

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

537.81.05(018)

ДЕМОНСТРАЦИЯ ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Х. М. Караханова, Л. М. Ковязин, В. А. Трофимов

(Одесский политехнический институт)

Демонстрация явления электромагнитной индукции осуществляется обычно в вузах с помощью замкнутого на демонстрационный гальванометр соленоида, возникновение электродвижущей силы (э.д.с.) электромагнитной индукции в котором происходит вследствие изменения сцепленного с соленоидом потока магнитной индукции [1]. Изменение же сцепленного с соленоидом потока магнитной индукции обуславливается либо деформацией или перемещением соленоида во внешнем магнитном поле, либо вследствие изменения магнитного потока во времени. Во всех этих случаях, как и в том случае, когда изменение сцепленного с соленоидом потока магнитной индукции осуществляется при помощи другого соленоида, подключенного к источнику переменного тока [2], демонстрируется только возникновение э.д.с. индукции.

Таким образом, к недостаткам данных демонстраций следует отнести то, что они дают возможность обнаруживать только наличие э.д.с. электромагнитной индукции, не показывая характер развития процесса во времени и зависимости его от параметров электрической цепи, т. е. не демонстрируют закона электромагнитной индукции.

В данной статье для более полного представления о явлении электромагнитной индукции предполагается использовать сигнал специальной формы, представляющий собой переменное напряжение, меняющееся по гармоническому закону и имеющее импульсы прямоугольной формы небольшой ширины [3], расположенные друг относительно друга через π радиан в векторной диаграмме, подаваемый на один из двух рядом расположенных соленоидов, и наблюдать развитие процессов во времени в этих соленоидах с помощью двухлучевого осциллографа.

Для демонстрации закона электромагнитной индукции — э.д.с. электромагнитной индукции \mathcal{E}_1 в соленоиде численно равна и противоположна по знаку скорости изменения потока магнитной индукции Φ_m , сцепленного с соленоидом:

$$\mathcal{E}_1 = - \frac{d\Phi_m}{dt}, \tag{1}$$

— предлагается прибор, схема которого приводится на рис. 1. Прибор содержит генератор гармонического напряжения I , генератор сигналов

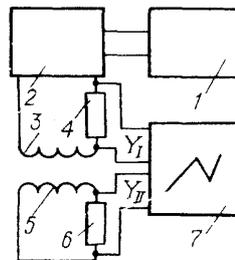


Рис.1. Схема прибора

специальной формы 2, соленоид 3 с резистором 4, соленоид 5 с резистором 6, двухлучевой осциллограф 7. Резистор 4 предназначен для формирования тока заданной формы, а резистор 6—для устранения высокочастотных паразитных колебаний. Напряжения, снимаемые с резисторов, подаются на входы первого Y_I и второго Y_{II} каналов вертикального отклонения двухлучевого осциллографа.

Пусть соленоиды 3 и 5, диаметры витков которых примерно одинаковы, неподвижны, и соленоид 5 находится внутри соленоида 3 и эти соленоиды имеют одну ось и длину l .

Допустим, что в соленоиде 3 течет ток I . Тогда поток магнитной индукции Φ , создаваемый этим током, пропорционален I .

Для вакуума

$$\Phi = L_1 I = \frac{\mu_0 N_1^2 S I}{l}, \quad (2)$$

где L_1 —индуктивность первого соленоида, N_1 —число витков первого соленоида, S —площадь витка первого соленоида, μ_0 —магнитная постоянная.

Если индуктивное сопротивление первого соленоида мало по сравнению с сопротивлением резистора 4, то сила тока I связана с напряжением U , подаваемым на первый соленоид, соотношением

$$I = \frac{U}{R_1}. \quad (3)$$

Перепишем формулу (2) с учетом формулы (3); получим

$$\Phi = \frac{\mu_0 N_1^2 S U}{l R_1}, \quad (4)$$

где U можно считать в данном случае падением напряжения на резисторе 4.

Поэтому, если на вход Y_I первого вертикального отклонения двухлучевого осциллографа подать переменное напряжение U , то отклонение луча по оси ординат будет пропорционально потоку магнитной индукции Φ в первом соленоиде 3.

Магнитный поток через один виток второго соленоида 5 $\Phi = BS = \mu_0 N_1 S I / l$. Тогда полный магнитный поток через второй соленоид, содержащий N_2 витков,

$$\Phi_m = \Phi_1 N_2 = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S I}{l}. \quad (5)$$

Если $N_1 = N_2$, то, как следует из формул (2), (4) и (5),

$$\Phi_m = \Phi = \frac{\mu_0 N_1^2 S U}{l R_1}. \quad (6)$$

Э. д. с. электромагнитной индукции, возникающая во втором соленоиде (1),

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt} = - \frac{\mu_0 N_1^2 S dU}{l R_1 dt} = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7)$$

Поэтому, если на вход Y_{II} второго вертикального отклонения двухлучевого осциллографа подать э.д.с. \mathcal{E}_i (при сопротивлении резистора 6 достаточно малом), то отклонение луча по оси ординат будет пропорционально скорости изменения потока магнитной индукции $d\Phi/dt$, а скорость изменения потока магнитной индукции в свою очередь будет пропорциональна первой производной по времени от напряжения U .

Таким образом, если на резисторе 4 будет создано синусоидальное напряжение с импульсами прямоугольной формы, то продифференцированным сигналом является косинусоида, в которой продифференцированные импульсы смещаются на $\pi/2$ по отношению к положению импульсов прямоугольной формы.

Прибор работает следующим образом.

При включении генератора гармонического напряжения 1 (см. рис. 1) с его выхода снимается сигнал синусоидальной формы, на который накладываются короткие прямоугольные импульсы. Положение импульсов соответствует моментам времени, в которых абсолютное значение сигнала синусоидальной формы превышает определенный уровень.

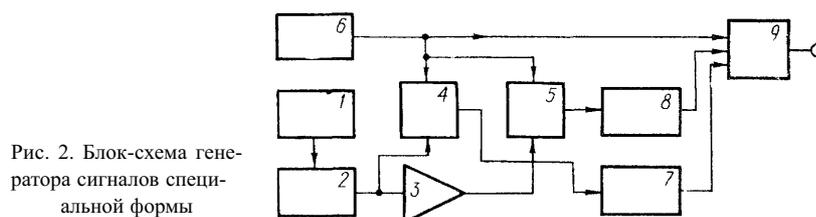


Рис. 2. Блок-схема генератора сигналов специальной формы

Формирование сигнала специальной формы—синусоидального напряжения с прямоугольными импульсами—осуществляется при помощи генератора сигналов специальной формы, блок-схема которого изображена на рис. 2. Напряжение, снимаемое с блока питания 1, обеспечивающего двухполярное напряжение ± 10 В, подается на схему задания опорного напряжения, состоящую из потенциометра 2, задающего опорное напряжение U , $0 \leq U \leq 10$ В, и инвертора напряжения 3, формирующего напряжение $-U$. На входы компараторов 4 и 5 поступает сигнал синусоидальной формы от генератора гармонического напряжения 6 (на рис. 1 этому генератору был присвоен индекс 1), а также сигналы $-U$ и $+U$ соответственно (рис. 3, 1). При уменьшении сигнала синусоидальной формы меньше величины $-U$ выходной сигнал компаратора 4 переключается в положительную полярность. При превышении сигналом синусоидальной формы величины $+U$ выходной сигнал компаратора 5 переключается в положительную полярность (см. рис. 3, 2). Одновибраторы 7 и 8 формируют короткие прямоугольные импульсы по переднему фронту сигналов компараторов. Тем самым начала импульсов одновибраторов соответствуют моментам превышения сигналом синусоидальной формы величины $+U$ и уменьшения сигнала синусоидальной формы меньше величины $-U$ (см. рис. 3, 3). С выхода суммирующего усилителя 9 снимается сигнал, форма которого изображена на рис. 3, 4. Этот сигнал подается на соленоид 8 (см. рис. 1). Падение напряжения, снятое с резистора 4, предназначенного для формирования тока в соленоиде 3, подается на вход Y_1 осциллографа. На рис. 4, 1, изображена осциллограмма этого напряжения. Зависимость магнитного потока Φ от времени в соленоиде 3 такая же, как и зависимость падения напряжения от времени в резисторе 4, так как магнитный поток пропорционален силе тока, а падение напряжения—силе тока. По закону электромагнитной индукции в соленоиде 5 должна возникнуть электродвижущая сила электромагнитной индукции $\mathcal{E}_1 = -d\Phi/dt$, т. е. э.д.с. электромагнитной индукции является первой производной магнитного потока по времени. Падение напряжения, снятое с резистора 6 и поданное на вход Y_{II} осциллографа (рис. 4, 2), является первой производной по времени от сигнала (см. рис. 4, 1), так как метка 1 смещается на $\pi/2$ в сигнале (см. рис. 4, 2) и занимает положение 1', т. е. э.д.с. электромагнитной индукции является первой производной маг-

нитного потока по времени, а при смещении метки 1 слева направо через максимум Y_1 на рис. 4, 1, что соответствует $d\Phi > 0$ и $d\Phi < 0$, метка 1' на рис. 4, 2 смещается так, что это соответствует $d\Phi/dt < 0$ и $d\Phi/dt > 0$, т. е. демонстрируется закон электромагнитной индукции Фарадея.

В примере реализации прибора использовали тороид с внутренним диаметром 60 мм и внешним диаметром 100 мм, первичная и вторичная обмотки которого имели по 100 витков проволоки диаметром 0,8 мм.

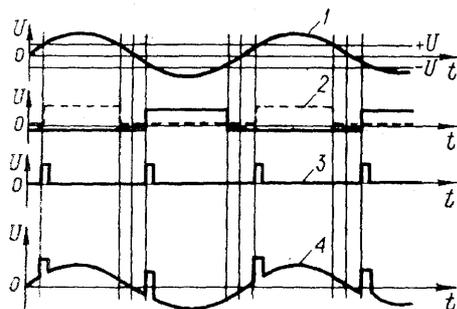


Рис. 3. Временные диаграммы формирования сигнала специальной формы

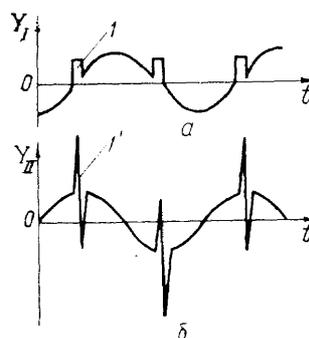


Рис. 4. Осциллограммы

Сопротивление резистора 4 1,2 кОм и сопротивление резистора 6 0,2 кОм (см рис. 1). На генератор сигналов специальной формы подавалось переменное напряжение 1 В с частотой 1180 Гц от генератора ГЗ-33. Наблюдение осциллограмм осуществлялось при помощи двухлучевого осциллографа С1-93.

Таким образом, сравнение осциллограмм на двухлучевом осциллографе позволяет демонстрировать закон электромагнитной индукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Т.И. Курс физики—М.: Высшая школа, 1985.—С. 432.
2. Огур Д. Физика.— М.: Мир, 1981.—Т. 2. С. 622.
3. Трофимов В.А., Рублев Ю.В.//УФН. 1968. Т. 94. С. 743.