

# РОЗПОДІЛ НАПРУГИ В ЕКРАНУЮЧОМУ КОЛІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПЛЕЧА ПОДІЛЬНИК НАПРУГИ

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

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Вступ.** Ширококутові високовольтні подільники напруги, що застосовуються для вимірювань високих напруг в діапазонах частот від постійної напруги до мегагерцових частот, дуже чутливі до паразитних ємностей, які утворюють елементи високовольтного та низьковольтного плечей такого подільника напруги з провідними поверхнями, що перебувають під іншим потенціалом. На високих частотах вхідної високої напруги і під час подавання на такий подільник напруги швидкоплинних імпульсів витіки через паразитні ємності на провідні поверхні, що перебувають під іншим потенціалом, створюють розподіл напруги по активній частині подільника напруги, який суттєво відрізняється від розподілу напруг за низьких частот або постійного струму.

Сучасні конструктивні особливості ширококутових подільників напруги передбачають різноманітну будову високовольтного плеча (яке є найбільш чутливим до паразитних ємнісних струмів). Дуже часто високовольтне плече подільника напруги поділяється на два електрично незалежних (або частково залежних) електричних кола: так звані вимірювальне коло і екрануюче коло. Призначення вимірювального кола – створювати розподіл напруг по низьковольтній і високовольтній частині таким чином, щоб забезпечити точність масштабного коефіцієнту перетворення напруги в максимально широкому діапазоні частот вхідної напруги. Призначення екрануючого кола – забезпечувати розподіл потенціалів у просторі вздовж вимірювального кола таким чином, щоб мінімізувати вплив паразитних ємностей на вимірювальне коло. Дослідження геометричних параметрів екрануючого кола високовольтного плеча подільника напруги, які впливають на розподіл напруг вздовж вимірювального кола високовольтного плеча подільника напруги є актуальною науковою задачею, яка дозволяє у підсумку обирати геометричні параметри, що розширюють діапазон частот вхідних напруг для ширококутових подільників напруги.

**Метою роботи** є визначення залежностей впливу геометричних параметрів екрануючих кіл високовольтних подільників напруги на розподіл напруг по елементах активної частини такого подільника напруги.

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

**Предмет дослідження** – вплив геометричних параметрів активної частини високовольтного ширококутового подільника напруги на розподіл напруг вздовж елементів його високовольтного плеча.

**Матеріали і результати досліджень.** Існує кілька різноманітних способів розділення активної частини високовольтних подільників напруги на електрично незалежні (або частково незалежні) ділянки загального

електричного кола. В дослідженнях [1 – 2] показано, що використання електрично незалежних (на окремих ділянках) гілок електричного кола активної частини широкосмугового подільника напруги призводить до зменшення впливу паразитних ємностей на стабільність коефіцієнту масштабного перетворення високої напруги в широкому діапазоні частот. При цьому, в роботах авторів даних досліджень зазначено сегментовану будову екрануючого кола високовольтного плеча – ділянки екрануючого кола обмежуються провідними паралельними поверхні землі дисками, що виконують функцію вирівнювання розподілу електричного поля всередині сегменту (між двома сусідніми дисками – див. рис. 1).

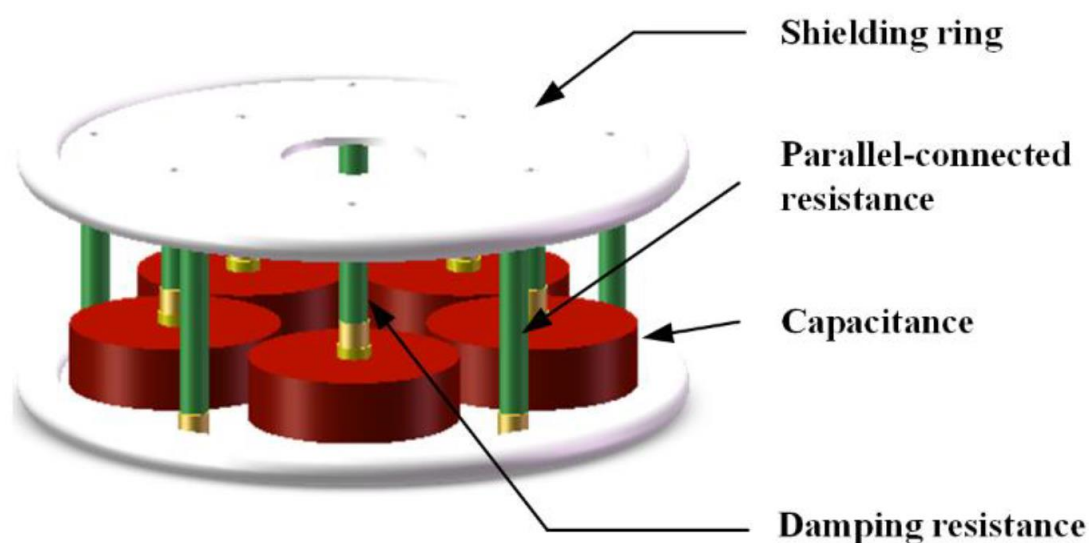


Рисунок 1 – Просторове розташування зосереджених елементів екрануючого кола між екрануючими дисками, згідно [1]

Зосереджені елементи вимірювального кола розташовують, як правило, ближче до вісі симетрії таких сегментованих ділянок високовольтного плеча подільника напруги, внаслідок чого зменшується вплив електричних полів від зовнішніх (по відношенню до подільника напруги) предметів, які перебувають під іншим потенціалом, на зосереджені елементи вимірювального кола.

Два найближчі паралельні провідні диски сегменту високовольтного плеча утворюють конденсатор, електричне поле якого ближче до вісі симетрії наближається до однорідного. Саме в цій області розташовують зосереджені елементи вимірювального кола високовольтного плеча подільника напруги, внаслідок чого просторовий розподіл потенціалів між провідними дисками, що утворюють екрануюче коло ємнісного характеру, є наближеним до просторового розподілу електричного поля вздовж зосереджених елементів ділянки вимірювального кола, яка, як правило, має електричне з'єднання з кожним з дисків на обох кінцях зазначеної ділянки. Спрощена схема заміщення високовольтного плеча подільника напруги, в якому електрично розділені вимірювальне та екрануюче електричні кола, наведена на рис. 2.

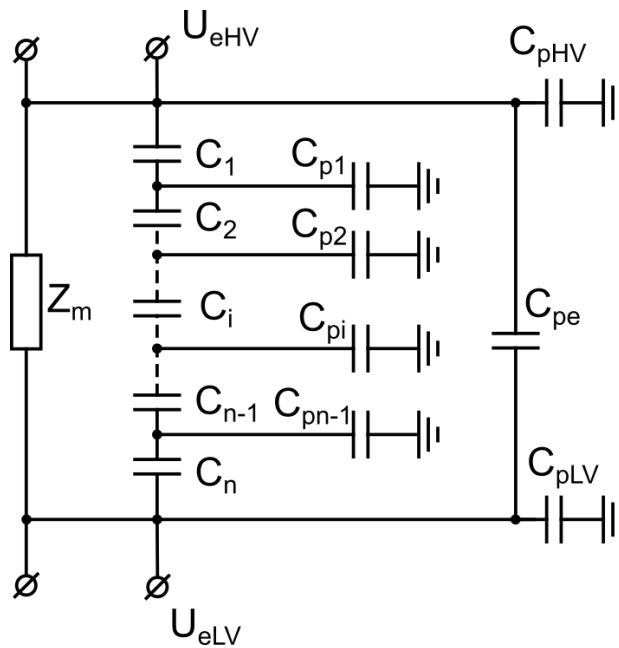


Рисунок 2 – Спрощена схема заміщення високовольтного плеча ширококутвого подільника напруги:  $C_1 \dots C_n$  – ємності між паралельними екрануючими дисками сегментів екрануючого кола;  $C_{p1} \dots C_{pn-1}$  – паразитні ємності екрануючих дисків на заземлені поверхні;  $C_{pe}$  – паразитна ємність між крайніми електродами високовольтного плеча;  $C_{pHV}$  – паразитна ємність високовольтного фланця на заземлені поверхні;  $C_{pLV}$  – паразитна ємність фланця, що приєднується до низьковольтного плеча, на заземлені поверхні;  $Z_m$  – комплексний опір вимірювального кола;  $U_{eHV}$  – потенціал високовольтного фланця;  $U_{eLV}$  – потенціал низьковольтного фланця.

Оскільки габарити зосереджених елементів вимірювального кола подільника напруги (резистори, конденсатори –  $Z_m$  за рис. 2), які розташовуються між екрануючими дисками екрануючого кола (що утворюють ємності  $C_1 \dots C_n$  за рис. 2) мають певні габаритні розміри у відповідності до робочих та випробувальних напруг, на які вони розраховані, робочі ємності екрануючого кола  $C_1 \dots C_n$  мають значення, які не суттєво перевищують значення паразитних ємностей  $C_{p1} \dots C_{pn-1}$ , через які струми гілки екрануючого кола витікають на землю під час роботи подільника напруги. Внаслідок цього струми в гілці екрануючого кола є більшими поблизу високовольтного фланцю і зменшуються в бік низьковольтного електроду. Це призводить до нерівномірного розподілу напруг на робочих ємностях  $C_1 \dots C_n$  екрануючого кола, внаслідок чого розподіл електричного поля поблизу зосереджених елементів вимірювального кола  $Z_m$  також не відповідає розподілу потенціалів вздовж цих елементів, при цьому збільшується ефект паразитних ємностей між елементами вимірювального та екрануючого кіл.

Для запобігання появи такого ефекту в екрануючому колі ємності  $C_1 \dots C_n$  шунтують резисторами, опір яких суттєво менший за комплексний опір відповідних ділянок вимірювального кола, як показано у дослідженні [1]. Таким чином, шунтуючі резистори створюють примусовий розподіл напруг вздовж

елементів екрануючого кола за рахунок того, що струми, які по них протікають, є більшими за паразитні ємнісні струми.

Однак, схема з шунтуванням робочих ємностей резисторами має недолік – вона є частотно залежною. При збільшенні частоти вхідної напруги, яка подається на вхід подільника напруги, паразитні ємнісні струми зростають і їх впливом вже неможна нехтувати – розподіл напруг по екрануючому колу поступово наближається до того режиму, який спостерігається за відсутності шунтуючих резисторів.

Якщо розглянути схему за рис. 2, можна бачити, що вона менш частотно залежна, оскільки екрануюче коло складається лише з ємнісних елементів, відповідно, при збільшенні частоти, струми крізь робочі і крізь паразитні ємності зростатимуть пропорційно. Недоліком цієї схеми є те, що важко зробити різницю між робочими і паразитними ємностями настільки значною, щоб паразитними ємностями можна було б нехтувати.

На рис. 3 представлена вісесиметрична математична модель екрануючого кола ширококутового подільника напруги в програмному пакеті FEMM. На рис. 3 а) представлена математична модель геометрії елементів екрануючого кола подільника напруги, а на рис. 3 б) – розподіл напруженості електричного поля між елементами. Низьковольтний електрод високовольтного плеча вважався заземленим, а високовольтний мав потенціал 30 кВ. Товщина екрануючих дисків задавалась 5 мм, зовнішній радіус екрануючих дисків – 100 мм радіус внутрішнього отвору – 25 мм, кількість дисків між електродами – 6, відстань між електродами варіювалась в діапазоні від 20 до 50 мм, діелектриком скрізь обрано повітря. Аналіз виконувався для частот 1 МГц; 10 МГц та 100 МГц. Потенціали на екрануючих дисках визначались математичним моделюванням методом скінченних елементів в задачі розтікання струмів.

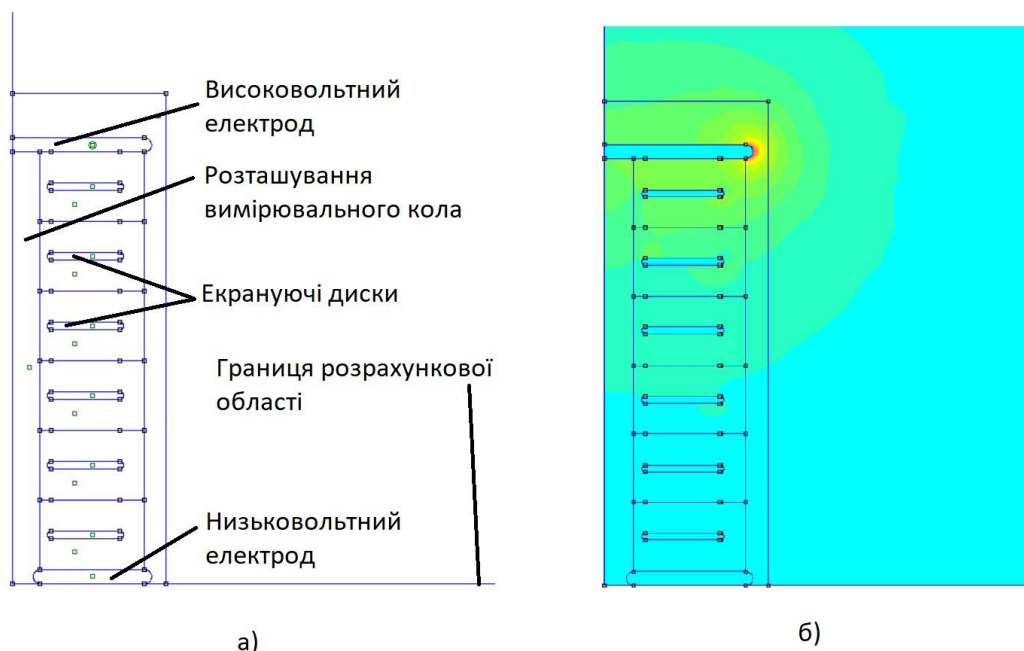


Рисунок 3 – Математична модель ширококутового подільника напруги в програмному пакеті FEMM

Для визначення розподілу потенціалів по екрануючих дисках екрануючого кола високовольтного плеча подільника напруги задача вирішувалась чисельними методами, використовуючи рівняння для розподілу змінного струму в середовищі:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j \cdot \omega \cdot \varepsilon) \cdot \nabla \cdot V), \quad (1)$$

де  $\nabla$  – градієнтний оператор Гамільтона (оператор набла);  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $\sigma$  – провідність середовища;  $\omega$  – кутова частота струму;  $V$  – потенціал.

За результатами виконання обчислень за формулою (1) в програмному середовищі FEMM одержано розподіл потенціалів на екрануючих дисках, які представлені кривими залежностей від вертикальної координати диску, починаючи з заземленого низьковольтного.

На рис. 4 представлені зміни у розподілі потенціалів між екрануючими дисками для ширококутового подільника напруги за умови зміни їх кількості (зменшення відстані між дисками) для частоти 1 МГц прикладеної напруги.

### Розподіл потенціалів по екрануючих дисках

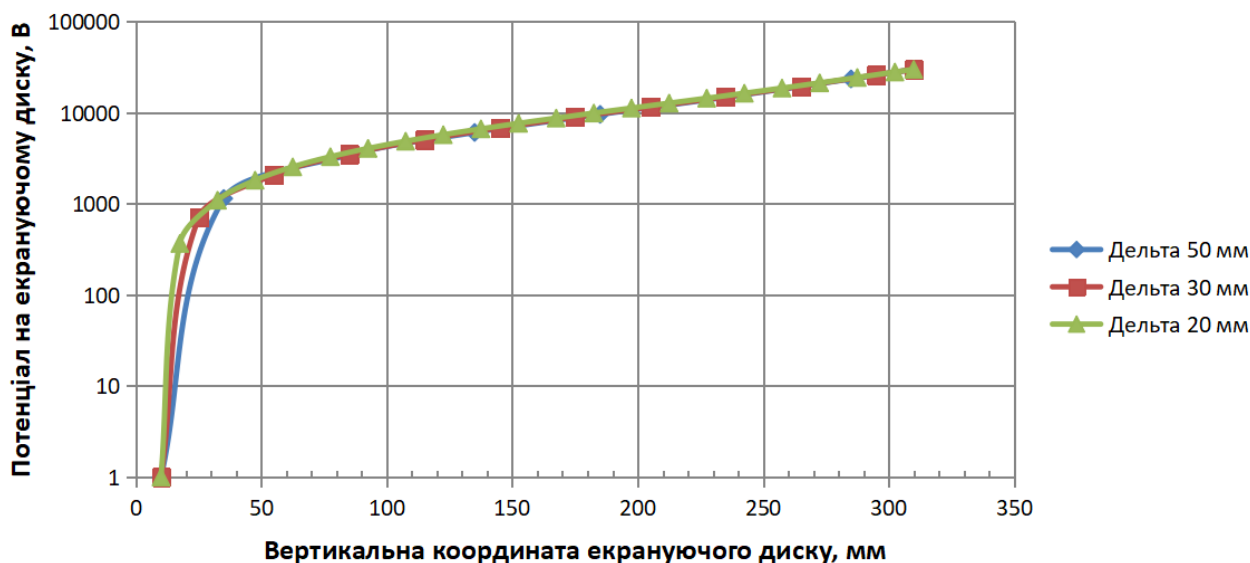


Рисунок 4 – Розподіл потенціалів по екрануючих дисках ширококутового подільника напруги при частоті струму 1 МГц і відстанях між дисками 50; 30 та 20 мм.

Під час математичного моделювання на частотах 10 МГц та 100 МГц (див. рис. 5) результати моделювання виявилися практично незмінними, тобто, спостерігається стабільність частотних характеристик розглянутої геометричної моделі у відповідному діапазоні частот.

Одночасно, результат порівняльного аналізу даних моделювання показує, що зі зменшенням відстані між екрануючими дисками екрануючого кола ширококутового подільника напруги зменшується вплив паразитних струмів на ділянки цієї гілки електричного кола внаслідок збільшення ємності між

екрануючими дисками, що призводить до вирівнювання розподілу потенціалів між екрануючими дисками і зменшенню їх впливу на ділянки вимірювального кола.

На рис. 5 показано розподіл потенціалів по екрануючих дисках широкосмугового подільника напруги за відстані між ними 50 мм на частотах 1 МГц; 10 МГц; 100 МГц. Можна спостерігати співпадіння цих кривих.

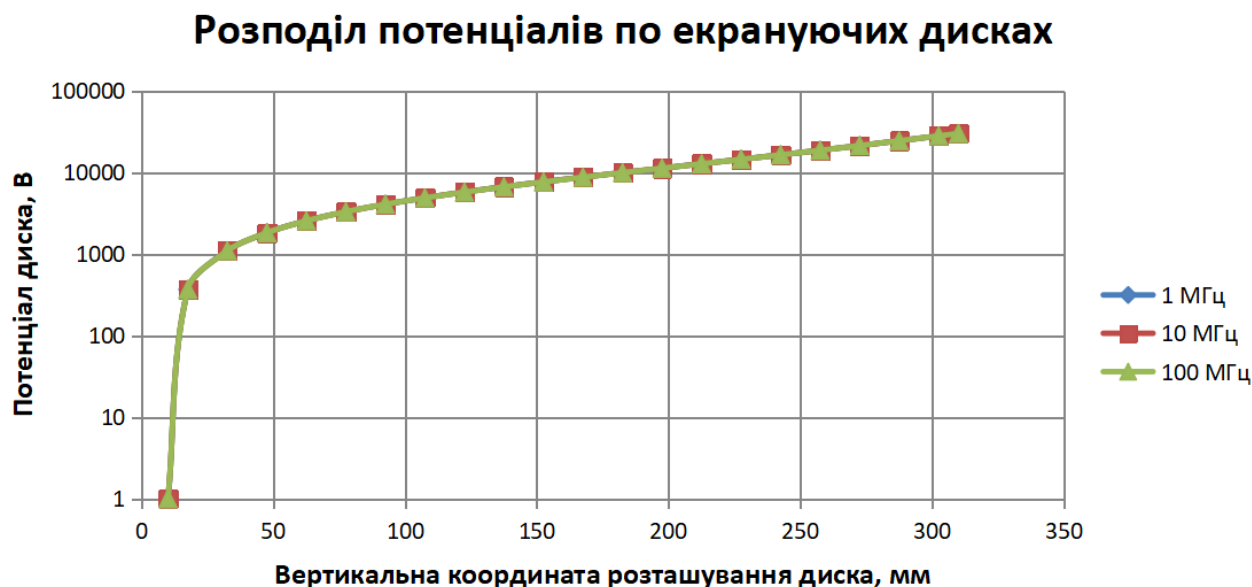


Рисунок 5 – Розподіл потенціалів по екрануючих дисках подільника напруги за відстані між ними 50 мм на частотах 1 МГц; 10 МГц; 100 МГц.

**Висновки** Результатом математичного моделювання даного дослідження є ряд числових характеристик математичної моделі широкосмугового подільника напруги, які свідчать про незалежність розподілу потенціалів на екрануючих дисках вимірювального кола високовольтного плеча широкосмугового подільника напруги від частоти вхідної напруги в діапазоні від 1 до 100 МГц. Також, в результаті моделювання визначено, що наявність паразитних ємностей призводить до суттєвої нелінійності розподілу потенціалів між екрануючими дисками (у разі їх рівномірного розподілу між високовольтним і низьковольтним електродами). При цьому, за результатами моделювання визначено зменшення нелінійності при зменшенні відстані між екрануючими дисками.

#### Перелік посилань

1. Xie S., Mu Z., Ding W., Wan Z., Su S., Zhang C., Zhang Y., Xia Y., Luo D. Development of Broadband Resistive-Capacitive Parallel-Connection Voltage Divider for Transient Voltage Monitoring. *Energies*. 2022; 15(2): 451. <https://doi.org/10.3390/en15020451>.
2. S. Wu, W. Pang, Z. Yang, K. Zhang, & X. Wu, "Study on the reliability of new kind of  $\pm 1$  100 kv dc voltage divider under the action of impulse voltage", *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, p. 2575-2579, 2019. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8815>.