

## Работа 3.7.1

### Скин-эффект

**Цель работы:** исследовать явление проникновение переменного магнитного поля в медный полый цилиндр

**В работе используются:** генератор сигналов АКИП-3420, соленоид, памотанный на полый цилиндрический каркас, медный экран в виде полого цилиндра, измерительная катушка, амперметр, вольтметр, двухканальный осциллограф ГОС-620, RLC-метр.

#### Теоретические сведения

В работе изучается скин-эффект в длинном тонкостенном медном цилиндре, помещённом внутрь соленоида.

Теоретически такая задача сложнее, чем рассмотренный в п. 3.1 скин-эффект в полу бесконечном пространстве: здесь требуется совместное решение уравнений скин-эффекта (уравнения диффузии поля) (7.22), (7.23) в стенке цилиндра и квазистационарных уравнений поля в его полости.

Пусть цилиндр достаточно длинный, так что в нём можно пренебречь краевыми эффектами. В этом приближении магнитное поле  $\mathbf{H}$  всюду направлено по оси системы (ось  $z$ ), а вихревое электрическое поле  $\mathbf{E}$  будет всюду перпендикулярно радиусу, то есть линии поля образуют соосные окружности (рис. 1). Все величины будем считать колеблющимися по гармоническому закону с некоторой частотой  $\omega$ , задаваемой частотой колебания тока в соленоиде. Тогда для ненулевых компонент поля можно записать

$$H_z = H(r)e^{i\omega t}, \quad E_\phi = E(r)e^{i\omega t},$$

где  $H(r)$  и  $E(r)$  — комплексные амплитуды колебаний соответствующих полей, зависящие только от расстояния  $r$  до оси системы. Заметим, что на границе цилиндра должны быть непрерывны касательные к поверхности компоненты как  $E$ , так и  $B$ , поэтому функции  $E(r)$  и  $H(r)$  непрерывны во всей исследуемой области.

Пусть длинный полый цилиндр имеет радиус  $a$  и толщину стенки  $h \ll a$ . Последнее условие позволяет для описания поля внутри стенки

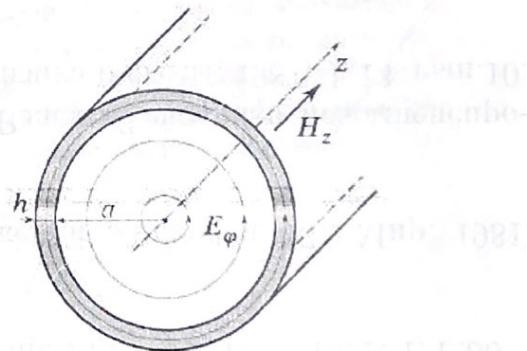


Рис. 1. Электрическое и магнитное в тонкостенном цилиндре

ограничиться одномерным приближением. При этом для полного решения задачи необходимо вычислить и распределение поля *внутри* цилиндра.

Поскольку внутри цилиндра ток отсутствует, магнитное поле там является однородным (аналогично полю внутри пустого соленоида):  $H_z(r, t) = H_1 e^{i\omega t}$ , где  $H_1 = \text{const}$  — амплитуда поля на внутренней поверхности цилиндра. Для нахождения вихревого электрического поля воспользуемся законом электромагнитной индукции (7.3) в интегральной форме:

$$E_\varphi \cdot 2\pi r = -\mu_0 \pi r^2 \cdot \frac{dH_z}{dt} \quad \rightarrow \quad E(r) = -\frac{1}{2} \mu_0 r \cdot i\omega H_1.$$

Отсюда получим связь амплитуд колебаний электрического и магнитного полей на внутренней ( $r = a$ ) границе цилиндра:

$$E_1 = -\frac{1}{2} i\omega a \mu_0 H_1. \quad (1)$$

Соотношение (1) используем далее как дополнительное граничное условие для задачи о распределении поля внутри стенки.

Поле внутри тонкой стенки цилиндра («экрана») описывается уравнением скин-эффекта (7.25) (уравнением диффузии поля) в плоской геометрии (рис. 2). Поместим начало отсчета на внешнюю поверхность цилиндра и направим ось  $x$  к оси системы, и аналогично (7.26) запишем дифференциальное уравнение для комплексной амплитуды магнитного поля:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = i\omega \sigma \mu_0 H \quad (2)$$

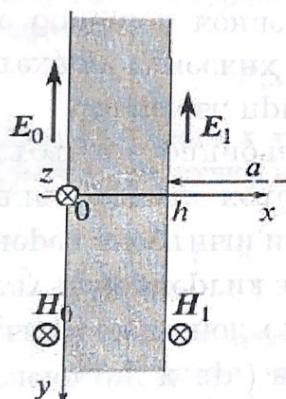
(для медного цилиндра можно положить  $\mu \approx 1$ ).

Границные условия для (2) зададим в виде

Рис. 2. Поле в стенке  
цилиндра

$$H(0) = H_0, \quad H(h) = H_1. \quad (3)$$

Здесь  $H_0$  — амплитуда колебаний магнитного поля на внешней границе цилиндра. Её значение определяется только током в обмотке соленоида, и совпадает с полем внутри соленоида в отсутствие цилиндра. Величина  $H_1$  также поддается непосредственному измерению — это амплитуда колебаний однородного поля внутри цилиндра. Поля  $H_0$  и  $H_1$  не являются независимыми — они связаны через решение уравнений поля вне проводника, т. е. внутри «экрана». Эта связь выражена соотношением (1).



Решение (2) ищем в виде

$$H(x) = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}, \quad (4)$$

где  $A, B$  — определяемые из граничных условий константы,

$$\alpha = \sqrt{i\omega\sigma\mu_0} = \frac{1+i}{\delta} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} e^{i\pi/4} \quad (5)$$

— один из корней уравнения (7.28),  $\delta$  — глубина скин-слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0}}. \quad (6)$$

Заметим, что это решение немного отличается от (7.29): ранее мы использовали только один корень уравнения (7.28), однако здесь мы имеем дело уже не с полупространством, а с *конечной* областью в виде плоского слоя  $h$ , поэтому решение должно содержать оба корня.

Первое условие (3) даёт  $A + B = H_0$ , что позволяет исключить  $A$  из (4):

$$H(x) = H_0 e^{-\alpha x} + 2B \operatorname{sh} \alpha x.$$

Выразим электрическое поле из закона Ампера (7.21). В одномерном случае

$$E(x) = \frac{1}{\sigma} \frac{dH}{dx} = \frac{\alpha}{\sigma} (-H_0 e^{-\alpha x} + 2B \operatorname{ch} \alpha x).$$

Далее положим  $x = h$ , воспользуемся условием (1), и, исключив константу  $B$ , получим после преобразований связь между  $H_0$  и  $H_1$ :

$$H_1 = \frac{H_0}{\operatorname{ch} \alpha h + \frac{1}{2} \alpha a \operatorname{sh}(\alpha h)}. \quad (7)$$

Рассмотрим предельные случаи (7).

1. При *малых частотах* толщина скин-слоя превосходит толщину цилиндра  $\delta \gg h$ . Тогда  $|\alpha h| \ll 1$ , поэтому  $\operatorname{ch} \alpha h \approx 1$ ,  $\operatorname{sh} \alpha h \approx \alpha h$  и

$$H_1 \approx \frac{H_0}{1 + i \frac{ah}{\delta^2}}. \quad (8)$$

Заметим, что величина  $ah/\delta^2$  в общем случае не мала, поскольку при  $h \ll a$  возможна ситуация  $h \ll \delta \ll a$ . Отношение модулей амплитуд здесь будет равно

$$\frac{|H_1|}{|H_0|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{ah}{\delta^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}(ah\sigma\mu_0\omega)^2}}. \quad (9)$$

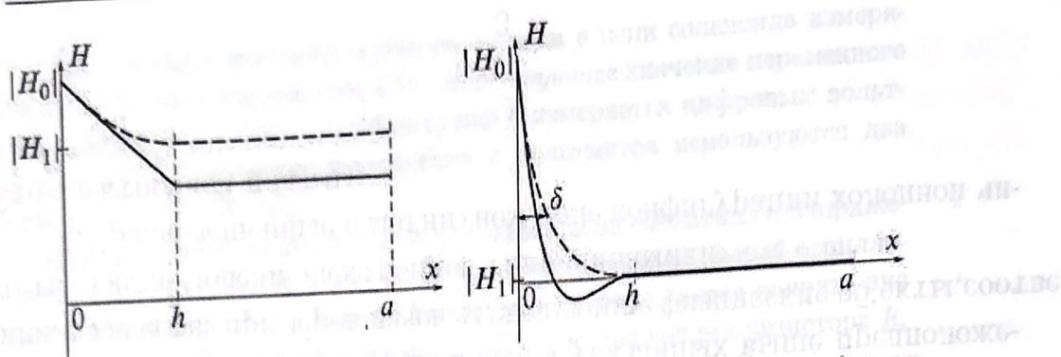


Рис. 3. Распределение амплитуды колебаний магнитного поля (пунктир) и его мгновенного значения при некотором  $t$  (сплошная) в зависимости от расстояния до внешней стенки цилиндра. Слева случай низких частот ( $\delta \gg h$ ), справа — скин-эффект при высоких частотах ( $\delta \ll h$ )

При этом колебания  $H_1$  отстают по фазе от  $H_0$  на угол  $\psi$ , определяемый равенством

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{ah}{\delta^2} \quad (10)$$

2. При достаточно больших частотах толщина скин-слоя станет меньше толщины стенки:  $\delta \ll h$ . Тогда  $|ah| \gg 1$  и  $|\alpha a| \gg 1$ , а также  $\operatorname{sh}(ah) \approx \operatorname{ch}(ah) \approx \frac{1}{2} e^{ah}$ . Выражение (7) с учётом (5) переходит в

$$\frac{H_1}{H_0} = \frac{4}{\alpha a} e^{-ah} = \frac{2\sqrt{2}\delta}{a} e^{-\frac{h}{\delta}} e^{-i\left(\frac{\pi}{4} + \frac{h}{\delta}\right)} \quad (11)$$

Как видно из формулы (11), в этом пределе поле внутри цилиндра по модулю в  $\frac{2\sqrt{2}\delta}{a} e^{-h/\delta}$  раз меньше, чем снаружи, и, кроме того, запаздывает по фазе на

$$\psi = \frac{\pi}{4} + \frac{h}{\delta} = \frac{\pi}{4} + h \sqrt{\frac{\omega \sigma \mu_0}{2}} \quad (12)$$

На рис. 3 схематично изображено распределение магнитного поля от координаты в двух рассмотренных предельных случаях.

#### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для исследования скин-эффекта в полом цилиндре изображена на рис. 4.

Переменное магнитное поле создается с помощью соленоида 1, намотанного на цилиндрический каркас 2 из поливинилхлорида, который подключается к генератору сигналов (ЗГ) АКИП-3420 (канал А). Внутри каркаса расположен медный экран 3 в виде полого цилиндра (актуальные параметры экрана указаны на установке).

Действующее значение переменного тока в цепи соленоида измеряется цифровым амперметром «А». Действующее значение переменного напряжения на измерительной катушке 4 измеряется цифровым вольтметром «V». В качестве амперметра и вольтметра используются два мультиметра GDM-8245.

Для измерения сдвига фаз между током в цепи соленоида и напряжением на измерительной катушке используется двухканальный осциллограф GOS-620 (ЭО). На канал «Y» осциллографа подается напряжение с измерительной катушкой, а на канал «X» — напряжение с резистора  $R$ , которое пропорционально току в цепи соленоида.

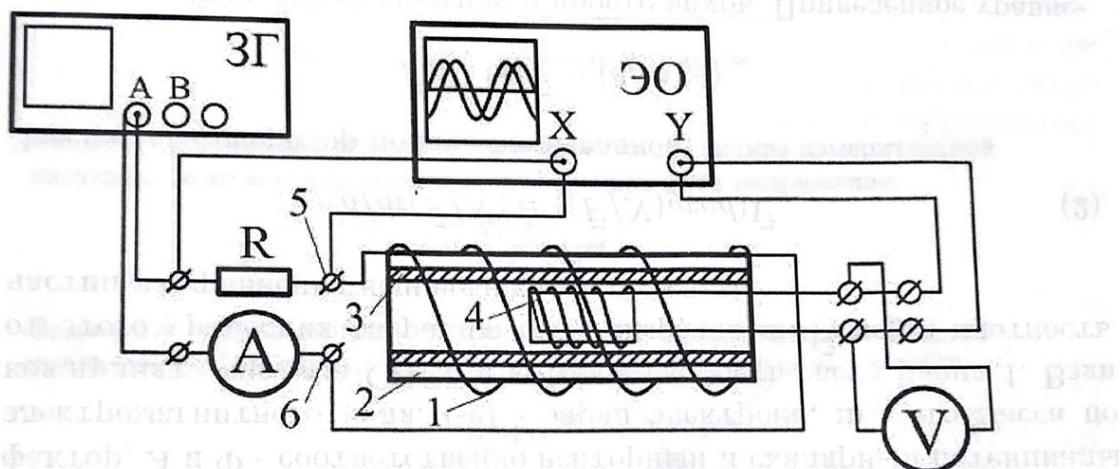


Рис. 4. Экспериментальная установка для изучения скин-эффекта

Схема экспериментальной установки для нахождения проводимости  $\sigma$  по изменению индуктивности катушки  $L$  изображена на рис. 5. RLC-метр, измеряющий индуктивность, подключается к катушке 1 через клеммы 5 и 6 на панели установки. Другие приборы при этом должны быть отсоединены от цепи, т.к. RLC-метр измеряет индуктивность активным образом.

#### Измерение отношения амплитуд магнитного поля внутри и вне экрана

С помощью вольтметра  $V$  измеряется действующее значение ЭДС индукции, которая возникает в измерительной катушке, находящейся в переменном магнитном поле  $H_1 e^{i\omega t}$ . Комплексная амплитуда ЭДС индукции в измерительной катушке равна

$$U = -SN \frac{dB_1(t)}{dt} = -i\omega\mu_0 SN H_1 e^{i\omega t},$$

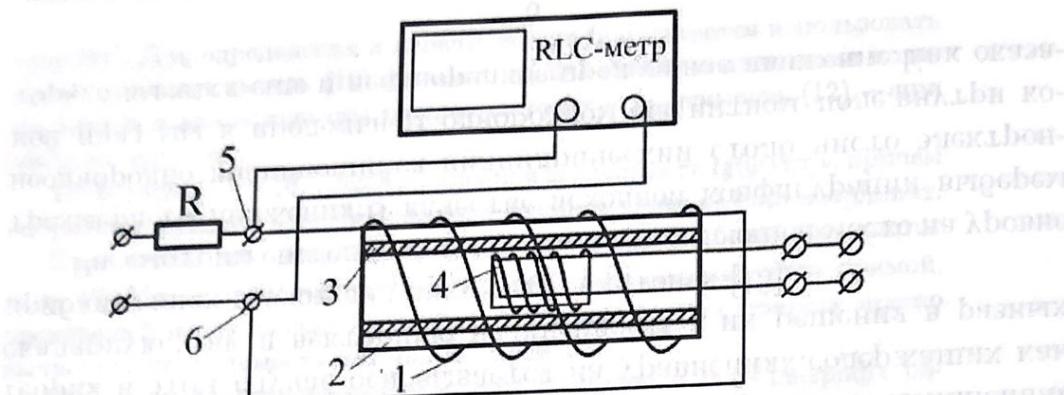


Рис. 5. Схема подключения RLC-метра

где  $SN$  — произведение площади витка на число витков измерительной катушки. Показания вольтметра, измеряющего это напряжение:

$$U = \frac{SN\omega}{\sqrt{2}} \mu_0 |H_1|.$$

Видно, что модуль амплитуды магнитного поля внутри экрана  $|H_1|$  пропорционален  $U$  и обратно пропорционален частоте сигнала  $\nu = \omega/2\pi$ :

$$|H_1| \propto \frac{U}{\nu}.$$

При этом поле вне экрана  $|H_0|$  пропорционально току  $I$  в цепи соленоида, измеряемому амперметром  $A$ :

$$|H_0| \propto I.$$

Следовательно,

$$\frac{|H_1|}{|H_0|} = \text{const} \cdot \frac{U}{\nu I}. \quad (13)$$

Таким образом, отношение амплитуд магнитных полей снаружи и вне экрана (коэффициент ослабления) может быть измерено по отношению  $U/\nu I$  при разных частотах. Неизвестная константа в соотношении (13) может быть определена по измерениям при малых частотах  $\nu \rightarrow 0$ , когда согласно (9)  $|H_1|/|H_0| \rightarrow 1$ .

#### Определение проводимости материала экрана по фазовому сдвигу

В установке в качестве экрана используется медная труба промышленного производства. Технология изготовления труб оказывает заметное влияние на электро проводимость. Из-за наличия примесей проводимость меди нашей трубы отличается от табличного значения (в меньшую

сторону). Для определения проводимости можно воспользоваться методом фазового сдвига. Для этого в цепь включают вольтметр и амперметр, измеряющие напряжение и ток в цепи. Тогда фазовый сдвиг  $\phi$  между напряжением и током определяется по формуле

сторону). Для определения  $\sigma$  нашего экрана предлагается использовать частотную зависимость (10) фазового сдвига между магнитными полями внутри и вне экрана при низких частотах и зависимость (12) — при высоких частотах.

Из формул (10) и (6) следует линейная зависимость  $\operatorname{tg}(\psi)$  от  $v$ , причем аппроксимирующая прямая должна проходить через начало координат.

Как видно из выражения (12), в области больших частот  $v \gg 1/(\pi h^2 \sigma \mu_0)$  зависимость  $(\psi(\sqrt{v}) - \pi/4)$  аппроксимируется прямой, проходящей через начало координат. По наклону этих прямых можно вычислить проводимость материала экрана.

Процедура измерения разности фаз с помощью осциллографа подробно описана в Приложении Г.

Заметим, что на схеме, изображённой на рис. 4, на входной канал Y осциллографа подаётся сигнал с измерительной катушкой, который пропорционален не полюю внутри экрана, а его производной по времени, а это означает, что появляется дополнительный сдвиг по фазе на  $\pi/2$ . Поэтому измеренный по экрану осциллографа сдвиг по фазе между двумя синусоидами будет на  $\pi/2$  больше фазового сдвига между магнитными полями вне и внутри экрана:

$$\varphi = \psi + \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

#### Влияние скин-эффекта на индуктивность катушки

Из-за скин-эффекта индуктивность соленоида с медным цилиндрическим экраном внутри будет зависеть от частоты тока. На высоких частотах магнитное поле не проникает внутрь соленоида (за экран), поэтому суммарный магнитный поток, пронизывающий катушку, уменьшается, и, соответственно, уменьшается и индуктивность. При низких частотах, когда толщина скин-слоя  $\delta$  больше толщины медного экрана  $h$ , магнитное поле проникает внутрь катушки, однако его амплитуда падает (по формуле (9)) и возникает разность фаз между колебаниями поля за экраном и перед ним (по формуле (10)). Из-за чего также изменяется магнитный поток, а следовательно — и индуктивность.

Рассмотрим магнитный поток через катушку как сумму двух магнитных потоков: 1) пронизывающий область между катушкой и цилиндрическим экраном  $\Phi_{out}$ ; 2) пронизывающий область за экраном  $\Phi_{in}$ :

$$\Phi = \Phi_{out} + \Phi_{in} = H_0 S_0 + H_1 S_1 = LI, \quad (15)$$

где  $H_0, H_1$  — мгновенные значения магнитного поля внутри и снаружи цилиндра при данном токе  $I$ ;  $S_0, S_1$  — площади внешней и внутренней (по отношению к цилиндрическому экрану) областей соответственно.

Очевидно, что минимальная индуктивность будет в случае, когда  $\Phi_{in} = 0$  (поле есть только во внешней области). При этом  $L_{min}$  не зависит от частоты:

$$L_{min} = \frac{\Phi_{out}}{I}. \quad (16)$$

Выразим поток магнитного поля сквозь внутреннюю область  $\Phi_{in}$  через поток сквозь внешнюю  $\Phi_{out}$  при произвольном переменном токе  $I$ :

$$\Phi_{in} = H_1 S_1 = \frac{H_1 S_1}{H_0 S_0} \Phi_{out} = \frac{\Phi_{out}}{n} \frac{S_1}{S_0}, \quad (17)$$

где коэффициент  $n$ , характеризующий ослабление поля за экраном, равен:

$$n = \frac{H_0}{H_1} = \frac{|H_0|}{|H_1|} \frac{1}{\cos \psi}, \quad (18)$$

Максимальная индуктивность катушки достигается при максимальном потоке поля во внутренней области (когда  $H_0 = H_1$ ):

$$\Phi_{max} = \Phi_{out} + \Phi_{in_{max}} = H_0(S_0 + S_1) = L_{max} I_m, \quad (19)$$

где поток через внешнюю область равен  $H_0 S_0 = L_{min} I_m$ . Откуда получаем отношение площадей областей:

$$\frac{S_1}{S_0} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{min}}. \quad (20)$$

Суммируя всё вышеписанное, получаем индуктивность катушки:

$$L = L_{min} + \frac{L_{max} - L_{min}}{n}, \quad (21)$$

Используя формулы (9), (10), (6), окончательно получаем зависимость индуктивности катушки от частоты:

$$\frac{L_{max} - L}{L - L_{min}} = \pi^2 a^2 h^2 \mu_0^2 \sigma^2 \nu^2. \quad (22)$$

Данная зависимость может быть аппроксимирована прямой, по углу наклона которой можно найти проводимость материала экрана  $\sigma$ .

## ЗАДАНИЕ

- По известным параметрам установки, приняв проводимость меди для оценки равной  $\sigma \sim 5 \cdot 10^7$  Сименс/м (СИ), рассчитайте частоту  $\nu_h$  [Гц], при которой толщина стенок экрана равна скиновой длине  $h = \delta$  (толщина экрана указана на установке).

2. Соберите установку согласно схеме на рис. 4 и настройте приборы согласно Приложению (А, Б, В). Установите начальную частоту сигнала генератора  $\sim 0,01\nu_h$ .
3. В области низких частот (от  $\sim 0,01\nu_h$  до  $0,05\nu_h$ ) получите зависимость отношения  $\xi = U/vI$  от частоты  $v$ .

Для этого измерьте силу тока в цепи соленоида и напряжение на измерительной катушке для не менее 10 значений частоты  $v$  в выбранном диапазоне.

Согласно (13) величина  $\xi$  прямо пропорциональна коэффициенту ослабления магнитного поля внутри экрана относительно поля снаружи:

$$\xi = \xi_0 |H_1| / |H_0|.$$

4. Исследуйте зависимость величины  $\xi$  и фазового сдвига  $\psi$  от частоты  $v$  при низких частотах в диапазоне от  $0,05\nu_h$  до  $\sim 0,5\nu_h$ .

Для этого получите статичную и удобную для измерения картинку на экране осциллографа и измерьте разность фаз между напряжениями на резисторе и на катушке (см. Приложение Г) для не менее 15 значений частоты  $v$  в выбранном диапазоне, а также силу тока в цепи соленоида и напряжение на измерительной катушке.

Рекомендуется провести 5 – 7 измерений в диапазоне частот  $(0,05 \div 0,1\nu_h)$  и 8 – 10 – в диапазоне  $(0,1 \div 0,5)\nu_h$ .

5. Повторите измерения пункта 4 при высоких частотах в диапазоне  $(0,5 \div 15)\nu_h$  (15 – 20 точек, равномерно распределенных в логарифмическом масштабе).

6. Исследуйте зависимость индуктивности катушки  $L$  от частоты  $v$ . Для этого соберите схему, изображенную на рис. 5, и измерьте с помощью RLC-метра индуктивность катушки при различных частотах (от минимально возможной для данной модели RLC-метра  $v_{min}$  до  $\sim 1,5\nu_h$ ). Рекомендуется получить не менее 10 точек в диапазоне  $v_{min} \div 0,5\nu_h$  и не менее 5 точек в диапазоне  $0,5\nu_h \div 1,5\nu_h$ .

#### Обработка результатов

7. По результатам измерений пп. 3 и 4 (в области низких частот до  $v \sim 0,2\nu_h$ ) постройте график в координатах  $1/\xi^2 = f(v^2)$ . Убедитесь в том, что зависимость линейная.

Экстраполируя зависимость к точке  $v = 0$ , соответствующей  $|H_1|/|H_0| = 1$ , определите величину  $\xi_0$  – коэффициент пропорциональности между  $\xi = U/vI$  и коэффициентом ослабления магнитного поля  $|H_1|/|H_0|$ .

По угловому коэффициенту зависимости рассчитайте проводимость меди  $\sigma$ , используя (9).

8. Постройте график зависимости фазового сдвига, измеренного в пункте 4,  $\operatorname{tg} \psi = f(v)$  от частоты (не забудьте учесть дополнительный сдвиг фаз  $\pi/2$  по формуле (14)). Аппроксимируйте прямой линейный участок графика, и по её наклону определите коэффициент проводимости  $\sigma$  (формула (10)).

*Замечание:*  $\operatorname{tg} \psi \rightarrow \infty$  при приближении к  $v \sim 0,5v_h$ .

9. Постройте график частотной зависимости фазового сдвига, измеренной в пп. 4 и 5,  $\psi - \pi/4 = f(\sqrt{v})$  (не забудьте учесть дополнительный сдвиг фаз  $\pi/2$  по формуле (14)). Проведите прямую, проходящую через начало координат, которая будет касаться экспериментальной кривой при больших частотах (линейный участок графика при  $v \gg v_h$ ).

По наклону этой прямой вычислите значение проводимости  $\sigma$  материала экрана (см. (12)).

10. Постройте график зависимости индуктивности катушки от частоты  $L(v)$ . Определите максимальное и минимальное значения индуктивности.

Постройте график зависимости  $(L_{\max} - L_{\min})/(L - L_{\min})$  от  $v^2$  и аппроксимируйте его прямой, проходящей через начало координат. По углу наклона прямой определите проводимость материала (см. формулу (22)).

11. Составьте таблицу, внеся в нее все полученные значения проводимости материала экрана (4-мя способами) и сравните с табличным значением.

12. Используя полученное в п. 3 значение коэффициента  $\xi_0$ , рассчитайте экспериментальные значения коэффициентов ослабления поля  $|H_1|/|H_0|$  для всех измерений п. 3, 4 и 5.

Используя максимальный и минимальный коэффициенты проводимости  $\sigma$ , полученные ранее, рассчитайте теоретическую зависимость по общей формуле (7).

*Замечание:* соотношения для гиперболических функций комплексного аргумента

$$\operatorname{ch}(x + iy) = \operatorname{ch} x \cos y + i \operatorname{sh} x \sin y,$$

$$\operatorname{sh}(x + iy) = \operatorname{sh} x \cos y + i \operatorname{ch} x \sin y.$$

Изобразите на графике теоретические и экспериментальные результаты для зависимости  $\frac{|H_1|}{|H_0|}$  от  $v$  в логарифмическом масштабе по оси

абсцисс. Проанализируйте совпадение результатов эксперимента и теории.

#### Контрольные вопросы

1. Воспользовавшись экспериментальным (или табличным) значением проводимости меди, вычислите глубину проникновения поля  $\delta$  при 50 Гц и 50 кГц. Как изменится ответ для материалов с меньшей проводимостью?
2. Получите уравнение, описывающее динамику низкочастотного электромагнитного поля в проводящей среде.
3. Какого рода уравнениями описывается скин-эффект? Какие ещё физические процессы подчиняются аналогичному уравнению?
4. Используя параметры установки, оцените диапазон частот, при которых использовавшаяся теория скин-эффекта применима.
5. Хорошо проводящий медный цилиндр радиусом  $r = 10$  см помещают в постоянное внешнее магнитное поле (параллельно силовым линиям). Оцените время, за которое магнитное поле полностью проникнет в образец.
6. Как наличие медной тонкостенной трубки внутри соленоида влияет на его коэффициент самоиндукции? Проанализируйте случаи малых и больших частот.
7. Рассчитайте мощность джоулевых потерь в медной трубке из-за токов Фуко. Рассмотрите случаи малых и больших частот.

#### Литература

1. Кириченко Н.А. Электричество и магнетизм. — Москва: МФТИ, 2011. — Гл. 15.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. — Москва: Физматлит, 2015. — § 144.
3. Кингисеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Т. 1. — Москва: Физматлит, 2007. — Ч. II. § 8.4.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### A. Настройка генератора

Внешний вид генератора сигналов АКИП-3420 изображен на рис. 1.

1. Включите генератор в сеть кнопкой питания. Включите генерацию немодулированного сигнала кнопкой 1 «Немодул. сигнал». Кнопкой 2 «Кан. А/Кан. В» подайте сигнал на канал А.

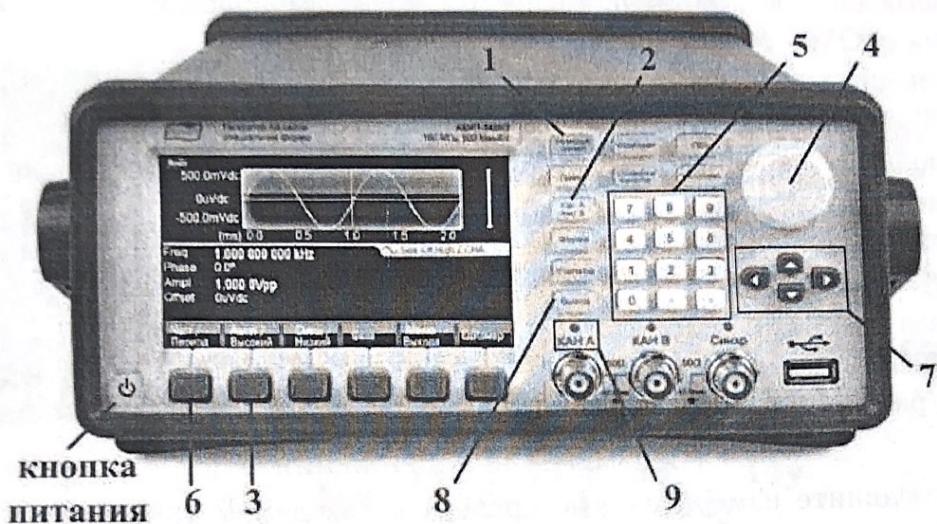


Рис. 1. Генератор АКИП-3420.

2. Установите амплитуду выходного сигнала  $A \sim 7 - 8V$  (или уровень  $2A \sim 14 - 16V$ ). Для этого нажмите кнопку 3 «Ампл/Высокий» и используя ручку регулятора 4 или цифровую клавиатуру 5 установите нужную амплитуду (см. на ЖК-дисплей генератора).
3. Установите частоту сигнала: нажмите кнопку 6 «Част/Период» и при помощи цифровой клавиатуры 5 или ручки регулятора 4 установите нужную частоту (используйте курсорные кнопки 7 для выбора разряда, который хотите изменить).
4. Включите выход канала А кнопкой 8 «Выход». Убедитесь, что индикатор 9 над каналом А загорелся жёлтым.

#### Б. Настройка амперметра и вольтметра

1. Включите оба мультиметра GDM-8245 в сеть.
2. На мультиметре, подключённом в цепь соленоида (разъёмы «Амперметр» на установке) установите режим измерения переменного тока (кнопка «ACA») и автоматическое определение предела измерения (кнопка «AUTO/MAN»).
3. На мультиметре, подключённом к измерительной катушке (разъёмы «Вольтметр» на установке), установите режим измерения переменного напряжения (кнопка «ACV») и автоматическое определение предела измерения (кнопка «AUTO/MAN»).

#### В. Настройка осциллографа

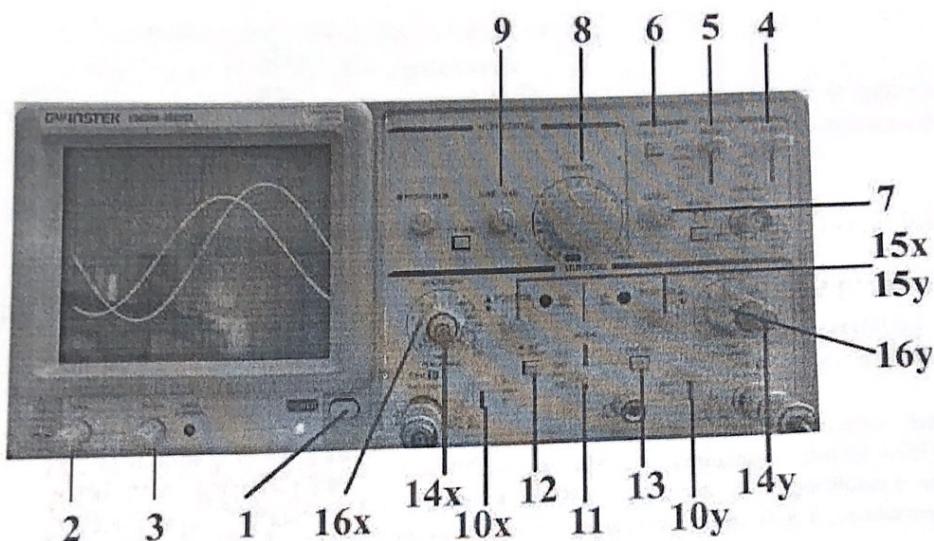


Рис. 2. Осциллограф GOS-620.

Внешний вид двухканального осциллографа GOS-620 изображен на рис. 2. Внешний вид двухканального осциллографа GOS-620 изображен на рис. 2.

1. Включите осциллограф (кнопка 1 «POWER»). При необходимости настройте яркость и фокусировку луча ручками 2 и 3 («INTEN» и «FOCUS») **Внимание!** Во избежание повреждения люминофора экрана не оставляйте неподвижной яркую точку на экране дольше нескольких секунд!

### 2. НАСТРОЙКА СИНХРОНИЗАЦИИ:

На панели «TRIGGER» установите:

- источник синхронизации – канал X (кнопка 4 «SOURCE» в положение «CH1»),
- режим (кнопка 5 «MODE») «AUTO» (автоматический запуск развёртки),
- кнопка 6 «TRIG ALT» отжата,
- ручка 7 «LEVEL» в нулевом положении (в ходе эксперимента для получения статичной картинки на экране осциллографа можно использовать данную ручку, а также ручку 8 «TIME/DIV», меняющую время развёртки)

### 3. НАСТРОЙКА РАЗВЁРТКИ:

На панели «HORIZONTAL» установите:

- ручку плавной развёртки 9 «SWP.VAR.» в крайнее правое положение,
- время развёртки (ручка 8 «TIME/DIV») в положение «5 mS» (для получения статичной картинки).

**4. НАСТРОЙКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ:**

На панели «VERTICAL» установите:

- вид входов каналов – закрытый (кнопки 10x и 10y в положение «AC»),
- режим работы – двухканальный (кнопка 11 «MODE» в положение «DUAL»),
- кнопка 12 «ALT/CHOP» отжата,
- кнопки плавной регулировки чувствительности каналов (14x и 14y) утоплены и повернуты вправо до щелчка.

**5. ЦЕНТРИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕЙ X КАНАЛОВ:**

— Заземлите канал «CH2» (переключатель 10y в положение «GND») и ручкой 15y приведите луч сигнала канала «CH2» в центр экрана. Верните переключатель 10y в положение «AC».

— Для центрирования оси X канала «CH1» измените источник синхронизации (переключатель 4 «SOURCE») на «CH2», заземлите канал «CH1» (переключатель 10x в положение «GND») и ручкой 15x приведите луч канала «CH1» в центр экрана. Верните переключатель 10x в положение «AC», а переключатель 4 «SOURCE» в положение «CH1».

В процессе измерений полезно периодически проверять положение осей X обоих каналов.

Для изменения чувствительности каналов (масштаб по вертикальной оси) используйте ручки 16x и 16y.

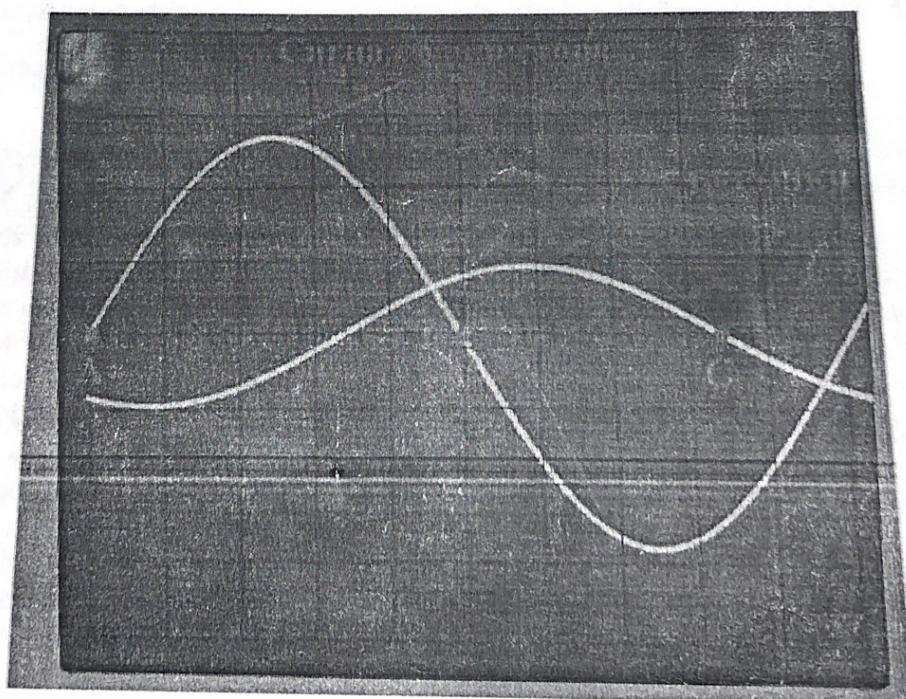


Рис. 3. Пример осциллографмы при  $f = 100$  Гц

### Г. Определение разности фаз по осциллографу

На рис. 3 приведен пример осциллографа, полученной при частоте генератора  $f = 100$  Гц. Синусоида, соответствующая сигналу с катушки сдвинута вправо относительно синусоиды, соответствующей сигналу с резистора. Если это не так, проверьте правильность подключения "земельных" концов кабелей (черный штеккер) и нажмите кнопку 13 «CH2 INV» на осциллографе.

Для определения разности фаз между напряжениями на резисторе и на катушке необходимо:

1. Определить "фазовый масштаб", измерив расстояние  $x_0$  между двумя последовательными точками обращения в нуль напряжения на резисторе А и В (которые соответствуют изменению фазы на  $\pi$ ). На рис. 3  $x_0 = 5$  делений шкалы осциллографа.
2. Найти расстояние  $x$  между ближайшими точками обращения в нуль напряжения на резисторе и на катушке (либо на участках подъема, либо на участках спада функции напряжения). На рис. 3 – это точки В и С (на участках спада функции):  $x = 3,4$  делений шкалы.
3. Разность фаз  $\Delta\varphi$  определяется по очевидной формуле  $\Delta\varphi = (x/x_0) \cdot \pi$ . По данной осциллографии получаем  $\Delta\varphi = (3,4/5) \cdot \pi = 0,68\pi$ . Напряжение на катушке отстает от напряжения на резисторе на  $\Delta\varphi = 0,68\pi$ .

## Работа 3.7.2

### Электромагнитные волны в волноводе

**Цель работы:** ознакомление с особенностями распространения электромагнитных волн в волноводе, аппаратурой и методами измерения основных характеристик протекающих при этом процессов.

**В работе используются:** генератор сигналов сверхвысокой частоты, измерительная линия, усилитель, заглушка, отрезок волновода с поглощающей нагрузкой, отрезки волноводов различных сечений, детекторная головка.

Передача энергии электромагнитных колебаний низкой частоты, например, 50 Гц, не представляет проблем и делается широко известным способом: по проводам. На более высоких частотах (до 300 МГц) эта задача решается с помощью двухпроводных линий и коаксиальных кабелей. На ещё более высоких частотах (до 300 ГГц) при колебаниях с длинами волн (в вакууме) от 1 м до 1 мм (этот диапазон называется *диапазоном сверхвысоких частот* или, сокращенно, СВЧ) передача энергии с помощью двухпроводной линии или коаксиальных кабелей становится малоэффективной из-за больших потерь: резко возрастает сопротивление проводов из-за *скин-эффекта* — вытеснения тока на поверхность, а в