

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАЗИТНИХ ЄМНОСТЕЙ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОЛАХ ШИРОКОСМУГОВИХ ПОДІЛЬНИКІВ НАПРУГИ

Гаран Я. О., ст. викладач, к.т.н., Почтар Я. С., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Високовольтні широкосмугові подільники напруги використовуються в якості високоточних масштабних перетворювачів напруги при випробуванні і діагностуванні високовольтного електрообладнання, а також для вимірювання напруги і при дослідженні показників якості електроенергії у відповідних вузлах високовольтної електромережі. Під час масштабного перетворення високої напруги підвищеної частоти або швидкоплинних імпульсів напруги суттєвого впливу на амплітудні та частотні характеристики подільника напруги набувають паразитні ємності та паразитні індуктивності зосереджених елементів, які розташовані у його високовольтному плечі [1].

Для визначення паразитних властивостей зосереджених елементів високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги користуються частиною параметрів цих елементів, які надаються виробником (власні паразитні ємності та індуктивності), а також визначають паразитні ємності зосереджених елементів електричного кола між собою, а також на провідні частини конструкції самого подільника напруги і оточуючих предметів і заземлених поверхонь. Аналітичні методи визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча подільника напруги являють собою складну задачу внаслідок складної геометрії взаємного розташування зосереджених елементів та інших елементів конструкції подільника напруги. Відповідно, більш актуальними і продуктивними можуть бути методи визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча подільника напруги чисельними методами з використанням відповідних математичних пакетів програмного забезпечення.

Метою роботи є удосконалення існуючих методів і математичних моделей, призначених для визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча подільника напруги в математичних пакетах моделювання задач електростатичного поля методом скінченних елементів.

Об'єкт дослідження – електричне поле в активній частині високовольтного широкосмугового подільника напруги.

Предмет дослідження – вплив розподілу електричного поля в активній частині високовольтного широкосмугового подільника напруги на паразитні ємності зосереджених елементів його високовольтного плеча.

Матеріали і результати досліджень. Високовольтне плече широкосмугового подільника напруги складається з послідовної ланки пар паралельно з'єднаних зосереджених елементів – резисторів і конденсаторів. В

ряді конструкцій високовольтного плеча подільника напруги між парами робочих елементів (резисторів і конденсаторів) послідовно включаються демпферні резистори. Схема однієї типової ділянки високовольтного плеча подільника напруги (робочий резистор опором R , робочий конденсатор ємністю C та демпферний резистор опором r) представлені на рис. 1. Кількість таких ділянок у високовольтному плечі широкосмугового подільника напруги визначається робочими напругами, на які розраховані зосереджені елементи в різних режимах роботи подільника напруги.

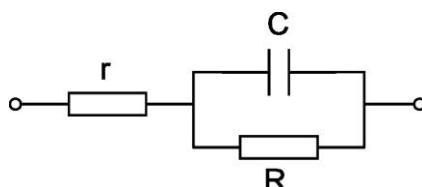


Рисунок 1 – Типова ділянка електричного кола високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги з «ідеальними» елементами

В реальних конструкціях широкосмугових подільників напруги намагаються застосовувати методи зменшення впливу полів електричних зарядів сторонніх об'єктів на зосереджені елементи активної частини подільника напруги. Одним з поширених методів є метод екранування ділянок електричного кола високовольтного плеча подільника напруги шляхом вирівнювання розподілу електричного поля в області зосереджених елементів. Одним з відомих прикладів екранування є розташування зосереджених елементів високовольтного плеча між паралельними провідними дисками, які перебувають під різними потенціалами і створюють електричне поле, яке за конфігурацією близьке до однорідного в області розташування зосереджених елементів.

Як правило, для імпульсних подільників напруги використовують вертикальне розташування зосереджених елементів (вздовж силових ліній квазіоднорідного електричного поля, створюваного екрануючими провідними дисками), а для широкосмугових подільників напруги використовують спіралеподібне розташування зосереджених елементів на ізоляційній поверхні (рис. 2 а) та рис. 2 б), відповідно).

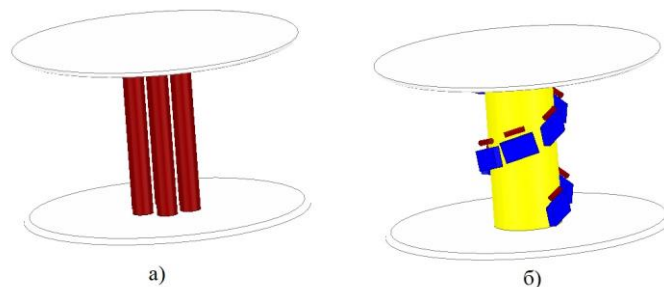


Рисунок 2 – типове розташування зосереджених елементів між екрануючими пластинами високовольтного подільника напруги: а) – імпульсний подільник; б) – широкосмуговий подільник.

Для визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги пропонується розглянути особливості типових зосереджених елементів, представлених на рис. 2 б).

Елементами кола високовольтного плеча, згідно рис. 2 б) та рис. 1 є конденсатори та резистори, розташовані паралельно з'єднаними парами таким чином, що утворюють послідовно з'єднану спіраль елементів між екрануючими пластинами. На рис. 2 б) зображена спрощена просторова орієнтація цих елементів, яка враховує розташування тільки робочих елементів R та C , оскільки демпфуючі резистори r в конструкціях широкосмугових подільників напруги застосовуються не завжди, вони можуть встановлюватись послідовно після кількох пар робочих елементів, мають малий активний опір у порівнянні до робочих резисторів, внаслідок чого на них спадає незначна частка напруги всієї частини кола високовольтного плеча подільника напруги між екрануючими пластинами.

Для розгляду методів визначення паразитних ємностей робочих конденсаторів широкосмугового подільника напруги скористаємось інформацією виробника стосовно конструктивних особливостей типових робочих конденсаторів типу PHE 450, які використовуються в цих подільниках напруги. На рис. 3 представлений схематичний розріз будови конденсатора типу PHE 450 [2].

Construction

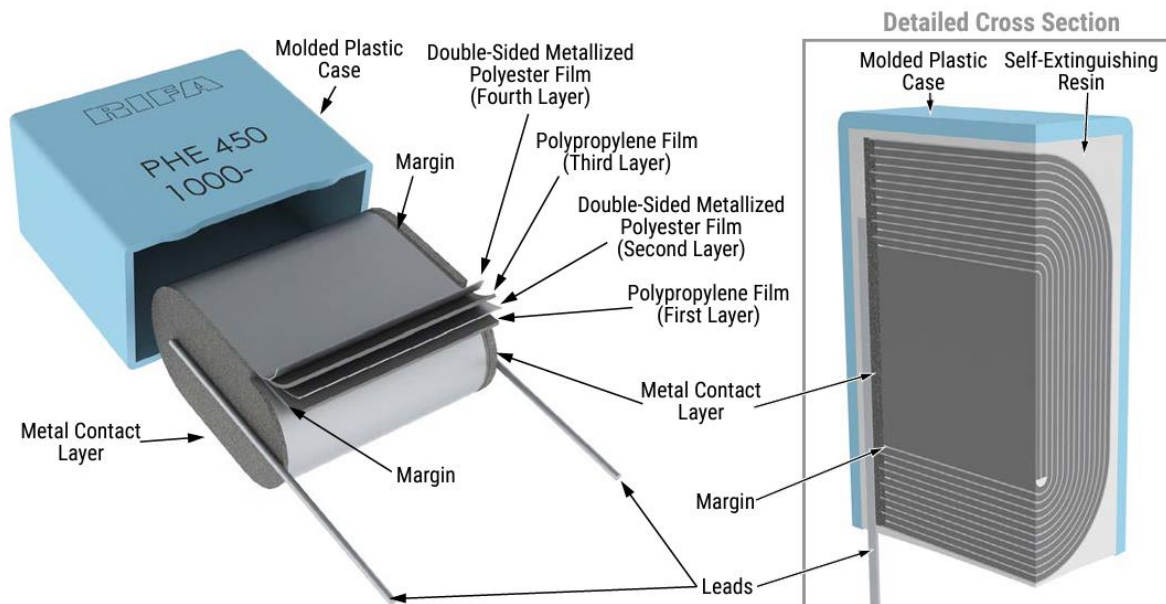


Рисунок 3 – внутрішня будова металоплівкового конденсатора типу PHE 450 за даними виробника [2].

Особливістю конструкції робочих конденсаторів типу PHE 450 є те, що під час подачі різниці потенціалів на відводи конденсатора більша частина бічної поверхні такого конденсатора набуває одного з потенціалів (бічна циліндрична поверхня та один з торців, утворених багатошаровою конструкцією поверхонь

електродів). Потенціал протилежного знаку набуває лише друга торцева поверхня активної частини цього конденсатора.

Для визначення паразитної ємності на екрануючі електроди та інші зосереджені елементи кола високовольтного плеча подільника напруги пропонується вирішення даної задачі чисельними методами, використовуючи рівняння Пуассона в часткових похідних:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \nabla \varphi) = -\rho_v, \quad (1)$$

де $\varphi(x, y, z)$ – скалярна функція просторового розподілу електричного потенціалу; $\varepsilon_r(x, y, z)$ – функція просторового розподілу відносної діелектричної проникності середовища; ε_0 – електрична стала; $\rho_v(x, y, z)$ – функція просторового розподілу об’ємної густини електричного заряду.

Після розв’язку рівняння (1) одержаний просторовий розподіл електричного потенціалу використовується для визначення векторів напруженості електричного поля і густини електричного потоку (вектору електричної індукції), використовуючи систему рівнянь Максвелла:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi; \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}. \quad (3)$$

Відповідно, за теоремою Гауса для електричного поля в діелектриках, сумарний заряд на поверхні провідного тіла може бути визначений інтегруванням нормальної складової вектору електричної індукції по цій поверхні:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q. \quad (4)$$

Для визначення ємності замкненої провідної поверхні (наприклад, поверхні робочого конденсатора або робочого резистора) на інші зосереджені елементи або на конструктивні елементи високовольтного плеча подільника напруги (екрануючі диски) чи на віддалені від подільника напруги об’єкти, що перебувають під іншим потенціалом, необхідно визначати граничні умови Діріхле на відповідних поверхнях. При цьому зручно визначати різницю потенціалів на границях тіл, між якими визначають електричну ємність, на рівні 1 В, оскільки в цьому випадку шукома ємність буде дорівнювати чисельно значенню заряду на поверхні з нульовим потенціалом системи тіл, у відповідності до (4) та формули:

$$q = C \cdot U, \quad (5)$$

де $U = \varphi_2 - \varphi_1$ – різниця потенціалів між поверхнями тіл.

Чисельні розрахунки паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча широкоплатного подільника напруги зручно виконувати в програмних пакетах математичного тривимірного моделювання задач електростатики методом скінченних елементів (наприклад, Ansys, COMSOL). Однак, доступні для навчання версії даних комерційних програмних пакетів мають суттєві обмеження по кількості скінченних елементів, що не дозволяє вирішувати ті задачі, в яких необхідною є деталізація частин досліджуваного простору.

Для подолання цього обмеження (або повноцінного використання інших програмних пакетів, наприклад, FEMM) пропонується внести в задачу визначення паразитних ємностей певні спрощення та замість повноцінної тривимірної моделі використовувати двовимірну модель у вісесиметричній системі координат.

В такому випадку, для визначення паразитних ємностей робочого резистора та робочого конденсатора на екрануючі диски, необхідно враховувати геометричні розміри резисторів та конденсаторів, надані виробниками, які пропонується спростити до паралелепіпеда (конденсатор) з розмірами H_C , S_C , L_C та циліндра з розмірами L_R , d_R (рис. 3):

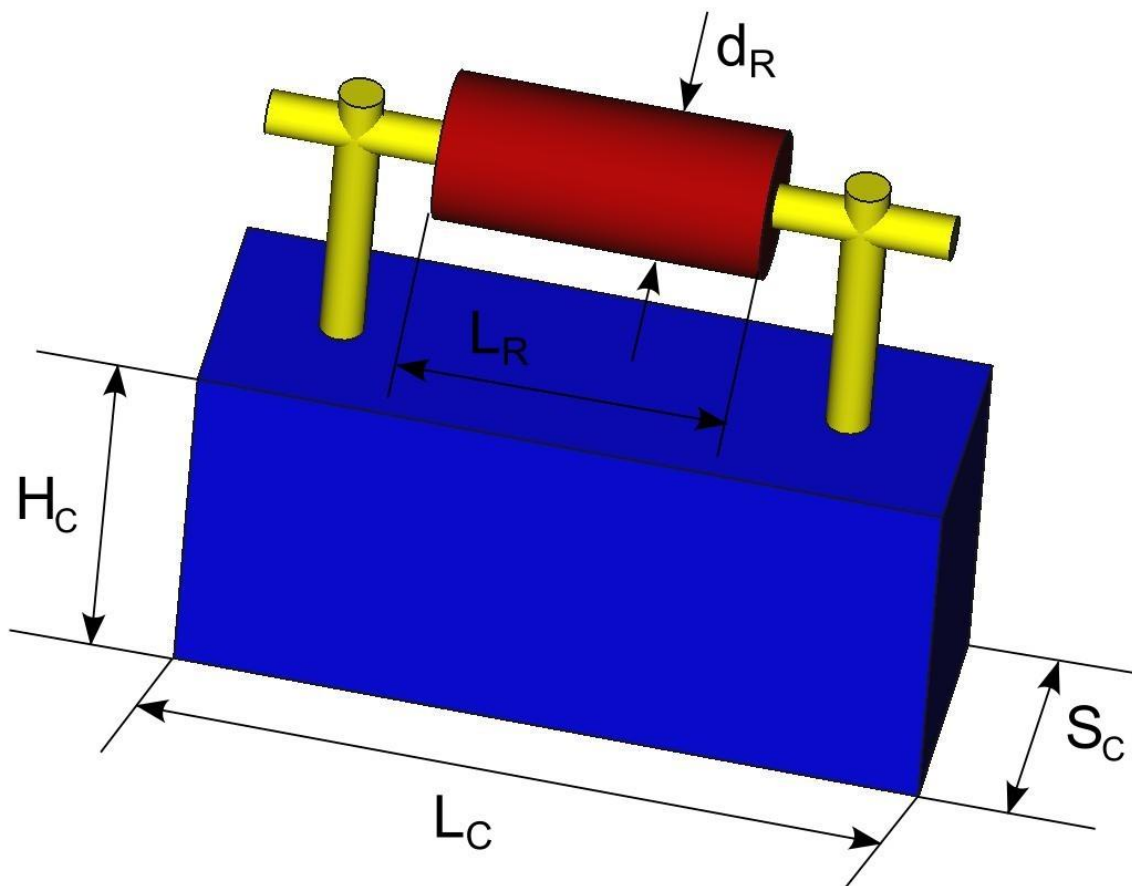


Рисунок 3 – Модель для визначення паразитних ємностей робочих резистора та конденсатора на екрануючі диски високовольтного плеча подільника напруги у вісесиметричній системі координат

Для визначення ємностей елементів за рис. 3 на екрануючі диски високовольтного плеча подільника напруги пропонується представити всі елементи моделі, які мають вісьову симетрію за рис. 2 б), відповідними перерізами у координатній площині, що містить вісь симетрії. При цьому робочий конденсатор пропонується моделювати прямокутним перерізом у площині вісесиметричної системи координат RZ , розмірами $S_C \times H_C$ (рис. 3). Робочий резистор пропонується моделювати круговим перерізом у площині вісесиметричної системи координат RZ , діаметром d_R (рис. 3).

Модель з деякими розмірами у вісесиметричній системі координат представлена на рис. 4.

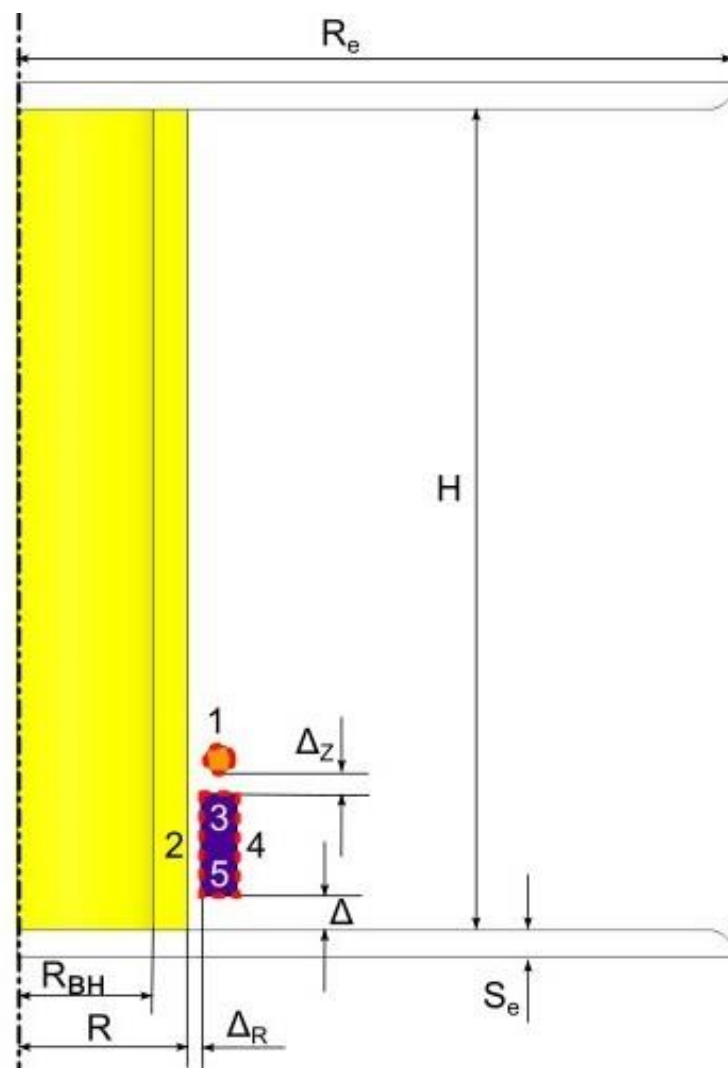


Рисунок 4 – Модель у вісесиметричній системі координат для визначення паразитних ємностей зосереджених елементів на екрануючі диски

На рис. 4 робочий резистор представлений тороїдом круглого перерізу, бічна поверхня якого є тілом обертання кола, представленого на рис. 4 контуром 1. Робочий конденсатор в цій моделі представлений тороїдом прямокутного перерізу, бічні поверхні якого в перерізі на рис. 4 представлені відрізками 2, 3, 4, 5. Ізоляційний циліндр, на якому закріплені зосереджені

елементи високовольтного плеча подільника напруги, представлений в даній моделі прямокутником з висотою H та шириною $R - R_{\text{вн}}$. Екрануючі диски представлені власними перерізами з товщиною S_e , в яких враховані необхідні профілі для вирівнювання напруженості електричного поля на торцях. Зовнішній радіус екрануючих дисків R_e відповідає (з запасом) внутрішньому радіусу діелектричного кожуха високовольтного плеча подільника напруги. Мінімальна радіальна відстань від зовнішньої поверхні ізоляційного циліндра до бічної поверхні робочого конденсатора позначена як Δ_R . Вертикальна відстань між поверхнями робочого конденсатора та робочого резистора позначена як Δ_Z . Оскільки кожна пара робочих елементів у послідовному колі високовольтного плеча між екрануючими дисками перебуває на різних відстанях від цих дисків, вертикальне положення кожної пари «конденсатор-резистор» у вісесиметричній моделі за рис. 4 визначається змінюваною відстанню по вертикалі нижньої грані конденсатора (лінія 5) від нижнього екрануючого диска Δ , яка розраховується за формулою:

$$\Delta = \Delta_0 + (i - 1) \cdot \frac{H - 2 \cdot \Delta_0 - H_C - \Delta_Z - d_R}{N + 1}, \quad (6)$$

де Δ_0 – мінімальна допустима відстань по вертикалі від робочих елементів до екрануючих дисків; N – кількість послідовних пар робочих елементів у спіралі високовольтного плеча між екрануючими дисками; i – порядковий номер пари робочих елементів в спіралі.

Для визначення паразитної ємності робочого резистора на екрануючі диски пропонується визначити ємність тороїда, представленого в перерізі за рис. 4 контуром 1, після чого обрати таку частину цієї ємності, яка відповідає відношенню довжини L_R до довжини середньої лінії відповідного тороїда за формулою:

$$C_R = C_1 \cdot \frac{L_R}{2 \cdot \pi \cdot (R + \Delta_R + 0,5 \cdot S_C)}, \quad (7)$$

де C_1 – загальна ємність тороїду, представленого на рис. 4 контуром 1, на відповідний екрануючий електрод, яка визначається чисельними методами.

Для визначення ємності робочого конденсатора на екрануючі диски пропонується більш складна формула, яка враховує взаємне розташування бічних поверхонь корпусу конденсатора:

$$C_C = \frac{C_2 \cdot L_C}{2 \cdot \pi \cdot (R + \Delta_R)} + \frac{(C_3 + C_5) \cdot L_C}{2 \cdot \pi \cdot (R + \Delta_R + 0,5 \cdot S_C)} + \frac{C_4 \cdot L_C}{2 \cdot \pi \cdot (R + \Delta_R + S_C)} \quad (8)$$

де C_2, C_3, C_4, C_5 – ємності поверхонь тороїда прямокутного перерізу, представлені на рис. 4 лініями 2, 3, 4, 5.

Враховуючи формулу (6), використовуючи формули (7) та (8) в параметричному моделюванні в обраному програмному пакеті математичного моделювання електростатичного поля методом скінченних елементів, можна визначати паразитні ємності окремих елементів кола високовольтного плеча подільника напруги на екрануючі диски.

Шляхом моделювання за запропонованою методикою в програмному пакеті Ansys (студентська версія) було розраховано паразитні ємності на високовольтний та низьковольтний екрануючі диски однієї з ділянок високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги, які представлені в табл. 1. Слід зауважити, що в даній таблиці представлена сумарна паразитна ємність пари «резистор-конденсатор», як сума паразитних ємностей окремо робочого резистора та окремо робочого конденсатора на відповідні електроди більшого і меншого потенціалів – екрануючі диски частини конструкції високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги.

Таблиця 1 – Паразитні ємності зосереджених елементів частини високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги на екрануючі високовольтний і низьковольтний диски його конструкції

№ елемента	Ємність HV, Ф	Ємність LV, Ф
1	2,51205943E-13	1,28014563E-12
2	2,80115909E-13	9,95505575E-13
3	3,10740983E-13	8,23623402E-13
4	3,45800814E-13	7,07173061E-13
5	3,86910341E-13	6,22073883E-13
6	4,33920643E-13	5,51459346E-13
7	4,92758589E-13	4,95360985E-13
8	5,64824548E-13	4,49266155E-13
9	6,61638499E-13	4,05276131E-13
10	8,04114466E-13	3,69979517E-13

В табл. 1 наведено дані для розрахунку ділянки високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги, представлену 10 парами робочих елементів. Паразитні ємності на екрануючий диск з більшим потенціалом розміщені в колонці з назвою «Ємність HV, Ф», паразитні ємності на екрануючий диск з меншим потенціалом розміщені в колонці з назвою «Ємність LV, Ф». Нумерація пар робочих елементів відбувалась початком від екрануючого диску з меншим потенціалом напруги (нижній диск за рис. 4).

Слід зазначити, що запропонована методика визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги не є універсальною для всіх типів зосереджених елементів, тому для певних типів елементів формули (7), (8) можуть бути скориговано.

Також слід зауважити, що модель за рис. 4 не враховує всіх можливих конфігурацій розташування екрануючих дисків і, відповідно, задля спрощення

моделі, не містить екрануючих тороїдальних кілець, які мають вирівнювати розподіл електричного поля на торцях дисків і унеможливити коронування цих дисків за всіх режимів роботи широкосмугового подільника напруги.

Також слід зауважити, що паразитні ємності торцевих поверхонь робочих конденсаторів ($S_C \times H_C$ за рис. 3) перебувають під різними потенціалами і є найбільш впливовими при розрахунку поздовжніх паразитних ємностей між сусідніми парами робочих елементів, а визначення цих ємностей на екрануючі диски є більш складною задачею, яка вимагає або застосування повноцінного тривимірного моделювання, або поєднання двох двовимірних задач розрахунку електростатичного поля в конструкції широкосмугового подільника напруги: вісесиметричної та плоскопаралельної, що може бути предметом подальших досліджень.

Висновки В даному дослідженні запропоновано удосконалений метод визначення паразитних ємностей зосереджених елементів високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги на конструктивні елементи самого подільника. Запропонований метод спрощує метод розрахунку відповідних паразитних ємностей у тривимірній задачі розрахунку електростатичного поля шляхом переведення задачі у вісесиметричну для певних типів зосереджених елементів, з урахуванням ряду спрощень, які знижують точність одержуваних результатів. Даний метод не надає інструментів для визначення поздовжніх паразитних ємностей між сусідніми зосередженими елементами ділянки високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги, оскільки для цього необхідний подальший розвиток дослідження, в якому можливе спрощення тривимірної задачі розрахунку електростатичного поля до кількох задач у вісесиметричній та плоскопаралельній системах координат двовимірного простору.

Перелік посилань

1. Jinliang He, Shanqiang Gu, Shejiao Han, Shuiming Chen, Guozheng Xu. Voltage Distribution Analysis of 500-kV DC Transmission-Line Voltage Divider Under Impulse Voltages: Stray Parameter Extraction. IEEE Transactions Power Delivery 2006 – Vol. 21, No. 2, pp. 577 – 583.
2. PHE450 Double Metallized Polypropylene Film. General Purpose, Pulse and DC Transient Suppression. Datasheet. KEMET Electronics Corporation. Режим доступу: https://content.kemet.com/datasheets/KEM_F3033_PHE450.pdf.