одержаних результатів:

- показана ефективність застосування усереднених граничних умов для розрахунку металічних сітчастих екранів;
- вперше розроблено методику розрахунку коефіцієнтів екранування електричної складової поля повітряних ліній електропередачі та відкритих розподільчих пристроїв сітчастими заземленими екранами, а також досліджено ефективність одно- та двошарових сітчастих екранів та електричних сітчастих парасольок;
- дістало подальший розвиток застосування смісних схем заміщення екранів в задачах вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляції високовольтних пристроїв.
- запропоновано нову методику розрахунку розподілу напруги уздовж довгих одноланцюгових та складених гірлянд ізоляторів на основі смісних схем заміщення;

- показана можливість вирівнювання розподілу напруги уздовж гірлянд ізоляторів за допомогою різних видів емнісних екранів та використання складених гірлянд ізоляторів;

- розв'язана задача синтезу емнісних екранів для вирівнювання розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та струму.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в дисертації методи розрахунку сітчастих та емнісних екранів можуть бути ефективно використані в техніці високих напруг для екранування електричної складової поля ПЛ та ВРП, створення гірлянд ізоляторів і вимірювальних трансформаторів з підвищеною електричною міцністю ізоляції. Встановлено основні співвідношення між геометричними параметрами екранів, місцем їх розміщення, характеристиками електричного поля для досягнення необхідного коефіцієнта екранування поля або вирівнювання його розподілу уздовж ізоляції. Ефективність використання цих співвідношень продемонстровано розв'язками задач екранування електричного поля ПЛ і ВРП, вирівнювання розподілу електричного поля уздовж гірлянд ізоляторів та зовнішньої ізоляції вимірювальних трансформаторів. Отримані рішення прикладних задач передано для впровадження Рівненському дослідному підприємству "Рівнеелектротехнологія" і вони використовуються для створення електрозахисних засобів різного призначення.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на засіданні розширеного наукового семінару відділів № 6, 7 Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ, 1996 р., 1997 р.), на науково-технічній раді Рівненського дослідного підприємства "Рівнеелектротехнологія" (м. Рівне, 1997 р.).

Публікація результатів наукових досліджень. Основний зміст дисертації відображено в опублікованих у наукових виданнях 5 роботах автора (3 статті в наукових журналах, 2 препринта).

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота загальним обсягом 135 сторінок складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 98 найменувань, а також 38 рисунків, 9 таблиць і одного додатка, що розміщені на 33 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність та доцільність роботи, описано ступінь дослідження тематики дисертації, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, визначено методи дослідження, викладено основні положення, наукову новизну, практичну цінність та реалізацію результатів дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено розробці методів розрахунку екранування електричних полів сітчастими екранами на основі використання усереднених граничних умов.

Постановка задачі електричного екранування сітчастим екраном полягає в наступному. Нехай на границі $\partial\Omega$, що відокремлює внутрішню діелектричну область Ω_- від зовнішньої області Ω_+ , розміщено сітчастий

металічний екран із захисною характеристикою $\lambda = \left(\frac{b}{2\pi} \ln \frac{b}{\pi a}\right)^{-1}$ (рис. 1).

Потенціал зовнішнього поля $u^{(зовн)}$, в яке вноситься екран, і підведений до металічної сітки потенціал u_c вважаються заданими. Необхідно визначити поле в діелектрику всередині та зовні поверхні $\partial\Omega$. Ця задача зводиться до розв'язку рівняння Лапласа відносно потенціалу $u(x)$

$$\Delta u(x) = 0, \quad (1)$$

при усереднених умовах на поверхні екрана $\partial\Omega$

$$\left. \left(\frac{\partial u^+}{\partial n} - \frac{\partial u^-}{\partial n} \right) \right|_{\partial\Omega} = \lambda (u - u_c) \Big|_{\partial\Omega};$$

$$u^+ \Big|_{\partial\Omega} = u^- \Big|_{\partial\Omega} = u \Big|_{\partial\Omega} \quad (2)$$

та при умові випромінювання для $u - u^{(зовн)}$ на нескінченності.

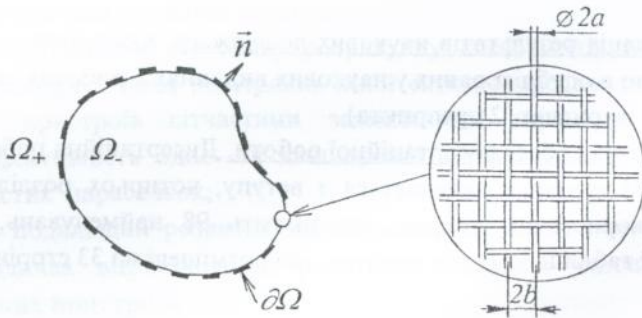


Рис. 1

Усереднені граничні умови (2) широко використовуються в радіоелектроніці; в електротехніці вони вперше були застосовані Є.І. Удодом і

Л.П. Нижником при розрахунках екрануючих характеристик індивідуальних захисних комплектів для проведення робіт під напругою.

Ефективність екранів характеризується коефіцієнтом екранування k_E екрана по електричному полю, який визначається відношенням величини напруженості електричного поля без екрана до напруженості поля з екраном. Наведено докладний вивід формули для коефіцієнтів екранування сферичними та циліндричними сітчастими екранами радіусом R однорідного електричного поля: $k_E = (1/3) \lambda R + 1$ для сферичного екрана і $k_E = (1/2) \lambda R + 1$ для циліндричного екрана. Показано, що ці значення коефіцієнтів екранування наближено виконуються і у випадку неоднорідного електричного поля.

Розглянуто задачу екранування однорідного електричного поля $E^{(зовн)}$ над поверхнею землі плоским заземленим сітчастим екраном, розміщеним на висоті l від поверхні землі. З урахуванням того, що таке поле створюється плоским конденсатором, одна з пластин якого є поверхнею землі і знаходиться під нульовим потенціалом, а друга - на висоті h від поверхні землі під потенціалом фази, отримано формулу для коефіцієнта екранування:

$$k_E = 1 + \lambda l (1 - l/h). \quad (3)$$

З цієї формули, зокрема, випливає, що при $h \gg l$ використання навіть рідких сіток ($b = l/5$) з тонких ($a = 0,001 b$) проводів дає значний коефіцієнт екранування ($k_E \geq 6$). Вказано розрахунковий та експериментальний способи визначення захисної характеристики сітчастих екранів.

Другий розділ дисертації присвячено дослідженню екранування електричної складової поля ПЛ та ВРП сітчастими екранами.

Наведено дані про рівні напруженості електричного поля на різних ділянках ПЛ та ВРП напругою 220 - 1150 кВ, виконано аналіз несприятливої дії поля цих ліній та ВРП на людей і оточуюче середовище. Наведено нормативні дані про допустимі рівні напруженості електричного поля та тривалість перебування людини в електричному полі без захисних засобів, а також відомості про найтиповіші конструкції електрозахисних засобів, що застосовуються на ПЛ та ВРП. Такі дані використовуються для прийняття рішення щодо необхідності екранування конкретних ділянок території в зоні ПЛ та ВРП, робочих місць в зоні обслуговування обладнання ПЛ та ВРП, підходів до них, пішохідних доріжок та ділянок дороги, що перетинають ПЛ.

Вивчено ефективність екранування підвісними заземленими сітчастими екранами просторово-періодичного електричного поля, що збуджується над поверхнею землі достатньо віддаленими від неї джерелами. Для коефіцієнта екранування отримано формулу

$$k_E = 1 + \lambda e^{-\pi l/L} \frac{\text{sh}(\pi l/L)}{\pi/L}, \quad (4)$$

де $2L$ - просторовий період поля. Якщо просторовий період поля $2L \gg l$, то $k_E = 1 + \lambda l$; якщо $2L \ll l$, то $k_E = 1 + \lambda L/(2\pi)$.

Розв'язано задачу екранування електричного поля проводу із струмом, який розміщено паралельно поверхні землі на висоті h від неї і який знаходиться під потенціалом фази, плоским заземленим сітчастим екраном, розміщеним на висоті $l < h$. Для такого проводу із струмом напруженість електричного поля на поверхні землі у разі відсутності екрана виражається у

$$\text{вигляді } E^{(\text{зовн})}(x) = E_{\text{max}}^{(\text{зовн})} \frac{h^2}{x^2 + h^2}, \text{ а за його наявності визначається}$$

розв'язком задачі (1), (2). При цьому напруженість електричного поля на поверхні землі на відстані x визначається формулою

$$E(x) = \frac{1}{1 + \lambda l} \left[1 + \frac{\lambda l^2}{(1 + \lambda l)h} \frac{h^2 - x^2}{h^2 + x^2} \right] E^{(\text{зовн})}(x), \quad (5)$$

з якої випливає, що коефіцієнт екранування сітчастим екраном поля проводу із струмом залежить від координати x . Проте для області великих напруженостей поля, тобто безпосередньо поблизу проводу, він наближено співпадає з коефіцієнтом екранування (3) однорідного поля.

Розглянуто задачу підвищення ефективності екранування зовнішнього однорідного електричного поля за допомогою двошарових заземлених сітчастих екранів. Показано, що захисна характеристика λ двошарового екрана виражається через захисні характеристики λ_1 і λ_2 кожного з шарів екрана і відстань d між ними формулою

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 d. \quad (6)$$

Формула (6) показує, що при малій відстані між шарами екрана ефективна екрануюча здатність підсумовується з екрануючих характеристик кожного з них. Проте, якщо відстань d між шарами екрана істотно перевищує середній розмір комірок сітки, відбувається ефект помноження коефіцієнтів екранування кожного з шарів. Це можна використати для одержання дуже великих коефіцієнтів екранування рідкими металічними сітками зі значною економією матеріалу екрана.

Для розрахунку сітчастих екранів складної форми, що мають замкнену поверхню S та знаходяться у відомому зовнішньому полі $u^{(\text{зовн})}$, одержано таке інтегральне представлення для розв'язку задачі (1), (2):

$$u(x) = u^{(\text{зовн})}(x) - \frac{\lambda}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \frac{1}{|x - y|} (u(y) - u_c) d\sigma(y), \quad (7)$$

тобто потенціал $u(x)$ в довільній точці x в явному вигляді виражається через розподіл потенціалу на поверхні екрана. Для знаходження останнього необхідно в (7) розглядати змінну x на поверхні екрана і тоді рівність (7) перетворюється на інтегральне рівняння Фредгольма II роду відносно значення потенціалу на поверхні екрана.

Рівняння (7) можна використати для одержання наближених аналітичних та чисельних розв'язків цілої низки задач екранування електричного поля сітчастими екранами. Зокрема, це рівняння використано для розв'язання

задачі розрахунку ефективності екранування однорідного електричного поля заземленою сітчастою круговою парасолькою радіусом R , розміщеною над поверхнею землі на висоті l від неї. Для коефіцієнта екранування електричного поля такою парасолькою одержано наближену формулу

$$k_E = 1 + \frac{\lambda L}{2} (\sin \theta + \cos \theta - 1), \quad (8)$$

де $L = \sqrt{4l^2 + R^2}$ - характеристика розміру і висоти парасольки; θ - кут, що характеризує розхил парасольки: $\operatorname{tg} \theta = R/(2l)$. З цієї формули при $R \rightarrow \infty$ і постійному $l \ll h$ випливає одержаний раніш вираз для коефіцієнта екранування плоским сітчастим екраном однорідного поля: $k_E = 1 + \lambda l$.

В третьому розділі розглядаються способи вирівнювання розподілу напруги уздовж довгих гірлянд ізоляторів ПЛ за допомогою ємнісних екранів. Внаслідок великої довжини таких гірлянд, а також нерівномірності зовнішнього поля, в якому вони знаходяться, напруга уздовж гірлянд розподіляється дуже нерівномірно: для ПЛ 500 кВ ступінь нерівномірності розподілу напруги становить 2 - 3, для ПЛ 1150 кВ - 5 - 7. В першому підрозділі на основі відомих експериментальних даних виконано аналіз розподілу напруги по елементах п'ятиланцюгової натяжної та дволанцюгової підтримуючої гірлянд ізоляторів ПЛ 750 кВ.

З метою підвищення точності розрахунку розподілу напруги уздовж довгих гірлянд ізоляторів і розрахунку екранів, що вирівнюють розподіл напруги, запропоновано нову ємнісну схему заміщення таких гірлянд, що знаходяться у відомому зовнішньому електричному полі. При цьому сама гірлянда має вигляд послідовно з'єднаних ємностей C , до яких через бокові ємності $C^{(б)}$ підключені потенціали $u_n^{(з\text{овн})}$, що характеризують зовнішнє поле (рис. 2). Рівняння Кірхгофа, що відповідають цій схемі, мають вигляд:

$$C (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) = C^{(б)} (u_n - u_n^{(з\text{овн})});$$

$$u_0 = u^{(\Phi)}, \quad u_N = 0; \quad n = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (9)$$

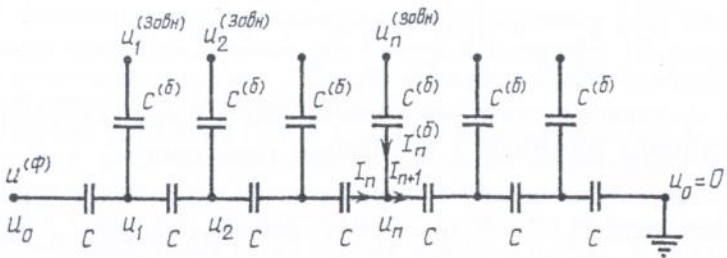


Рис. 2

У практично важливому випадку змінювання зовнішнього поля уздовж гірлянди по закону, близькому до лінійного: $u_n^{(з\text{овн})} = u_0^{(з\text{овн})} (1 - n/N) + u_N^{(з\text{овн})} n/N$, розв'язок рівнянь (9) має вигляд

$$u_n = u_n^{(\text{зовн})} + \left(u^{(\Phi)} - u_0^{(\text{зовн})} \right) \alpha^n - u_N^{(\text{зовн})} \alpha^{N-n}, \quad (10)$$

де α - характеристика ізолятора, яка для звичайних ізоляторів близька до 0,9. З розв'язку (10) випливає, що напруга уздовж гірлянди ізоляторів розподіляється так само, як зовнішнє поле, за винятком зон поблизу кінців гірлянди, де має місце експоненціальне змінювання напруги, що забезпечує задані потенціали на кінцях гірлянди.

Практично важливим є вивчення розподілу падіння напруги на окремих елементах гірлянди ізоляторів, тобто закон змінювання $\Delta u_n = u_{n-1} - u_n$ залежно від номера n ізолятора. У зв'язку з цим було запропоновано методику розрахунку розподілу напруги по елементах гірлянди ізоляторів, в основу якої була покладена залежність (10). Використання цієї методики для розрахунку розподілу спадання напруги уздовж дволанцюгової підтримуючої гірлянди ізоляторів ПЛ 750 кВ ($u^{(\Phi)} = 433$ кВ, 41 ПС 120) показало, що розподіл спадання напруги на окремих ізоляторах цієї гірлянди підпорядковується залежності

$$\Delta u_n \% = 0,375 \left[0,9^{n-25} + 0,9^{25-n} \right] + 0,85. \quad (11)$$

За розробленою методикою виконано розрахунки розподілу спадання напруги на окремих ізоляторах натяжної та підтримуючої гірлянд ізоляторів ПЛ 750 кВ і проведено співставлення з експериментальними значеннями. Співставлення розрахункових та експериментальних значень спадання напруги на окремих ізоляторах гірлянд показало, що вони відрізняються між собою менше ніж на 3%, що підтверджує високу точність цієї методики.

З метою вирівнювання розподілу напруги уздовж довгих гірлянд ізоляторів у ряді випадків їх виготовляють з різних частин, використовуючи при цьому ізолятори з різними характеристиками або виконуючи окремі частини гірлянди з різної кількості ланцюгів. Оскільки розрахунок розподілу напруги уздовж таких комбінованих гірлянд недостатньо розроблено, було запропоновано методику визначення розподілу напруги уздовж складеної гірлянди, виконаної з двох частин гірлянд: дволанцюгової (з m ізоляторів) і одноланцюгової (з $N - m$ ізоляторів) (рис. 3). Розподіл напруги уздовж кожної з цих частин аналогічний (10) і має вигляд:

$$u_n = u_n^{(\text{зовн})} + A_1 \alpha_1^n + B_1 \alpha_1^{m-n}, \quad 0 \leq n \leq m; \quad (12)$$

$$u_n = u_n^{(\text{зовн})} + A_2 \alpha_2^n + B_2 \alpha_2^{m-n}, \quad m \leq n \leq N, \quad (13)$$

де α_1 і α_2 - характеристики ізоляторів першої (здвоєної) і другої (одиначної) частин гірлянд ізоляторів з прохідними ємностями C_1 і C_2 , а постійні A_1 , A_2 , A_3 і A_4 визначаються через граничні умови, тобто через $u^{(\Phi)}$ і u_m . У випадку, коли $C_1/C_2 = 2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, величина напруги u_m визначається формулою

$$u_m = u_m^{(\text{зовн})} + \frac{2 \left(\alpha^m + \alpha^{m-1} \right) \left(u^{(\Phi)} - u_0^{(\text{зовн})} \right) + 10 \left(1 - \alpha^{2m} \right) \left(u_m^{(\text{зовн})} - u_{m+1}^{(\text{зовн})} \right)}{3,1 + 2\alpha^{2m-1} - 1,1 \alpha^{2m}}. \quad (14)$$

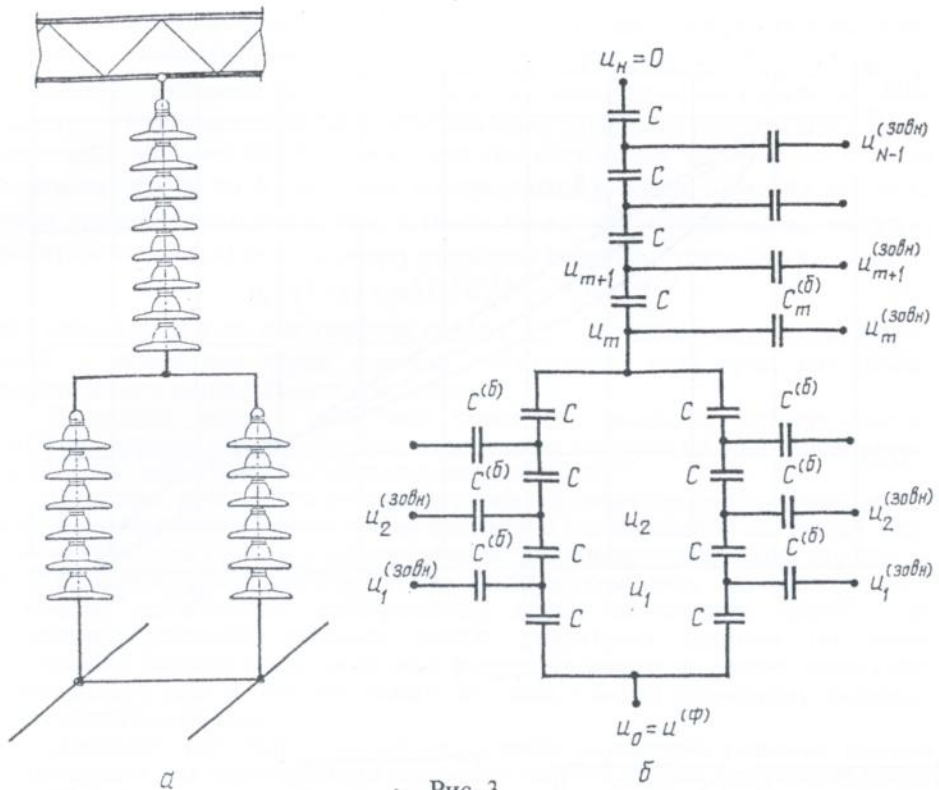


Рис. 3

Розглянуто приклади розрахунку розподілу напруги уздовж складеної гірлянди ізоляторів і показано, що для визначення оптимальної кількості m здвоєних ланцюгів можна використати умову, яка полягає в тому, що спадання потенціалів на першому ізоляторі першої (здвоєної) і другої (одиначної) частин гірлянди повинні співпадати. Розглянуто приклад, коли в першій частині складеної гірлянди кількість ізоляторів становить 5 шт. ($m = 5$). На рис. 4 подано розподіл відносних значень напруги $u / u^{(ф)}$ уздовж складеної гірлянди ізоляторів залежно від номера n ізолятора. На рисунку позначено такі розподіли напруги: 1 - уздовж одноступової гірлянди; 2 - уздовж складеної гірлянди; 3 - рівномірний розподіл.

Показано, що для ПЛ 500 кВ і вище для вирівнювання розподілу напруги уздовж гірлянди крім використання спеціальних конструкцій таких гірлянд досить ефективним є використання електричних ємнісних екранів, що змінюють зовнішнє поле в зоні гірлянд та ємності ізоляторів на фазу і землю. Можливі способи розташування таких екранів наведено на рис. 5, на якому екрани виду *a*) підвищують зовнішнє електричне поле в початковій частині гірлянди, екрани виду *б*) зменшують поле в кінці цієї гірлянди.

Розглянуто задачу вирівнювання розподілу напруги уздовж підтримуючої гірлянди ємнісним екраном, призначеним підвищувати потенціал m -го ізолятора до рівня рівномірного розподілу (рис. 6а). Для такої гірлянди з ек-

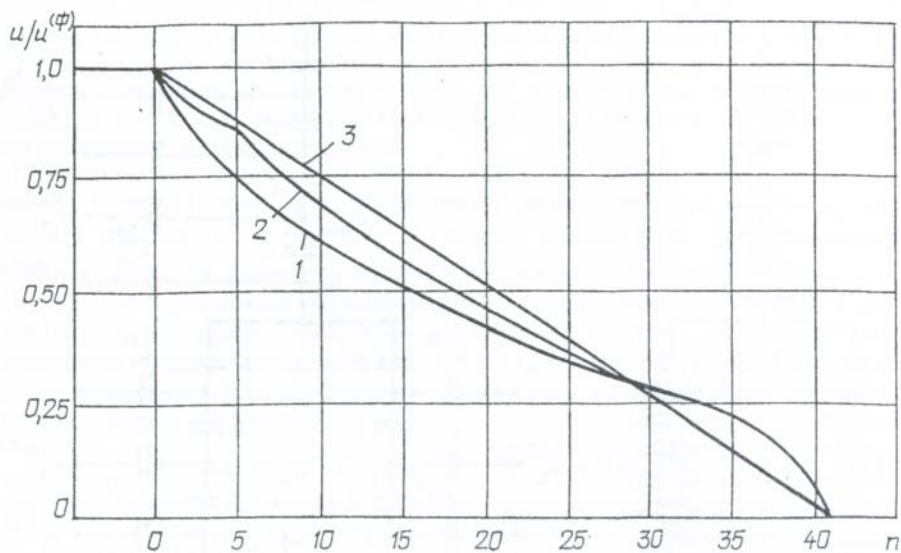


Рис. 4

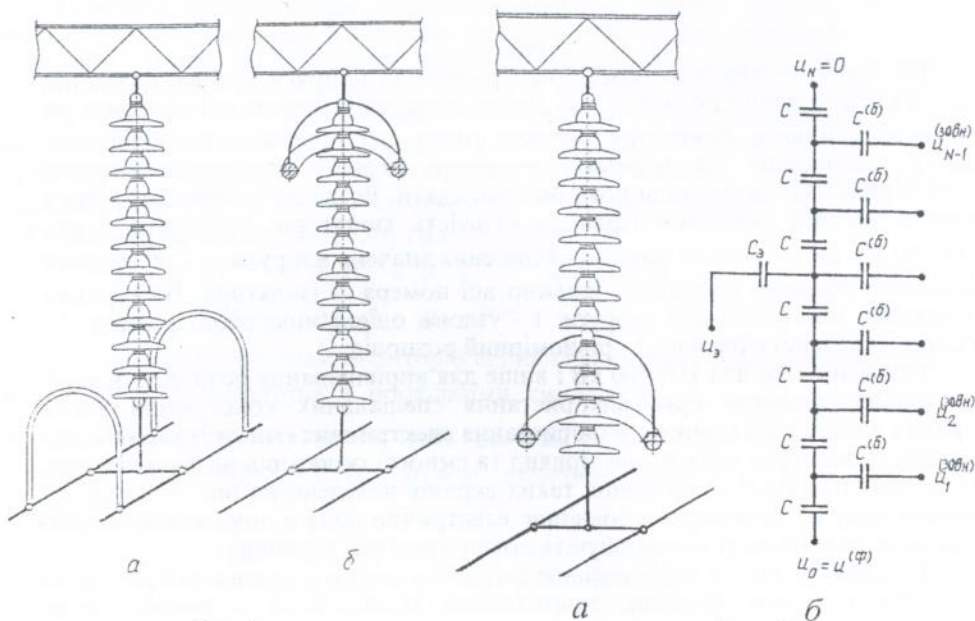


Рис. 5

Рис. 6

раном на m -му ізоляторі метод розрахунку розподілу напруги полягає в наступному. Вважатимемо, що тороїдальний екран з власною ємністю C_s , розміщено в заданому зовнішньому полі u_s і електрично під'єднано до m -го ізолятора. Тоді ємнісна схема заміщення такої гірлянди з екраном має вигляд, наведений на рис. 6б. Розбивши всю гірлянду на дві частини: від 1 до m ізолятора і від m до N ізолятора, використавши рівняння Кірхгофа для m -го вузла ємнісної схеми заміщення, а також умову, щоб потенціал u_m на m -му ізоляторі відповідав рівномірному розподілу напруги, отримуємо залежність

$$u_s = [1 + (1 - \alpha) C / C_s] (1 - m/N) u^{(\Phi)}, \quad (15)$$

яка визначає зв'язок між ємністю екрана C_s і потенціалом u_s зовнішнього поля, в якому цей екран повинен знаходитись, щоб було забезпечено вирівнювання напруги уздовж гірлянди.

Четвертий розділ дисертації присвячено розробці методів синтезу ємнісних екранів для вирівнювання розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних пристроїв.

Показана можливість розрахунку вирівнюючих ємнісних екранів на основі використання ємнісної схеми заміщення ізоляційних конструкцій високовольтних пристроїв, а в задачах синтезу вирівнюючих ємнісних екранів також на основі нової ємнісної схеми заміщення екранів, що знаходяться в відомому зовнішньому електричному полі. Застосування такої схеми заміщення дозволяє загальну задачу розрахунку напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних пристроїв звести до задачі розрахунку зовнішнього поля в зоні, яку займає ізоляція, і задачі розрахунку ємнісного кола схеми заміщення.

Докладно розглянуто спосіб визначення параметрів ємнісних екранів, призначених для вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційних конструкцій вимірювальних трансформаторів напруги та струму.

Ескіз конструкції вимірювального трансформатора струму з дзеркальним відображенням показано на рис. 7а, а ємнісну схему заміщення його ізоляційної конструкції - на рисунку 7б. На цих рисунках позначено: 1 - провідник із струмом, що вимірюється; 2 - циліндрична ізоляційна покривка радіусом R і висотою h_{i3} ; 3 - металічний (ємнісний екран), призначений для вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційної конструкції; 4 - заземлена металічна труба радіусом r ; 5 - нижня ізоляційна кришка висотою h ; 6 - будівельна основа висотою $h_{бод}$; $\hat{C}_n^{(\Phi)}$, $n \geq 0$ - ємності елементів ізоляційної конструкції на конструктивні елементи трансформатора струму, що знаходяться під потенціалом фази; $\hat{C}_{-n}^{(\Phi)}$, $n \geq 0$, $\hat{C}_n^{(T)}$ - ємності дзеркально відображених елементів ізоляційної конструкції на фазу і на заземлену трубу; $u_0 = 0$ - потенціал землі; $u_N = u^{(\Phi)}$ - потенціал фази; $n = 1, 2, \dots, N-1$.

Показано, що розподіл ємностей вирівнюючих екранів підпорядковується квадратичній залежності

$$C_n = C (n - n_0)^2 + C_{min}, \quad (16)$$

в якій $n_0 \approx 0$, а для коефіцієнта C отримані явні вирази, що враховують конструктивні особливості вимірювального трансформатора струму.

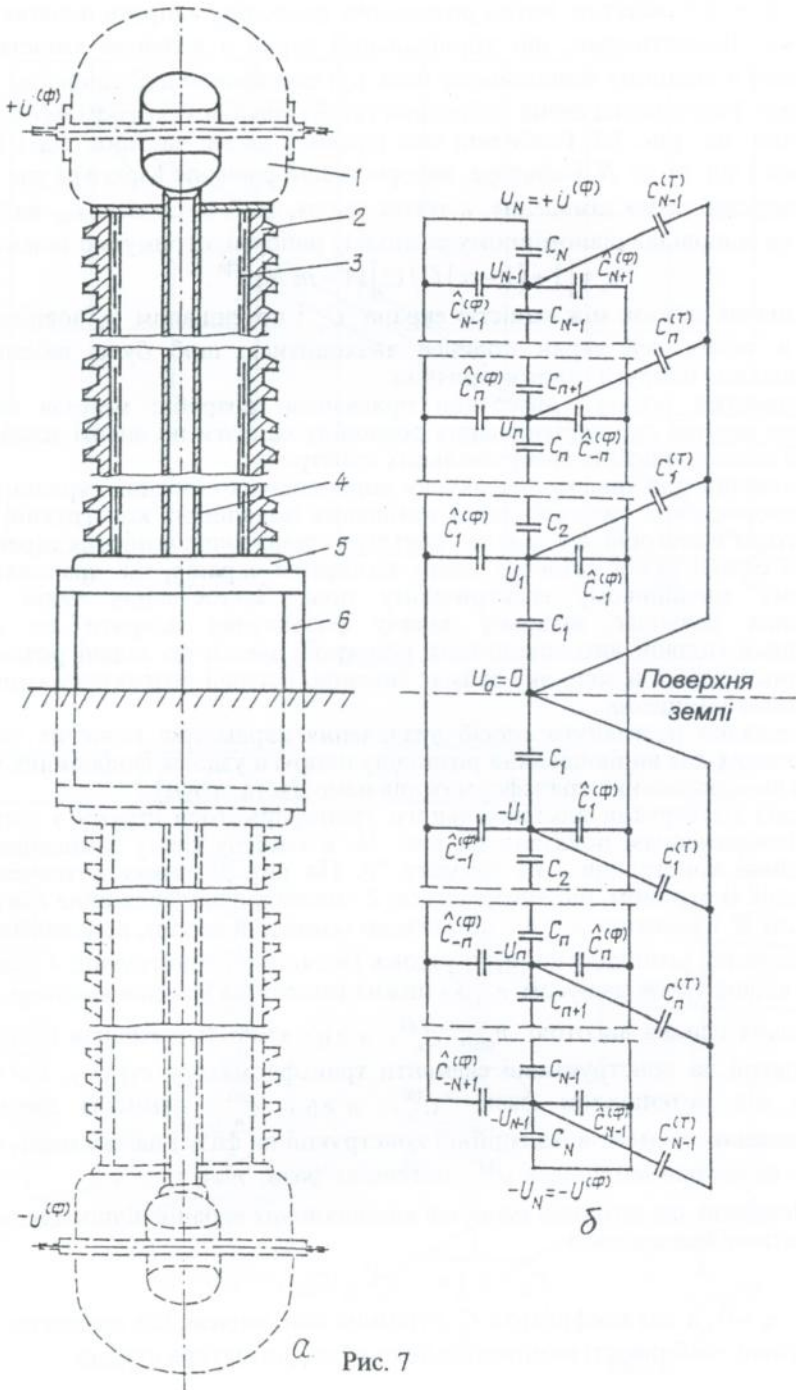


Рис. 7

Аналогічні розрахунки параметрів вирівнюючих ємнісних екранів отримано для вимірювальних трансформаторів напруги, в яких на відміну від вимірювальних трансформаторів струму металічна труба знаходиться під потенціалом фази. Зокрема показано, що для вимірювальних трансформаторів напруги також має місце квадратична залежність (16), в якій $n_0 \approx N$, а коефіцієнт C в явному виді визначається через конструктивні параметри такого трансформатора.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Відсутність точних і ефективних методів розрахунку ємнісних та сітчастих екранів в пристроях високої напруги стримує створення оптимальних конструкцій таких екранів і їх широке застосування в техніці високих напруг.

2. Запропоновано метод розрахунку ефективності екранування електричного поля сітчастими металічними екранами на основі використання усереднених граничних умов, що містять захисну характеристику матеріалу сітчастого екрана. Одержано формули для коефіцієнтів екранування сітчастих екранів простих геометричних форм і показано, що використання в таких екранах навіть рідких сіток з тонких проводів при екрануванні електричного поля ліній електропередачі дає значний (шестикратний) коефіцієнт екранування.

3. Розв'язано задачу розрахунку екранування електричної складової поля високовольтих ліній електропередачі і показано, що коефіцієнт екранування одношарового сітчастого екрана пропорційний відношенню висоти підвісу екрана до середньої величини вічок сітки.

4. Розв'язано задачу підвищення ефективності екранування однорідного електричного поля за допомогою двошарових сітчастих екранів. Показано, що у випадку, коли відстань між шарами екрана значно перевищує середній розмір вічок сітки, виникає ефект помноження коефіцієнтів екранування кожного з шарів, що можна використати для одержання великих (понад 100) коефіцієнтів екранування рідкими металічними сітками із значною (чотирикратною) економією матеріалу екрана.

5. На основі інтегрального представлення задачі електричного екранування для рівняння Лапласа з усередненими граничними умовами і зведення її до інтегрального рівняння Фредгольма II роду розроблено методику розрахунку коефіцієнтів екранування замкненими сітчастими екранами, що мають складну форму і знаходяться у заданому зовнішньому електричному полі. Метод використано для розрахунку ефективності екранування однорідного електричного поля заземленим круговим сітчастим екраном (електричною сітчастою парасолькою).

6. Запропоновано методику розрахунку розподілу напруги уздовж довгих одноланцюгових і складених гірлянд ізоляторів повітряних ліній електропередач, що ґрунтується на ємнісній схемі заміщення гірлянди, яка знаходиться у відомому зовнішньому полі. При цьому розподіл напруги уздовж гірлянд визначається зовнішнім полем і характеристикою ізоляторів. Показана ефективність використання складених гірлянд ізоляторів для вирівнювання розподілу напруги уздовж них порівняно з відомими

одиначними гірляндами і подано спосіб розрахунку оптимальної конструкції таких гірлянд.

7. Розроблено метод розрахунку різних видів ємнісних екранів для вирівнювання розподілу напруги уздовж довгих гірлянд ізоляторів, які розміщуються поблизу кінців і в нижній частині підтримуючих гірлянд ізоляторів.

8. Розроблено методи розрахунку ємнісних екранів для вирівнювання розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних пристроїв на основі ємнісної схеми заміщення такої ізоляції. Для визначення параметрів такої схеми заміщення ефективним є використання метода дзеркальних відображень. Розроблений метод використано для розрахунку параметрів ємнісних екранів для вимірювальних трансформаторів напруги і струму.

9. Розв'язано задачу синтезу ємнісних екранів, призначених для вирівнювання розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції вимірювальних трансформаторів напруги і струму на основі ємнісної схеми заміщення для системи екранів, що знаходяться у заданому зовнішньому електричному полі. Загальну задачу розрахунку розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтного пристрою зведено до задачі розрахунку зовнішнього поля в зоні, яку займає ця ізоляція, і задачі розрахунку ємнісного кола схеми заміщення.

10. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задач, що розв'язуються, використанням для їх розв'язання строгих математичних методів, узгодженням результатів з даними інших авторів, а також з даними експериментальних досліджень.

11. Отримані в дисертації нові теоритичні результати можуть бути використані в учбовому процесі при читанні курсів теоретичної електротехніки, техніки і електрофізики високих напруг. Розроблені методи розрахунку сітчастих та ємнісних екранів можуть бути впроваджені в інженерну практику для створення більш ефективних конструкцій електричних мереж і високовольтних пристроїв.

ПУБЛІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крикунов Ю.В. Экранирование электрической составляющей поля высоковольтных линий электропередачи сеточными экранами //Техн. электродинамика. - 1996. - № 5. - С. 14 - 17.

2. Крикунов Ю.В. Выравнивание распределения напряжения вдоль длинных гирлянд изоляторов с помощью емкостных экранов //Энергетика и электрификация. - 1997.-№ 1.- С. 19 - 20.

3. Крикунов Ю.В. Емкостные экраны для выравнивания распределения напряжения по высоте внешней изоляции высоковольтных измерительных устройств //Техн. электродинамика. - 1997. - №3. - С. 6 - 9.

4. Крикунов Ю.В. Емкостные экраны для выравнивания распределения напряжения вдоль изоляционных конструкций высоковольтных измерительных устройств. - К.: 1997. -20 с. (Препр. /НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 801).

5. Крикунов Ю.В. Расчет распределения напряжения вдоль составных гирлянд изоляторов. - К.: 1997. -20 с. (Препр. /НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 804).

Крикунов Ю.В. Методи розрахунку ємнісних і сітчастих екранів в пристроях високої напруги. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 - теоретична електротехніка. - Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1997.

Дисертація містить результати теоретичних досліджень по розробці методів розрахунку сітчастих екранів для екранування електричної складової поля високовольтних ліній електропередачі на основі усереднених граничних умов. В роботі також розвинуто методи розрахунку ємнісних екранів для вирівнювання розподілу напруги по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних приладів на основі ємнісних схем заміщення. Показана ефективність використання таких екранів для екранування поля ліній електропередачі, вирівнювання напруги уздовж гірлянд ізоляторів і по висоті зовнішньої ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги і струму.

Ключові слова: сітчасті та ємнісні екрани, пристрої високої напруги, усереднені граничні умови.

Крикунов Ю.В. Методы расчета емкостных и сетчатых экранов в устройствах высокого напряжения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.05 - теоретическая электротехника. - Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 1997.

Диссертация содержит результаты теоретических исследований по разработке методов расчета сетчатых экранов для экранирования электрической составляющей поля высоковольтных линий электропередачи на основе усредненных граничных условий. В работе также развиты методы расчета емкостных экранов для выравнивания распределения напряжения по высоте внешней изоляции высоковольтных измерительных устройств на основе емкостных схем замещения. Показана эффективность применения таких экранов для экранирования поля линий электропередачи, выравнивания напряжения вдоль гирлянд изоляторов и по высоте внешней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Ключевые слова: сетчатые и емкостные экраны, устройства высокого напряжения, усредненные граничные условия.

Krikunov Yu.V. Calculational methods for capacitor and net screens in high-voltage devices. - Manuscript.

Thesis for the doctor's degree by speciality 05.09.05 - theoretical electric engineering. - The Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1997.

The dissertatin contains the research results of theoretical investigation on development of calculating methods of net screens for screening of electric field component of high-voltage power lines on the basis of averaged boundary conditions. The work developments of calculating methods of capacitor screens for voltage distribution equalization in height of external insulation of high-voltage measuring devices on the basis of capacitor equivalent circuits. Efficiency of the use of such screens for field screening of power lines, for voltage equalization along insulator string and in height of external insulation of high-voltage measuring voltage- and current-transformers are presented.

Key words: net and capacitor screens, high-voltage devices, averaged boundary conditions.

Підписано до друку 25.09.1997 р. Формат 60x90/16.

Папір офсетний. Формат видання 145x215 мм.

Умовн. - друк. арк. 1,0. Обл. - вид. аркуш 1,0. Тираж 100. Замовл. 258.

Поліграф. дільн. Інституту електродинаміки НАН України
252680, Київ-57, проспект Перемоги, 56

AB 28.24

AB 38.541

AB 38.541