

УДК 532.1: 536.7

В.В. Дырдин, И.С. Елкин, К.В. Ложкин, А.С. Соснов

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКОВ СМЕЩЕНИЯ

В [1] высказано предположение, что магнитное поле токов смещения можно зафиксировать с помощью магнитной стрелки. Но величина и характер магнитного поля при этом не оцениваются. Вектор плотности тока смещения с учетом граничных условий диэлектрик-воздух равен [1, 2]

$$j_{cm} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{P} – вектор электрической поляризации диэлектрика.

Из (1) следует, что плотность тока смещения равна сумме двух составляющих, одна из которых представляет изменяющееся со временем электрическое поле в вакууме (или воздухе), а вторая учитывает движение в пространстве зарядов, связанных с молекулами диэлектрика.

Ток проводимости создает в окружающем пространстве магнитное поле, индукция которого в любой точке поля может быть определена по формуле Био-Савара-Лапласа [1, 2]

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [\vec{dl}, \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где $d\vec{B}$ – магнитная индукция, созданная элементом проводника $d\vec{l}$ с током I ; \vec{r} – расстояние от элемента проводника $d\vec{l}$ до точки, где определяется магнитная индукция.

Рассчитаем магнитное поле тока смещения без диэлектрика (рис. 1).

Пусть на обкладки конденсатора подается переменное напряжение частотой v . Тогда напряженность электрического поля в пространстве между обкладками будет равна:

$$E = E_{max} \cos 2\pi vt = \frac{U_0}{d} \cos 2\pi vt, \quad (2)$$

где U_0 – максимальное напряжение на обкладках конденсатора; d – расстояние между пластинами конденсатора; v – частота колебаний электрического поля.

Электрическое смещение будет также изменяться по гармоническому закону, т.е.:

$$D = \epsilon_0 E = \epsilon_0 \frac{U_0}{d} \cos 2\pi vt, \quad (3)$$

а плотность токов смещения:

$$j = \frac{dD}{dt} = -\epsilon_0 \frac{U_0}{d} 2\pi v \sin 2\pi vt. \quad (4)$$

Мгновенное значение токов смещения можно рассчитать по формуле:

$$i_{cm} = jS = -\epsilon_0 \frac{U_0}{d} 2\pi v S \sin 2\pi vt, \quad (5)$$

где S – площадь обкладок конденсатора.

Если по прямому проводнику длиной l протекает постоянный ток, равный амплитудному значению тока, определяемому по (5), то он создает в пространстве магнитное поле, индукция которого равна:

$$B_{max} = -\frac{\mu\mu_0}{2\pi r_0} \cos \alpha \cdot \frac{2\pi v \epsilon_0 S U_0}{d}, \quad (6)$$

где α – угол, под которым видна точка М из концов отрезка проводника с током (рис. 1); r_0 – кратчайшее расстояние от прямого проводника с током до исследуемой точки поля.

В случае переменного тока:

$$B = B_{max} \sin 2\pi vt.$$

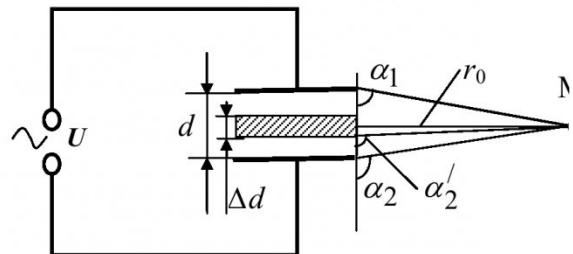


Рис. 1. Расчетная схема

Тогда поток вектора магнитной индукции Φ через площадь S_1 , равен:

$$\Phi = BS_1 = -\frac{\mu\mu_0}{2\pi r_0} \cos \alpha \cdot \frac{2\pi v \epsilon_0 S S_1 U_0}{d} \sin 2\pi vt \quad (7)$$

Если в точку М поместить датчик в виде катушки, намотанной на ферритовый сердечник с прямоугольной петлей гистерезиса и площадью S_1 , то наведенная в катушке ЭДС индукции

$$|e| = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu\mu_0}{r_0} \frac{2\pi v \epsilon_0 S S_1 U_0}{d} N \cos \alpha \cdot \cos 2\pi vt \quad (8)$$

(N – число витков в измерительной катушке).

Из (8) следует, что амплитуда ЭДС индукции

$$\epsilon_{max1} = \frac{2\pi v \mu\mu_0 \epsilon_0 S S_1 U_0 N}{dr_0} \cos \alpha. \quad (9)$$

Расчет по (9) при следующих значениях: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $v = 10^6$ Гц,

$S = 2,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $S_1 = 5,024 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $U_0 = 20 \text{ В}$, $N = 500$, $d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $r_0 = 0,2 \text{ м}$ для амплитуды ЭДС индукции в точке М дает значение равное $\mathcal{E}_{max1} = 9,3 \text{ мВ}$.

При наличии диэлектрика между обкладками конденсатора ток смещения:

$$i_{cm} = i_{cm}^{возд} + i_{cm}^{диэл}. \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) рассчитано выше, а второе можно найти из выражения:

$$i_{cm}^{диэл} = S \frac{dP}{dt} = S\epsilon_0 \chi \frac{dE}{dt} = 2\pi\epsilon_0 \frac{U_0}{d} \nu S \chi \sin 2\pi\nu t \quad (11)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Тогда максимальное значение ЭДС индукции от обоих составляющих тока смещения:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{max} &= \mathcal{E}_{max1} + \mathcal{E}_{max2} = \\ &= 2\pi\epsilon_0 \mu \mu_0 \nu^2 S S_1 \frac{U_0 N}{d \cdot r_0} (\cos \alpha + \chi \cos \alpha'_2) \end{aligned} \quad (12)$$

где $\cos \alpha'_2 = 0,07$.

Расчет по (12) дает, что $\mathcal{E}_{max} = 30,3 \text{ мВ}$.

Экспериментальные исследования были проведены на установке, представленной на рис. 2, за основу которой была взята установка Эйхенвальда. В установке Эйхенвальда на пластины подавалось постоянное напряжение, а токи смещения создавались путем вращения диска, половинки которого поочередно попадали в поле с противоположной ориентацией вектора \vec{E} . В нашей установке диэлектрический диск приводился во вращение от электродвигателя 2, имеющего частоту обращения $n = 1480 \text{ об/мин}$. Напряжение высокой частоты, порядка 1 МГц, подводилось экранированными проводниками 4 от ультразвукового генератора 3 к пластинам конденсатора 5. Измерительный датчик 6 также экранированными проводами соединялся с осциллографом С1-70. Результаты измерений индуцированной ЭДС в измерительной катушке представлены на рис. 3. Характер изменения ЭДС с расстоянием r_0 отвечает выражениям (9), (12).

Установлено, что действительно токи смещения создают в пространстве переменное магнитное поле, причем результаты расчета достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимен-

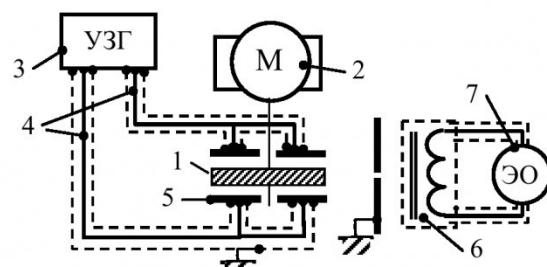


Рис. 2. Блок-схема установки: 1 – диэлектрический диск; 2 – электродвигатель; 3 – ультразвуковой генератор; 4 – экранированные провода; 5 – пластины конденсатора; 6 – измерительный датчик; 7 – электронный осциллограф

тальных наблюдений.

Включение электродвигателя одновременно с источником переменного напряжения приводило к уменьшению измеряемой ЭДС индукции. В то же время экранирование подводящих проводов и отдельных элементов установки, а также, что после отключения источника переменного напряже-

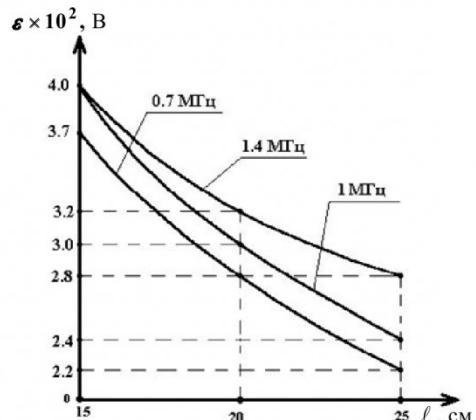


Рис. 3. Зависимость ЭДС индукции от расстояния до конденсатора

ния время релаксации поля составляло около 3 с, (записано по плавно уменьшающемуся максимальному значению наводимой ЭДС индукции), позволяют утверждать, что измеряемая ЭДС индукции создавалась именно токами смещения, а не наводкой внешних полей.

Таким образом, токи смещения являются переменными и создают в пространстве переменное магнитное поле, на которое из-за инерции магнитная стрелка реагировать не может.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. шк., 2000. – 718 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. шк., 2000. – 542 с.

□Авторы статьи:

Дырдин Валерий Васильевич - докт. техн. наук, проф., зав. каф. физики	Елкин Иван Сергеевич - канд. техн. наук, доц. каф. физики	Ложкин Кирилл Васильевич - студент	Соснов Александр Сергеевич - студент
--	--	--	--