

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.  
ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

Составитель: *Е. Л. Казакова*, канд. физ.-мат. наук, доцент

Рецензент: *В. С. Кривченкова*, канд. физ.-мат. наук, доцент

Петрозаводск  
2007

## Изучение явления электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле.

**Цель работы:** изучить явление электромагнитной индукции для случая неподвижного проводящего контура, находящегося в переменном магнитном поле.

**Задачи:**

1. Исследовать зависимость ЭДС индукции, возникающей в индукционной катушке, от напряженности и частоты переменного магнитного поля.
2. Установить зависимость ЭДС индукции от параметров индукционной катушки.
3. Определить магнитную постоянную  $\mu_0$ .

**Приборы и принадлежности**

1. Катушка для возбуждения электромагнитного поля длиной  $L = 750$  мм, плотность намотки  $n = 485$  витков/м.
2. Катушка, 300 витков,  $d = 40$  мм.
3. Катушка, 300 витков,  $d = 32$  мм.
4. Катушка, 300 витков,  $d = 25$  мм.
5. Катушка, 200 витков,  $d = 40$  мм.
6. Катушка, 100 витков,  $d = 40$  мм.
7. Катушка, 150 витков,  $d = 25$  мм.
8. Катушка, 75 витков,  $d = 25$  мм.
9. Базовый измерительный блок "Кобра-3".
10. Источник питания постоянного тока на 12 В (2 шт.).
11. Кабель RS 232 для соединения измерительного блока с компьютером.
12. Модуль генератора сигналов специальной формы.
13. ПК с системой Windows<sup>®</sup> и программным обеспечением.

### Теоретическое введение

#### **Явление электромагнитной индукции**

В 1831 г. М. Фарадеем было сделано одно из наиболее важных открытий – явление электромагнитной индукции. Оно заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает переменный электрический ток, который называется индукционным.

Фарадей обнаружил, что индукционный ток в проводящем контуре можно вызвать двумя различными способами:

- 1 – при перемещении замкнутого проводящего контура в стационарном магнитном поле;
- 2 – при изменении магнитного поля, в котором находится неподвижный контур.

Появление индукционного тока обусловлено тем, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ . Величина  $\varepsilon_i$  не зависит от того, каким образом осуществляется изменение магнитного потока  $\Phi$  – потока вектора магнитной индукции через поверхность  $S$ , и определяется лишь скоростью его изменения  $d\Phi/dt$ . Изменение знака производной  $d\Phi/dt$  приводит к изменению знака ЭДС индукции.

#### **Правило Ленца**

Направление индукционного тока (а значит и знак ЭДС индукции) определяются правилом Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Иначе говоря, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Рассмотрим пример (рис. 1). Магнит подносят северным полюсом к замкнутому проводящему витку. Магнитный поток, пронизывающий виток, увеличивается. Поскольку направление индукционного тока  $\mathbf{I}$  и вектора индукции  $\mathbf{B}_i$  связаны правилом правого винта, для того чтобы препятствовать увеличению магнитного потока, линии индукции магнитного поля  $\mathbf{B}_i$

должны быть направлены в противоположную сторону по отношению к линиям индукции магнитного поля магнита.

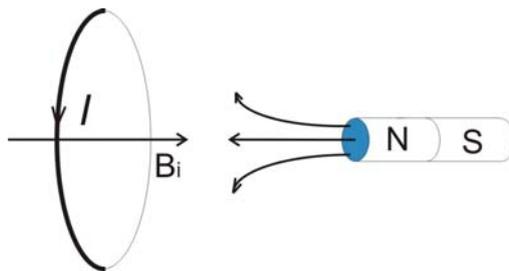


Рис. 1. Иллюстрация к правилу Ленца.

### Закон электромагнитной индукции

При изменении магнитного потока, охватываемого замкнутым проводящим контуром, в контуре возникает ЭДС индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Знак минус в формуле обусловлен правилом Ленца.

Магнитный поток через поверхность  $S$  по определению равен:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (2)$$

Если замкнутый контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит из  $N$  витков, то полный магнитный поток, охватываемый всеми витками (потокосцепление)  $\Psi$ , определяется как

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k, \quad (3)$$

где  $\Phi_k$  – магнитный поток, охватываемый одним витком.

В этом случае  $\varepsilon_i$  будет равна сумме ЭДС, индуцируемых в каждом из витков, и рассчитывается как:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (4)$$

Если магнитный поток, охватываемый каждым витком, одинаков и равен  $\Phi$ , то ЭДС индукции, возникающая в контуре определяется как:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

### Причины возникновения ЭДС индукции

1. Контур движется в стационарном магнитном поле.

При движении проводника в магнитном поле его свободные электроны под действием силы Лоренца приводятся в движение относительно проводника, т.е. в проводнике возникает электрический ток. Это явление называется индукцией токов в движущихся проводниках.

Рассмотрим прямолинейный участок  $DG$  проводника (рис. 2), который, двигаясь со ско-

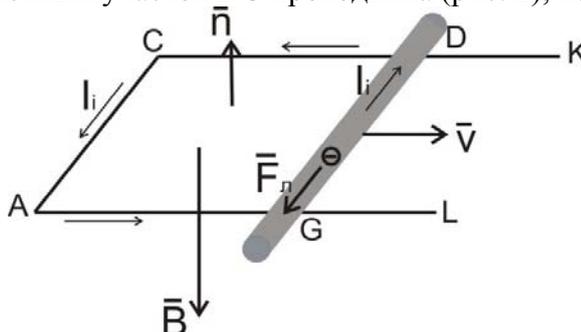


Рис. 2. Индукция в движущихся проводниках.

ростью  $v$ , скользит по проводникам СК и AL как направляющим, постоянно сохраняя контур AGDCA замкнутым.

Индукция  $B$  внешнего однородного магнитного поля перпендикулярна плоскости, в которой лежит контур. На заряды в движущемся проводнике DG действует сила Лоренца

$$\vec{F}_л = q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (6)$$

коллинеарная DG. Свободные заряды приходят в движение и образуют электрический ток в контуре AGDCA. Таким образом, на участке DG действует сторонняя сила – сила Лоренца. Работа этой силы по перемещению единичного заряда равна ЭДС, возникшей на участке DG:

$$(\varepsilon_i)_{DG} = \int_G^D \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = \int_G^D [\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{l} = vBL, \quad (7)$$

где  $E_{\text{стор}} = F_л/q$  – напряженность поля сторонних сил.

На неподвижных участках замкнутого контура ЭДС не образуется. Поэтому ЭДС индукции в замкнутом контуре AGDCA, вызванная движением его части DG во внешнем поле, равна

$$\varepsilon_i = \int_{AGDCA} \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = vBL. \quad (8)$$

Выразив скорость проводника DG в виде

$$v = dx/dt, \quad (9)$$

где  $x$  – координата его контактов точках D и G с направляющими проводниками, запишем (8) в виде

$$\varepsilon_i = LB \frac{dx}{dt}. \quad (10)$$

Примем во внимание, что

$$\Phi = -B \cdot S = -B \cdot x \cdot L \quad (11)$$

есть величина, равная потоку магнитной индукции сквозь поверхность, ограниченную контуром AGDCA. Знак минус в (11) показывает, что вектора  $B$  и  $dS$  (вектор нормали  $n$ ) противоположны по направлению.

Из приведенных рассуждений следует, что (8) является частным случаем закона электромагнитной индукции (1).

Отметим, что полученный результат справедлив для любого контура, движущегося произвольным образом в стационарном магнитном поле.

Итак, возбуждение ЭДС индукции при движении контура в стационарном магнитном поле объясняется действием силы Лоренца, т. е. взаимодействием между движущимся зарядом и стационарным магнитным полем.

## 2. Контур покоится в переменном магнитном поле.

Опыт показывает, что изменяющееся во времени магнитное поле вызывает в замкнутом покоящемся контуре индукционный ток. Возникновение этого тока обусловлено наличием сторонних сил. Какова их природа? Это не может быть сила Лоренца, как в 1-ом случае, т.к. проводник неподвижен.

Максвелл предположил, что изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля. При этом проводники играют второстепенную роль, т.к. поле существует как в проводнике, так и вне него, однако в проводнике под действием этого электрического поля заряды приходят в движение.

Это электрическое поле существенно отличается от электростатического: оно не потенциальное, а вихревое. Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты. Работа сил вихревого электрического поля при перемещении заряда по замкнутому контуру не равна нулю:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L} = \varepsilon_i. \quad (12)$$

В этом случае закон электромагнитной индукции (1) имеет вид:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (13)$$

Здесь символ частной производной по времени ( $\partial/\partial t$ ) подчеркивает тот факт, что контур  $L$  и поверхность, охватываемая контуром – неподвижны.

Правую часть в равенстве (13) преобразуем с учетом (2) для магнитного потока:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}, \quad (14)$$

причем производная по времени внесена под знак интеграла на том основании, что площадь интегрирования не зависит от времени.

С учетом (1), (12) и (14) получаем, что циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру  $L$  равна со знаком минус производной по времени от магнитного потока через поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{L} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}. \quad (15)$$

Уравнение (15) входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля и выражает тот факт, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

### Методика эксперимента

Внутри длинной катушки, служащей источником переменного магнитного поля – катушки возбуждения  $K_b$ , располагают короткую индукционную катушку  $K_i$ . По катушке возбуждения пропускают переменный электрический ток. Внутри катушки  $K_b$  возникает переменное магнитное поле, частоту и напряженность которого можно менять. ЭДС индукции, которая возникает в индукционной катушке, зависит от частоты и напряженности магнитного поля, а также от параметров индукционной катушки (диаметр и число витков).

Поток линий индукции однородного магнитного поля (в центре катушки возбуждения) через поверхность  $S$ , перпендикулярную линиям индукции, равен:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (16)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения индукционной катушки,  
 $B$  – индукция магнитного поля внутри катушки возбуждения.

Согласно закону электромагнитной индукции (5), в индукционной катушке с количеством витков  $N$ , возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}. \quad (17)$$

Можно показать, что индукция магнитного поля длинного соленоида равна:

$$B(t) = \mu_0 \cdot \frac{N_c}{L} \cdot I(t) = \mu_0 \cdot n \cdot I(t), \quad (18)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,

$n$  – плотность намотки,

$L$  – длина соленоида,

$N_c$  – число витков соленоида,

$I$  – сила тока в соленоиде.

Если сила тока в катушке возбуждения меняется по гармоническому закону

$$I(t) = I_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad (19)$$

то в индукционной катушке, согласно (17), (18) и (19), возникнет ЭДС индукции, меняющаяся по гармоническому закону:

$$\varepsilon_i = \mu_0 \cdot n \cdot \omega \cdot N \cdot I_{\max} \cdot S \cdot \cos \omega t = \varepsilon_{i \max} \cdot \cos \omega t. \quad (20)$$

Для действующего значения ЭДС индукции получаем выражение:

$$\varepsilon_d = \mu_0 \cdot n \cdot \omega \cdot N \cdot I_d \cdot S.$$

где  $I_d$  – действующее значение силы тока.

Общий вид и схема экспериментальной установки представлена на рис. 3 и 4. Катушка возбуждения КВ подключается к генератору переменного тока (function generator). ЭДС индукции, возбуждаемая в индукционной катушке  $K_i$  подается на вход Analog In2 установки «Кобра-3». Передача данных на компьютер (сила и частота переменного тока в КВ и  $\epsilon_i$ , возникающая в катушке  $K_i$ ) осуществляется с помощью базового блока «Кобра-3», подключенного к компьютеру.

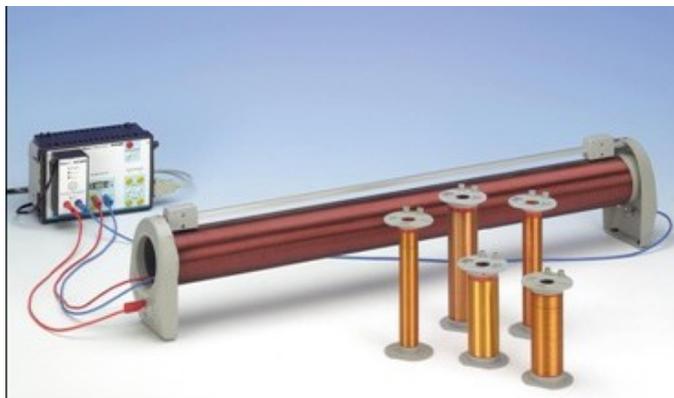


Рис. 3. Общий вид установки

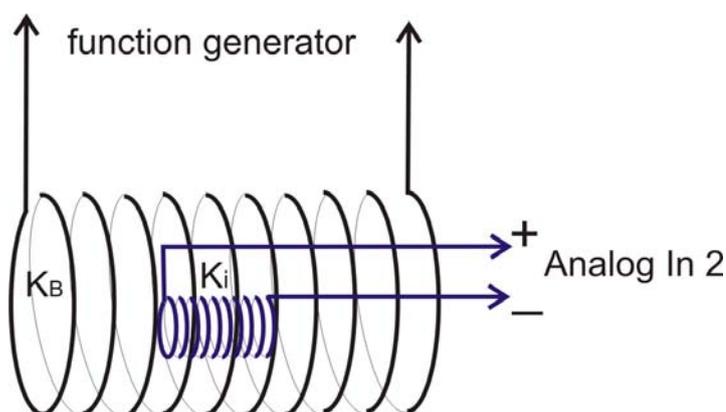


Рис. 4. Схема подключения катушек

### Порядок выполнения работы

#### **Упражнение 1 Исследование зависимости ЭДС индукции от напряженности переменного магнитного поля**

1. Соберите экспериментальную установку, как показано на рис. 3 и 4. Для этого подсоедините катушку возбуждения к модулю генератора сигналов специальной формы, а индукционную катушку разместите внутри катушки возбуждения и соедините ее с «Аналоговым входом 2/S2» (“Analog In 2/S2”) – разъемы желтого цвета “+” и “-”.
2. Подсоедините базовый блок “Кобра-3” к компьютеру с помощью кабеля RS 232.
3. Включите питание блока «Кобра-3» и модуля генератора сигналов специальной формы.
4. Запустите программу «Phywe measure». В строке меню выберите пункт «Gauge» («Устройство») " Power Graph" ("Графопостроитель"). В появившемся окне щелкните на символе генератора сигналов специальной формы. Генератор должен работать в режиме постоянного тока ( $I_{const}$ ), поскольку в данном эксперименте важна напряженность поля, которая зависит от силы тока.
5. Выберите параметры измерения, как показано на рис. 5 (см. приложение). Установите частоту переменного тока 800 Гц и пределы изменения амплитудного значения силы тока в пределах от 0 до 100 мА.
6. Нажмите кнопку «Continue». На экране будут отображены значения частоты и амплитуды

7. Приступите к измерениям, нажав кнопку «Start measurement».
8. Эксперимент завершается автоматически, когда сила тока в катушке  $K_B$  увеличится до 100 мА.
9. По завершении эксперимента результаты будут представлены на мониторе в виде графика  $U_2(I)$ .
10. Проведите аппроксимацию зависимости  $U_2(I)$  и определите ее параметры. Для этого воспользуйтесь пунктами меню «Analysis» – «function fitting».
11. Полученные результаты сохраните в формате Excel. Для этого в меню «Measurement» выберите «Export data». В появившемся диалоговом окне выберите «Save to file» и «Export as numbers». Сохраните файл с расширением xls или сохраните данные в буфере обмена, выбрав пункт меню «Copy to clipboard».
12. Повторите измерения (пп.4 – 10) для индукционных катушек с другими параметрами.
13. Постройте графики зависимости  $\varepsilon_i(H)$  для различных индукционных катушек.
14. По результатам опытов рассчитайте магнитную постоянную  $\mu_0$ .
15. Проведите статистическую обработку результатов и сделайте выводы.

***Упражнение 2. Исследование зависимости ЭДС индукции от частоты переменного магнитного поля***

1. Запустите программу «Phywe measure». В строке меню выберите пункт «Gauge» («Устройство») " Power Graph" ("Графопостроитель"). В появившемся окне щелкните на символе генератора сигналов специальной формы.
2. Выберите параметры измерения, как показано на рис. 6. Установите амплитудное значение силы тока 100 мА и пределы изменения частоты переменного тока от 100 до 1000 Гц.
3. Нажмите кнопку «Continue». На экране будут выведены лицевые панели цифровых приборов, на которых будут отображены значения частоты и амплитуды переменного тока в катушке возбуждения и  $\varepsilon_i = U_2$ , возникающая в индукционной катушке ( $U_2$  – напряжение, регистрируемое на входе «Analog in 2»).
4. Начните измерения, нажав кнопку «Start measurement».
5. Эксперимент завершается автоматически, когда частота переменного тока увеличится до 1000 Гц.
6. По завершении эксперимента результаты будут представлены в виде графика  $U_2(v)$ .
7. Проведите аппроксимацию зависимости  $U_2(v)$  и определите ее параметры, воспользовавшись пунктами меню «Analysis» – «function fitting».
8. Полученные результаты сохраните в формате Excel. Для этого в меню «Measurement» выберите «Export data». В появившемся диалоговом окне выберите «Save to file» и «Export as numbers». Сохраните файл с расширением xls или сохраните данные в буфере обмена, выбрав пункт меню «Copy to clipboard».
9. Повторите измерения (пп.4–10) для индукционных катушек с другими параметрами.
10. По результатам опытов рассчитайте магнитную постоянную  $\mu_0$ .
11. Проведите статистическую обработку результатов и сделайте выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое магнитный поток? Потокосцепление?
2. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
3. Запишите закон электромагнитной индукции.
4. Как определить направление индукционного тока в контуре?
5. Какова причина возникновения ЭДС индукции при движении проводника в стационарном магнитном поле?
6. Каковы условия возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре?
7. В чем состоит отличие электростатического и вихревого электрического полей?

## Индивидуальное задание

| № варианта | Сила тока $I$ , мА | Число витков индукционной катушки ( $N$ ) | Диаметр индукционной катушки ( $\varnothing$ , мм) |
|------------|--------------------|---|--|
| 1          | 40                 | 300                                       | 33   |
| 2          | 60                 | 300                                       | 41   |
| 3          | 80                 | 200                                       | 41   |

Рассчитайте напряженность вихревого электрического поля на расстоянии от оси катушки возбуждения, равном радиусу индукционной катушки, по данным для Вашего варианта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1978, Т.2.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1977, Т.3.
4. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. М.: Наука, 1972, Т.2.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Мильковская Л.Б. Курс физики. М.: Высшая школа, 1977, Т.2.
6. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
7. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1983.

# Приложение

## Установки параметров для упражнения 1

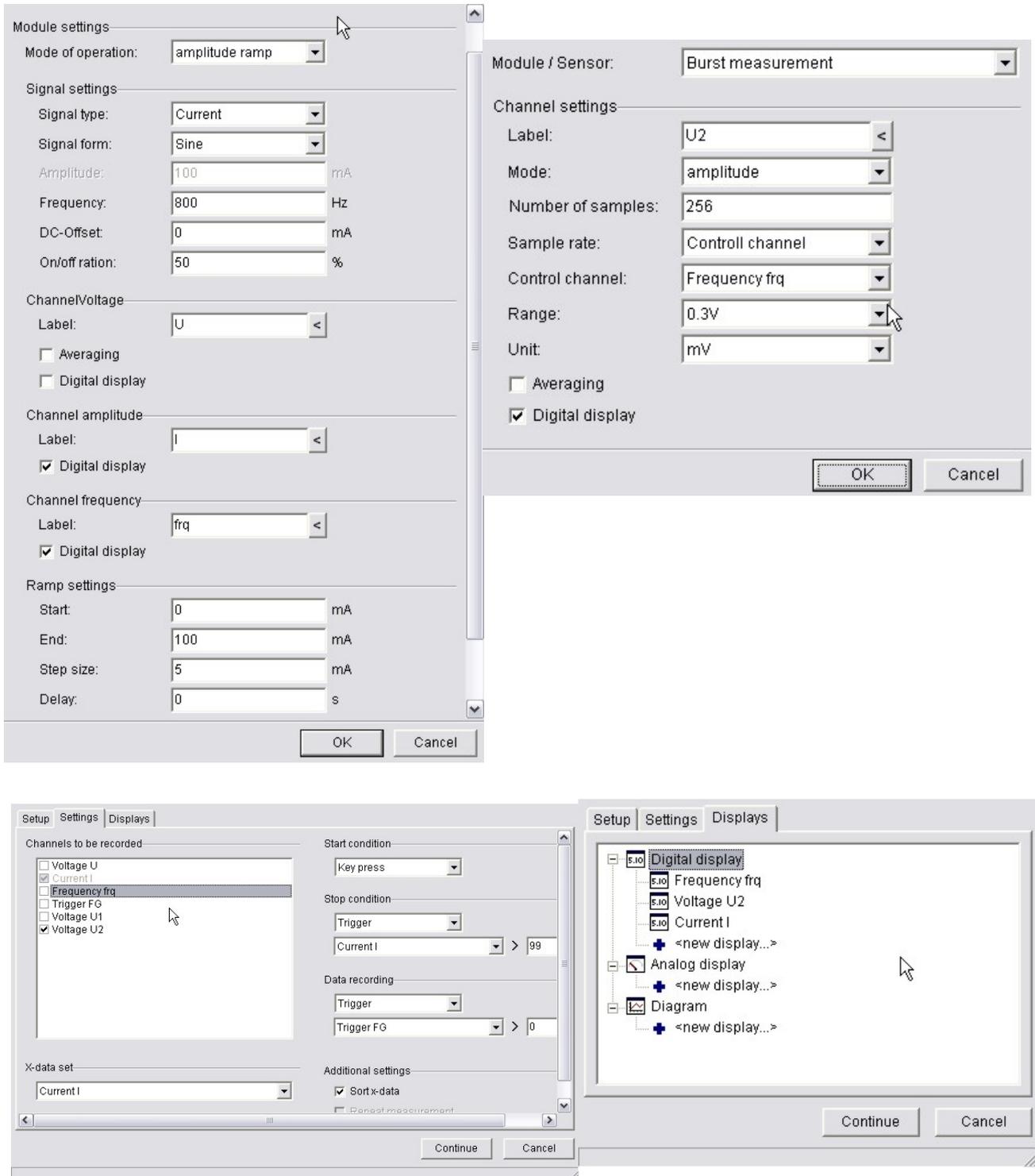


Рис.5.

## Установки параметров для упражнения 2

Setup Settings Displays

Channels to be recorded

- Voltage U
- Current I
- Frequency frq
- Trigger FG
- Voltage U1
- Voltage U2

X-data set

Frequency frq

Start condition

Key press

Stop condition

Trigger

Frequency frq > 999

Data recording

Trigger

Trigger FG > 0

Additional settings

- Sort x-data
- Repeat measurement

Continue Cancel

Module settings

Mode of operation: frequency ramp

Signal settings

Signal type: Current

Signal form: Sine

Amplitude: 100 mA

Frequency: 800 Hz

DC-Offset: 0 mA

On/off ration: 50 %

Channel Voltage

Label: U

- Averaging
- Digital display

Channel amplitude

Label: I

- Digital display

Channel frequency

Label: frq

- Digital display

Ramp settings

Start: 100 Hz

End: 1000 Hz

Step size: 50 Hz

Delay: 0 s

OK Cancel

Рис.6