

## ДИЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОР ВИСОКОЇ НАПРУГИ

к.т.н. А.М. Панченко, О.В. Касьянов  
(подав д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

Розглянута можливість отримання високої напруги змінного струму в діелектричному середовищі за рахунок гвинтових електричних полів.

Відомо, що будь-яке поле може бути представлено як суперпозиція потенціального і вихрового поля. Для електромагнітних полів це виражається найбільш загальною формулою Максвелла для рухомих середовищ [1,2]:

$$\mathbf{j} = \sigma(\Delta\phi + \frac{d\mathbf{A}}{dt} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

де  $\mathbf{j}$  - вектор щільності струму;

$\sigma$  - питома провідність;

$\Delta\phi$  - градієнт скалярного потенціалу;

$d\mathbf{A}/dt$  - градієнт векторного потенціалу;

$\mathbf{V}$  - швидкість переміщення середовища;

$\mathbf{B}$  - індукція магнітного поля.

$\Delta\phi$  - векторна величина, що характеризує напруженість потенціального поля, наприклад, напруженість між пластинами конденсатора.

Градієнт векторного потенціалу  $d\mathbf{A}/dt$  – це вектор, що характеризує напруженість вихрового поля, наприклад, електричного поля, обумовленого зміною магнітного потоку в часі. Добуток  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  у (1) слід враховувати в випадках, коли має місце переміщення в просторі відносно магнітного поля.

Зауважимо, що надалі розглядаються тільки стаціонарні процеси.

На рис.1 зображено пристрій, який дозволяє об'єднати два типи полів - потенціальне і вихрове. Маємо конденсатор, насаджений на магнітопровід. Змінний магнітний потік забезпечує вихрове поле між пластинами конденсатора, а напруга, яка прикладена до пластин ємності, дає потенціальне поле. Магнітопровід 2 з феромагнітного матеріалу круглого перетину радіуса  $R_1$ , на якому розміщена обмотка 1, що живиться змінною напругою  $U_1$  діелектричного циліндра 4 з діелектричною проникністю  $\epsilon$  та внутрішнім і зовнішнім діаметрами  $R_1$ ,  $R_2$  і висотою  $d$ . На торцях діелектричного циліндра по всій його поверхні розміщені зовнішні електроди "З" та на деякій відстані, в тілі діелектрика, внутрішні електроди "В". Вважаємо, що відстань між внутрішніми та зовнішні-

ми електродами приблизно рівна  $d_1 \approx d$ , тобто замість вторинної обмотки на феромагнітнім осередді розміщений діелектричний циліндр з електродами “3” до яких подається напруга  $U_1$ . Маємо конденсатор, відстань між пластинами якого становить  $d$ , а по його осі проходить

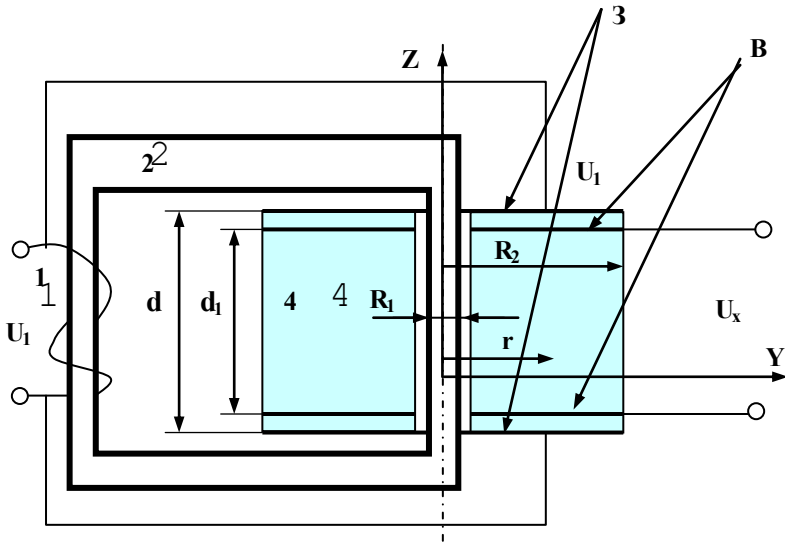


Рис.1. Діелектричний трансформатор

феромагнітне осереддя. Очевидно, що при подачі змінної напруги на пластини “3” в ньому утвориться потенціальне електричне поле з напруженістю

$$E_1 = U/d . \quad (2)$$

Якщо зняти напругу з пластин і подати її на обмотку 1, то в осередді 2 утвориться магнітний потік, який створить в тілі діелектрика вихрове електричне поле, що в перетині по площині перпендикулярній осі діелектричного циліндра становитиме концентричні кола. У відповідності до закону електромагнітної індукції можемо записати

$$E_2 dl = -\frac{1}{c} \cdot \frac{B \cdot dS}{dt} , \quad (3)$$

де  $E_2$  – напруженість вихрового електричного поля;

$dl$  – одиничний направлений вектор елемента кола в тілі діелектрика радіуса  $r$ ;

$B$  – індукція в осередді;

$dS$  – одиничний елемент орієнтованої площини, через яку проходить індукція  $B$ .

Вважаємо, що вісь  $Z$  направлена вертикально, вісь  $Y$  – горизонтально, як вказано на рис.1, а вісь  $X$  – перпендикулярно до площини рисунка. Тоді вектор  $E_1$  буде паралельним осі  $Z$ , а  $E_2$  – лежати в площині  $XY$ , тобто ці два вектора будуть взаємно перпендикулярні. Вони утворять третій вектор, який буде дорівнювати їх сумі

$$E_3 = E_1 + E_2 .$$

Поле вектора  $E_3$  буде мати гвинтовий характер, оскільки  $E_1$  розміщений вздовж осі  $Z$ , а  $E_2$  має циркуляцію в площині  $XY$ . Гвинт може бути правим чи лівим, залежно від їх взаємної орієнтації. Якщо взяти коло, утворене радіусом  $r$  (рис.1), так що  $R_1 < r < R_2$ , і в тілі діелектрика вирізати циліндр основою  $\pi r^2$ , то в його боковій поверхні буде знаходитись вектор  $E_3$ . Його силові лінії утворять гвинтову лінію. Крок гвинта буде залежати від співвідношень векторів  $E_1, E_2$ . Для того, щоб знайти різницю потенціалів між протилежними електродами  $B$ , необхідно знайти довжину гвинтової лінії і значення вектора  $E_3$ :

$$\Delta\phi_B = dl \cdot E_3 . \quad (4)$$

Оскільки електричне поле  $E_3$  буде діяти в діелектрику, то воно викличе відповідну орієнтацію діполей, які в свою чергу зорієнтуються по силовому полю і утворять відповідні гвинтові лінії. Їх орієнтація буде змінюватися відповідно до прикладеної напруги, але завжди вздовж гвинтових ліній. Ці діполі будуть індуктувати відповідну напругу на електродах “ $B$ ”. Очевидно, що чим менше значення  $E_1$ , тим менший нахил буде у гвинта, тим більша буде довжина силової лінії, а отже і напруга. Проведемо якісну оцінку напруги на виході діелектричного трансформатора, коли дана напруга на вході  $U_1$ . Тоді

$$E_1 = U_1 / d . \quad (5)$$

Для оцінки  $E_2$  скористаємося законом електромагнітної індукції (3), виконавши інтегрування по контуру з радіусом  $r$ :

$$\oint E_2 dl = -\frac{1}{c} \cdot \int_S \frac{B \cdot dS}{dt} . \quad (6)$$

Значення  $E_2$  по контуру циркуляції постійне, а кут становить  $0^\circ$ , тому що  $E_2$  - дотична до контуру. Значення площі, що обмежується контуром, дорівнює  $\pi r^2$ . Її орієнтація перпендикулярна по відношенню до  $B$ , тоді:

$$E_2 2\pi r = -1/c \pi r^2 f/2; \\ E_2 = -1/4c B r f . \quad (7)$$

Вектор  $\mathbf{E}_3$  є дотичним до гвинтової лінії, а отже і кут між  $\mathbf{E}_3$  і  $d\mathbf{l}$  рівний  $0^0$ , тобто

$$\Delta\varphi_B = \mathbf{L} \cdot \mathbf{E}_3,$$

де  $\mathbf{L}$  – довжина гвинтової лінії.

Для знаходження довжини гвинтової лінії знайдемо кут  $\varphi$  між векторами  $\mathbf{E}_1$  та  $\mathbf{E}_2$ :

$$\varphi = \arctg(\mathbf{E}_1/\mathbf{E}_2) = -2cU_1/Brdf.$$

Тоді довжина гвинтової лінії становить  $\mathbf{L} = d/\arcsin(\varphi)$ .

Таким чином, знайдено різницю потенціалу в вирізаному циліндрі радіуса  $r$  між двома точками, що лежать на торцях циліндра. З міркувань симетрії слідує, що коло, яке утворене боковою поверхнею циліндра і електродами  $\mathbf{B}$ , є екіпотенціальне. Розглянемо наступний циліндр діаметром  $r + \Delta r$ . З'ясуємо, як буде змінюватися потенціал точок  $\varphi(\mathbf{r})$  і  $\varphi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ .

Фактори, що впливають на зменшення потенціалу: згідно з виразу (6) права частина рівняння не залежить від радіуса, отже збільшення радіуса призводить до зменшення напруженості  $\mathbf{E}_1$ ; зменшення  $\mathbf{E}_1$  призводить до збільшення кута  $\varphi$ , отже гвинт стає більш “крутішим”, зменшується довжина силової лінії. З другого боку при радіусі  $r + \Delta r$  збільшується поверхня циліндра, навколо якого накручується спіраль, а це призводить до збільшення потенціалу. Необхідно з'ясувати ступінь впливу кожного із факторів. В ідеалі вся поверхня електродів “ $\mathbf{B}$ ” повинна бути екіпотенціальною, в протилежному разі виникнуть зрівнювальні струми.

**Висновки:** Очікується, що даний тип трансформаторів дозволить отримати високу змінну напругу. Можлива перевага буде заключатися в відсутності багатовиткової вторинної обмотки. Потужність подібного трансформатора буде обумовлена струмом зміщення, який в свою чергу визначається електричною ємністю між електродами “ $\mathbf{Z}$ ”. Ємність в такому випадку буде змінною, оскільки залежатиме від відстані між обкладками конденсатора, а ця довжина виражатиметься довжиною електричної силової лінії, тобто довжиною гвинтової лінії. Мову про потужності такого типу трансформатора доцільно вести з частот 100 кГц і вище.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Maxwell I.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. – Oxford, 1973. – 488 p.
2. Поливанов К.М. Электродинамика движущихся тел. – М. Энергоиздат, 1982. – 186 с.

*Подана до редколегії 11.11.2000*