

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 537.811/621.317

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ СМЕЩЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФАММЕТРА

© 2009 г. С. М. Годин, В. В. Ботвиновский

Поступила в редакцию 15.01.2009 г.

Испытан фамметр – новый прибор, предназначенный для измерения малых величин циркуляции магнитного поля. При его помощи измерен ток смещения между пластинами плоского осесимметричного конденсатора. Показано, что ток смещения зависит от амплитуды гармонически изменяющегося напряжения и расстояния между пластинами так, как это предсказывает теория Максвелла. На основании этого сделан вывод о правомерности введения Максвеллом тока смещения как физической реальности.

ВВЕДЕНИЕ

Со времени написания Максвеллом “Трактата об электричестве и магнетизме” предпринимали неоднократные попытки доказать или опровергнуть реальность введенного им тока смещения. Обоснованным доказательством могут быть регистрация и измерения эффектов, непосредственно производимых током смещения, например магнитного поля. Это непростая задача в первую очередь потому, что при реально достижимых в эксперименте плотностях тока смещения производимое им магнитное поле оказывается весьма слабым. Развитие техники эксперимента позволило решить эту задачу лишь к 80-м годам прошлого столетия, когда впервые было измерено магнитное поле между пластинами плоского осесимметричного конденсатора [1]. Для измерения этого поля применены сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор (SQUID) и сверхпроводящая капсула для экранирования посторонних магнитных полей, все приспособления для измерений были погружены в жидкий гелий. В центральной области конденсатора магнитное поле оказалось линейно зависящим от расстояния r (рис. 1), как это должно быть согласно уравнению Максвелла:

$$\int_L H dl = \int_S \left(j + \frac{dD}{dt} \right) ds \quad (1)$$

при равномерном распределении тока смещения. Здесь H – напряженность магнитного поля; j – плотность тока проводимости (равная нулю между пластинами конденсатора); D – индукция электрического поля; dD/dt – плотность тока смещения.

Мы воспользовались методом измерения циркуляции магнитного поля по контуру, охватывающему ток смещения в таком же плоском осесимметричном конденсаторе. Для наших целей использовался фамметр – новый прибор, специально разработанный для измерения малых величин циркуляции магнитного поля [2].

1. ФАММЕТР

Способ измерения, предложенный М.В. Немцовым [2], основан на импульсном перемагничивании аморфного железа, имеющего почти прямоугольную петлю гистерезиса. Два ленточных кольцевых сердечника из аморфного железа, имеющих общую ось симметрии, встречно намагничиваются импульсным током, протекающим через катушки W_1 (рис. 2а). При этом аморфное железо попадает в состояние насыщения (точка b на рис. 2б). По окончании импульса намагничивания ток в катушках W_1 меняет направление на противоположное, и железо сердечников релаксирует в слабом поле этого тока. При отсутствии внешнего поля оба сердечника попали бы в точку a на восходящей ветви петли гисте-

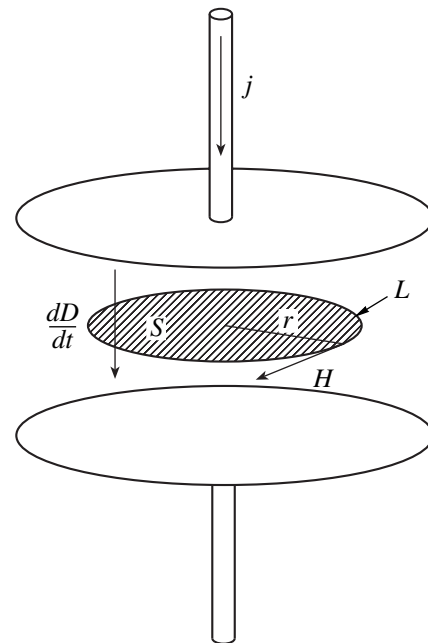


Рис. 1. Осесимметричный плоский конденсатор, L – контур интегрирования; S – поверхность, натянутая на контур.

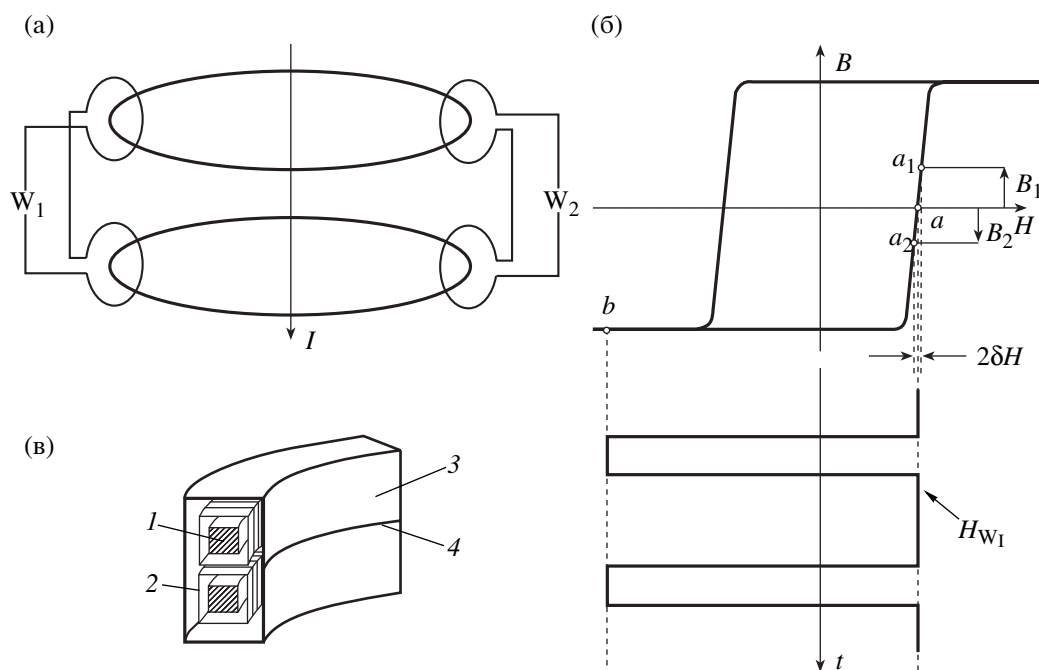


Рис. 2. Принцип действия и устройство фамметра: 1 – кольцевые сердечники из аморфного железа; 2 – каркасы с намотанными на них катушками W_1, W_2 ; 3 – магнитный экран; 4 – разрез в магнитном экране.

резиса. Если через отверстие сердечников вдоль оси симметрии протекает ток I , поле этого тока δH прибавляется к полю катушки W_1 в одном сердечнике и вычитается из поля в другом. Тогда сердечники при релаксации попадают в точки a_1 и a_2 , которым соответствуют различные величины магнитной индукции B_1 и B_2 .

При подаче нового намагничивающего импульса в катушки W_1 в считывающих катушках W_2 (включенных последовательно) вырабатывается импульс электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональный разности $B_2 - B_1$ в сердечниках. Считывающие катушки проводят интегрирование этой ЭДС по азимуту сердечников, в итоге на их выходе появляется сигнал, пропорциональный циркуляции магнитного поля.

Наложение внешнего магнитного поля влияет на взаимное положение точек a_1 и a_2 в различных азимутальных секторах сердечников. Если внешнее поле безвихревое ($\text{rot}H = 0$), дополнительная ЭДС в одном азимутальном секторе считывающей катушки компенсируется недостатком ЭДС в другом секторе, в итоге поле не оказывает влияния на выходной сигнал. Следует позаботиться, чтобы величина внешнего поля была намного меньше поля, в котором происходит релаксация сердечников, иначе точки a_1 и a_2 могут сместиться с линейного участка петли гистерезиса. В этом смысле геомагнитное поле является достаточно сильным. Для уменьшения его влияния сердечники с намотанными на них катушками W_1, W_2 помещены в экран из магнитомягкого железа. Данная конструкция представляет собой датчик

фамметра (рис. 2в). Чтобы магнитный экран не представлял собой короткозамкнутый виток, в нем сделан разрез.

Датчик соединен кабелем с электронным блоком, в котором вырабатываются все необходимые сигналы, а также проводятся прием и обработка сигнала со считывающих катушек. Конструкция фамметра, описанная в [2], была в дальнейшем усовершенствована С.М. Годиным; в частности, был расширен диапазон измерений переменных величин циркуляции магнитного поля с частотой до 400 Гц. При использовании узкополосного спектрального анализа, основанного на процедуре быстрого преобразования Фурье с длиной выборки $N \geq 2^{13}$, чувствительность фамметра не хуже 1.4 мкА (действующее значение циркуляции поля), что при диаметре отверстия датчика 100 мм соответствует плотности тока 1.8×10^{-4} А/м².

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для создания тока смещения нами использован синусоидальный сигнал $U = U_0 \sin(2\pi ft)$ с амплитудой $U_0 \leq 20$ кВ и частотой $f = 328$ Гц. Высоковольтный сигнал формируется цепью, содержащей задающий генератор, усилитель и высоковольтный трансформатор, имеющий вторичную обмотку с заземленной средней точкой (рис. 3). Двуполярное напряжение подается на пластины конденсатора, имеющие общую ось симметрии с датчиком фамметра; диаметр пластин 80 мм, их толщина 0.5 мм. Сигнал со считывающих катушек датчика поступает на изме-

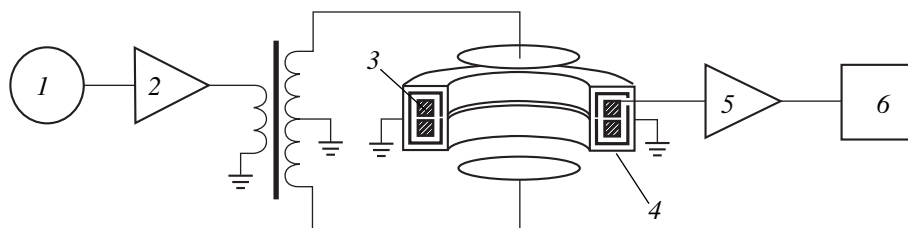


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – задающий генератор; 2 – усилитель; 3 – датчик фамметра; 4 – электростатический экран; 5 – измерительный усилитель; 6 – система регистрации данных.

рительный усилитель (входящий в состав электронного блока фамметра) и далее на систему регистрации данных, состоящую из 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя и анализатора спектра.

Датчик фамметра помещен в электростатический экран из алюминиевой фольги, имеющий форму тора с прямоугольным сечением (диаметр внутреннего отверстия 100 мм, высота 30 мм, ширина 15 мм). Экран заземлен по внешнему периметру и имеет узкую щель (разомкнут) посередине высоты во внутреннем отверстии датчика. При данной геометрии экрана фамметр регистрирует только ту часть тока смещения, которая пересекает плоскость симметрии установки (проходящую через щель в электростатическом экране). Часть тока смещения, текущего с крайних областей пластин конденсатора, захватывает экран и отводит в обход чувствительного элемента датчика, не внося вклад в измеряемую циркуляцию поля.

При выбранной частоте (328 Гц) процесс можно считать квазистационарным. В этом случае возникающее магнитное поле не вносит существенных искажений в картину электрического поля ($\text{rot}E \approx 0$), т.е. линии электрического поля можно считать неизменяющимися своей формы во времени. Следовательно, измеряемая часть тока смещения будет изменяться по гармоническому закону, как и подаваемое на пластины конденсатора напряжение.

Основным источником погрешности в процессе измерений являлось изменение чувствительности фамметра, связанное с дрейфом рабочей точки по кривой перемагничивания сердечника. По этой причине мы были вынуждены контролировать чувствительность прибора, пропуская сквозь отверстие датчика ток известной величины (10 мкА) по проводнику.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные зависимости тока смещения от напряжения для различных расстояний между пластинами конденсатора; по обеим осям отложены действующие значения. Расчетные кривые получены путем численного интегрирования уравнения Пуассона для соответствующих эксперименту положений электро-

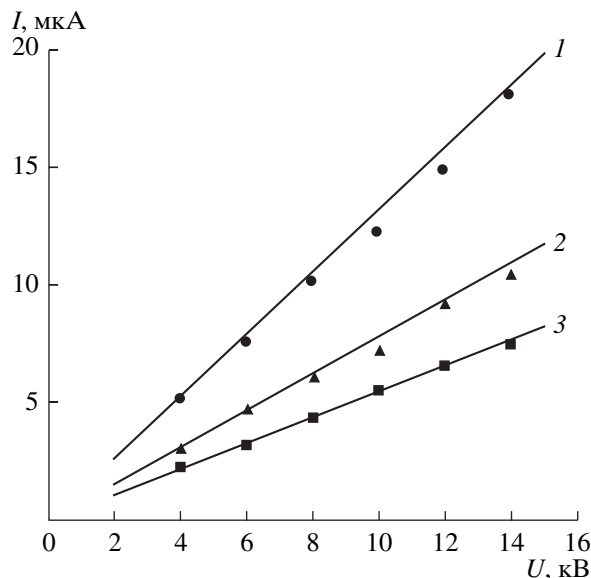


Рис. 4. Зависимости тока смещения I от напряжения U между пластинами конденсатора. Кружочки, треугольники и квадратики – экспериментальные значения, сплошные линии – расчет. Кружочки и прямая 1 соответствуют расстоянию между пластинами 60 мм, треугольники и прямая 2 – расстоянию 86 мм, квадратики и прямая 3 – расстоянию 112 мм.

дов и их потенциалов. Расчет выполнен при помощи пакета ELCUT 5.5.

Можно видеть, что измеренный ток смещения практически линейно зависит от напряжения и имеет тот же самый характер зависимости от расстояния между пластинами конденсатора, что и рассчитанный на основе теории Максвелла. Экспериментальные данные с точностью не хуже 10% совпадают с расчетными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что ток смещения создает магнитное поле. Кроме того, выяснено, что измеренное магнитное поле зависит от параметров, варьируемых в эксперименте, так, как это предсказывает теория Максвелла. Следовательно, нельзя отрицать правомерность введения Максвел-

лом тока смещения как физической реальности. Данные эксперимента [1], проведенного ранее по независимой методике, позволяют сделать такой же вывод.

Интегральный метод измерения при помощи фамметра является более простым и менее дорогостоящим по сравнению с методом измерений поля в точках, примененным авторами [1]. Кроме того, он позволяет непосредственно обнаруживать и измерять токи любой природы (конвекционные, ионные и т.д.) в лабораторных и полевых условиях. Таким образом, фамметр является универсальным прибором для исследований.

Авторы выражают благодарность президенту компании Energy and Propulsion Systems, LLC (США) Айвану Кругляку за проявленный интерес к данным исследованиям и финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bartlett D.F., Corle T.R.* // Phys. Rev. Lett., 1985. V. 55. № 1. P. 59.
2. *Rodionov B.U., Nemtsov M.V., Zaitzev A.I.* // Proc. 2nd Int. Symp. On Unconventional Plasmas (ISUP-06). 14–16 Aug. 2006. Eindhoven: Eindhoven Univ. of Technology, 2006. P.151.