

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]:

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

де \mathbf{j} - вектор щільності струму;

σ - питома провідність;

$\Delta\varphi$ - градієнт скалярного потенціалу;

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

\mathbf{V} - швидкість переміщення середовища;

\mathbf{B} - індукція магнітного поля.

$\Delta\varphi$ - 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 ϵ 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

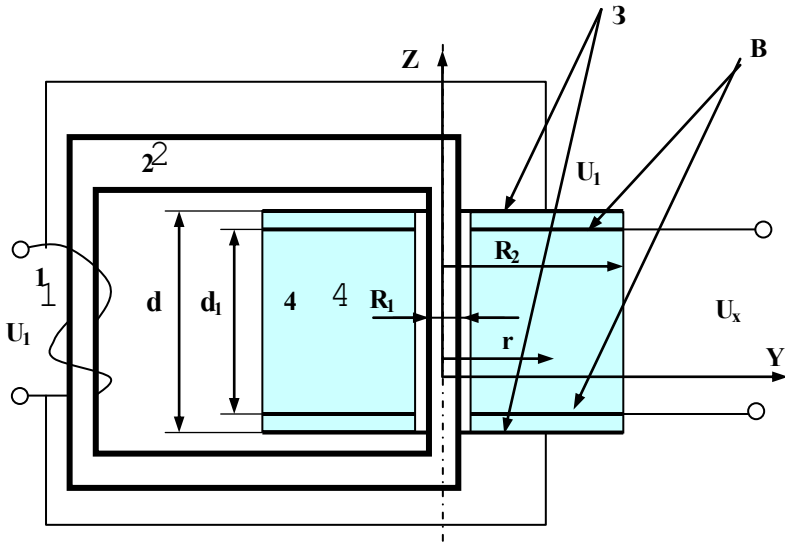


Рис.1. Діелектричний трансформатор

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 πr^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 діполи будуть індуктувати відповідну напругу на електродах “ B ”. Очевидно, що чим менше значення E_1 , тим менший нахил буде у гвинта, тим більша буде довжина сигової 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° , тому що E_2 - дотична до контуру. Значення площі, що обмежується контуром, дорівнює πr^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 φ між векторами \mathbf{E}_1 та \mathbf{E}_2 :

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

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

Таким чином, знайдено різницю потенціалу в вирізаному циліндрі радіуса \mathbf{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 $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$. 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 φ , отже гвинт стає більш “крутішим”, зменшується довжина силової лінії. З другого боку при радіусі $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$ 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