



Лабораторная работа № 3.7.1

Скин-эффект

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 3.7.1

Скин-эффект

Составители:

П.В. Попов, А.В. Зелёная, М.Е. Зелёный

Долгопрудный 2022

Работа 3.7.1

Скин-эффект

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

В работе используются: генератор сигналов АКИП-3420, соленоид, намотанный на полый цилиндрический каркас, медный экран в виде полого цилиндра, измерительная катушка, амперметр, вольтметр, двухканальный осциллограф GOS-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 (см. Лабораторный практикум по общей физике: электричество и магнетизм, раздел 7) скин-эффект в полубесконечном пространстве: здесь требуется совместное решение уравнений скин-эффекта (уравнения диффузии поля) (л7.22), (л7.23)* 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 ω , задаваемой частотой колебания тока в соленоиде. Тогда для ненулевых компонент поля можно записать

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

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 \mathbf{E} , так и \mathbf{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 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 (л7.3) в интегральной форме:

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

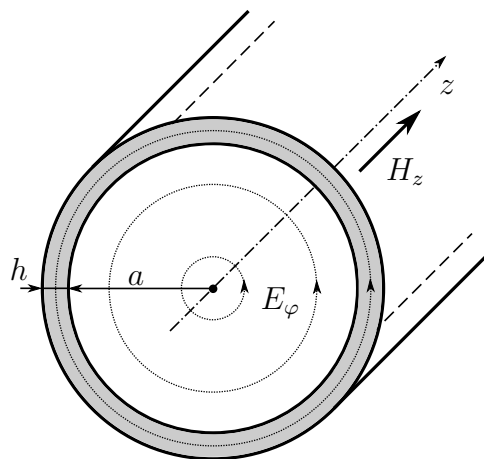


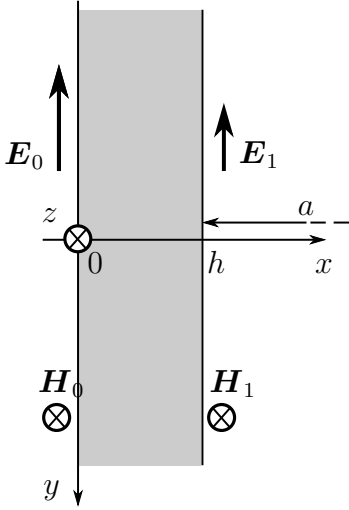
Рис. 1. Электрическое и магнитное в тонкостенном цилиндре

*Здесь и далее данные ссылки даны на уравнения раздела 7 Лабораторного практикума по общей физике: электричество и магнетизм, 2019

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 (л7.25) (уравнением диффузии поля) в плоской геометрии (рис. 2). Поместим начало отсчёта на внешнюю поверхность цилиндра и направим ось x к оси системы, и аналогично (л7.26) 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 $\mu \approx 1$).

Граничные условия для (2) зададим в виде

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

Рис. 2. Поле в стенке цилиндра

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 поддаётся 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 (л7.28), δ — глубина скин-слоя

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

Заметим, что это решение немного отличается от (л7.29): ранее мы использовали только один корень уравнения (л7.28), 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 (л7.21). 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/δ^2 в общем случае не мала, поскольку при $h \ll a$ возможна ситуация $h \ll \delta \ll a$. Отношение модулей амплитуд здесь будет равно

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

При этом колебания H_1 отстают по фазе от H_0 на угол ψ , 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 $|\alpha h| \gg 1$ и $|\alpha a| \gg 1$, а также $\operatorname{sh}(\alpha h) \approx \operatorname{ch}(\alpha h) \approx \frac{1}{2}e^{\alpha h}$. Выражение (7) с учётом (5) переходит в

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

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

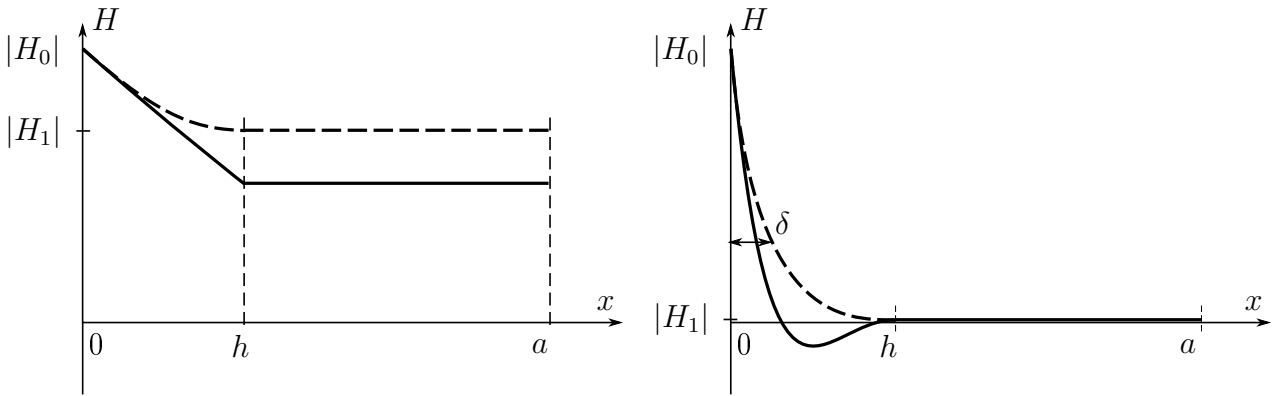


Рис. 3. Распределение амплитуды колебаний магнитного поля (пунктир) и его мгновенного значения при некотором t (сплошная) в зависимости от расстояния до внешней стенки цилиндра. Слева случай низких частот ($\delta \gg h$), справа — скин-эффект при высоких частотах ($\delta \ll h$)

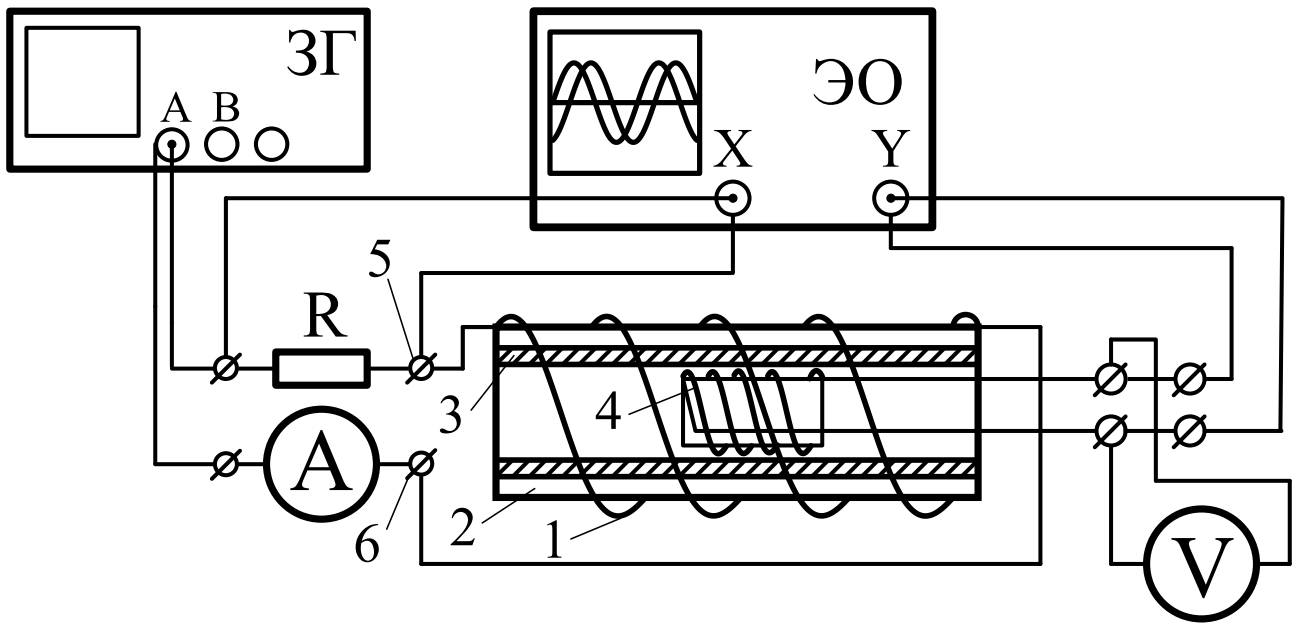


Рис. 4. Экспериментальная установка для изучения скин-эффекта

«Y» осциллографа подается напряжение с измерительной катушки, а на канал «X» — напряжение с резистора R , которое пропорционально току в цепи соленоида.

Схема экспериментальной установки для нахождения проводимости σ 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

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

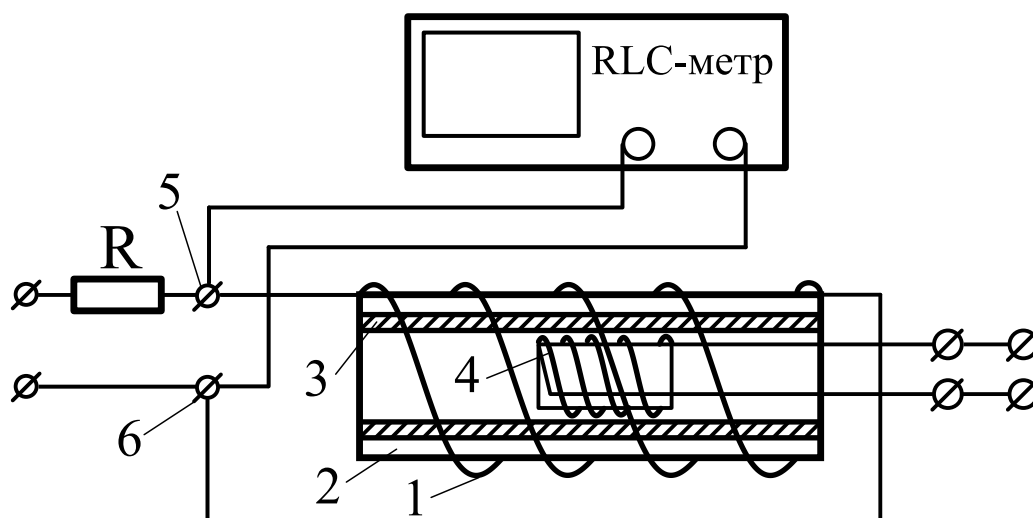


Рис. 5. Схема подключения RLC-метра

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 электропроводимость. Из-за наличия примесей проводимость меди нашей трубы отличается от табличного значения (в меньшую сторону). Для определения σ 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 $tg(\psi)$ от ν , причем аппроксимирующая прямая должна проходить через начало координат.

Как видно из выражения (12), в области больших частот $\nu \gg 1/(\pi h^2 \sigma \mu_0)$ зависимость $(\psi(\sqrt{\nu}) - \pi/4)$ 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 катушки, который пропорционален не полю 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 δ 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 Φ_{out} ; 2) пронизывающий область за экраном Φ_{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 Φ_{in} через поток сквозь внешнюю Φ_{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 $H_0 = H_1$):

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

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 вышенаписанное, 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:

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

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

ЗАДАНИЕ

1. По известным параметрам установки, приняв проводимость меди для оценки равной $\sigma \sim 5 \cdot 10^7$ Сименс/м (СИ), а $\mu \approx 1$, рассчитайте частоту ν_h [Гц], при которой толщина стенок экрана равна скин-длине $h = \delta$ (толщина экрана указана на установке).
2. Соберите установку согласно схеме на рис. 4 и **настройте приборы, следуя указаниям Приложения (А, Б, В) на стр.12-15 данного пособия.**

Установите начальную частоту сигнала генератора $\sim 0,01\nu_h$, а амплитуду выходного сигнала на генераторе — согласно Приложению А.

3. В области низких частот (от $\sim 0,01\nu_h$ до $0,05\nu_h$) получите зависимость отношения $\xi = U/\nu I$ от частоты ν .

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

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

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

4. Исследуйте зависимость величины ξ и фазового сдвига ψ от частоты ν 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 ν 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 ν . 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 ν_{min} до $\sim 1,5\nu_h$). Рекомендуется получить не менее 10 точек в диапазоне $\nu_{min} \div 0,5\nu_h$ 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 $\nu \sim 0,2\nu_h$) постройте график в координатах $1/\xi^2 = f(\nu^2)$. Убедитесь в том, что зависимость линейная.

Экстраполируя зависимость к точке $\nu = 0$, соответствующей $|H_1|/|H_0| = 1$, определите величину ξ_0 — коэффициент пропорциональности между $\xi = U/\nu I$ и коэффициентом ослабления магнитного поля $|H_1|/|H_0|$.

По угловому коэффициенту зависимости рассчитайте проводимость меди σ , используя (9).

8. Постройте график зависимости фазового сдвига, измеренного в пункте 4, $\operatorname{tg} \psi = f(\nu)$ 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 σ (формула (10)).

Замечание: $\operatorname{tg} \psi \rightarrow \infty$ при приближении к $\nu \sim 0,5\nu_h$.

9. Постройте график частотной зависимости фазового сдвига, измеренной в пп. 4 и 5, $\psi - \pi/4 = f(\sqrt{\nu})$ (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 $\nu \gg \nu_h$).

По наклону этой прямой вычислите значение проводимости σ материала экрана (см. (12)).

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

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

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

12. Используя полученное в п. 3 значение коэффициента ξ_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 σ , 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 ν 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 δ 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 использованная 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. *Кингсеп А.С., Локишин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы физики. Т. 1. — Москва : Физматлит, 2007. — Ч. II. § 8.4.

ПРИЛОЖЕНИЕ

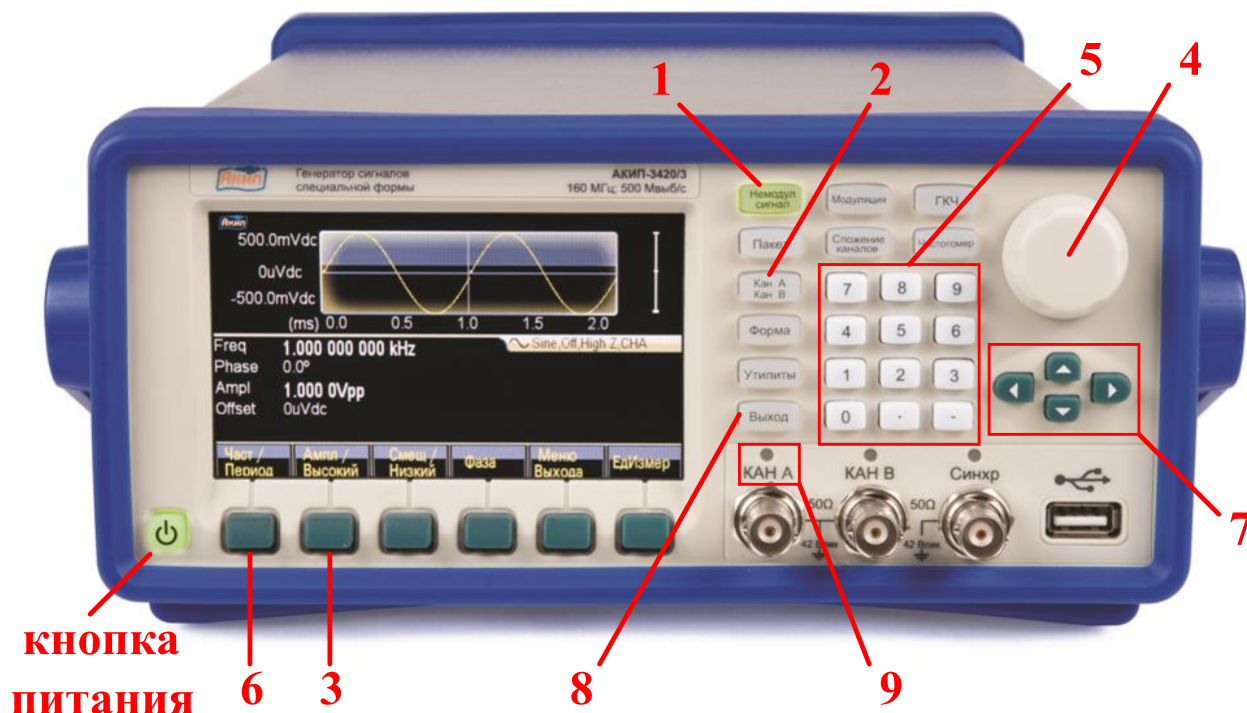


Рис. 1. Генератор АКИП-3420.

А. 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 «Немодуль сигнал». Кнопкой 2 «Кан. А/ Кан. В» подайте сигнал на канал А.
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»).

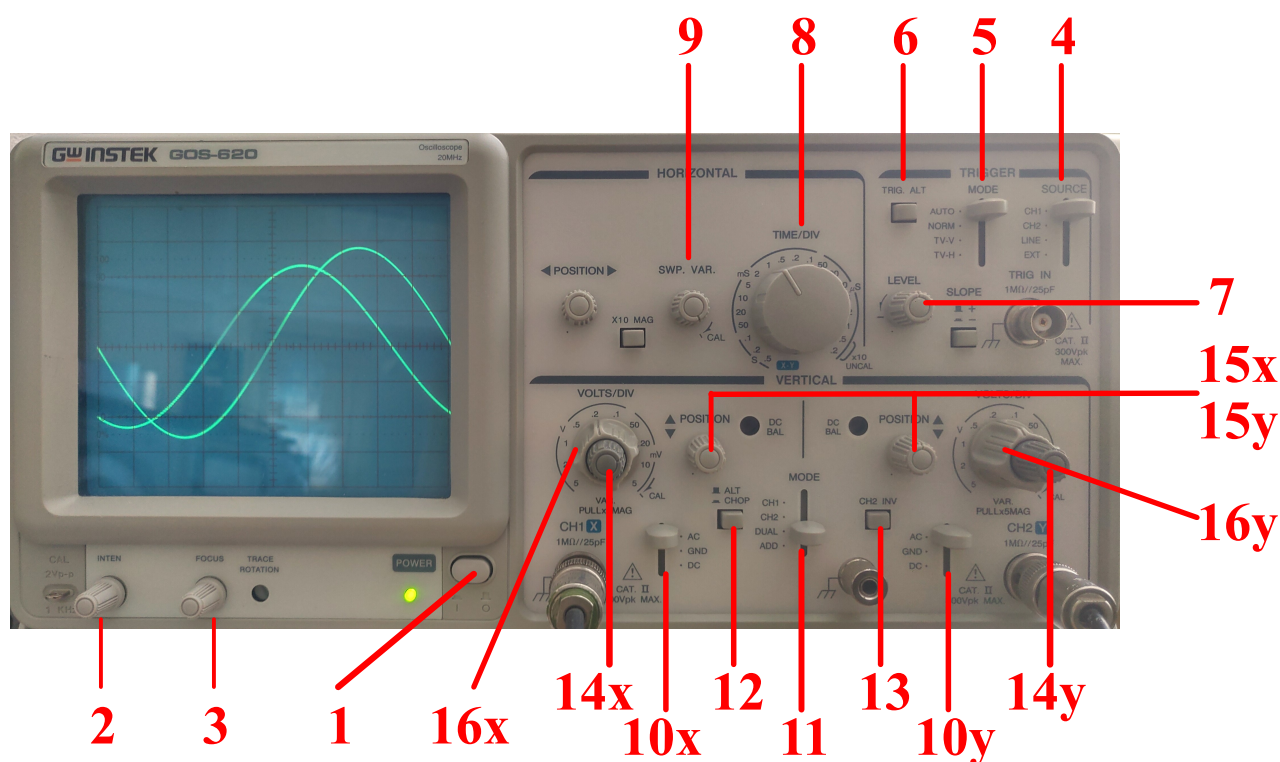


Рис. 2. Осциллограф GOS-620.

В. Настройка осциллографа

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 развертки),
- кнопка 6 «TRIG ALT» отжата,
- ручка 7 «LEVEL» в нулевом положении (в ходе эксперимента для получения статичной картинке на экране осциллографа можно использовать данную ручку, а также ручку 8 «TIME/DIV», меняющую время развертки)

3. НАСТРОЙКА РАЗВЕРТКИ:

На панели «HORIZONTAL» установите:

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

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.

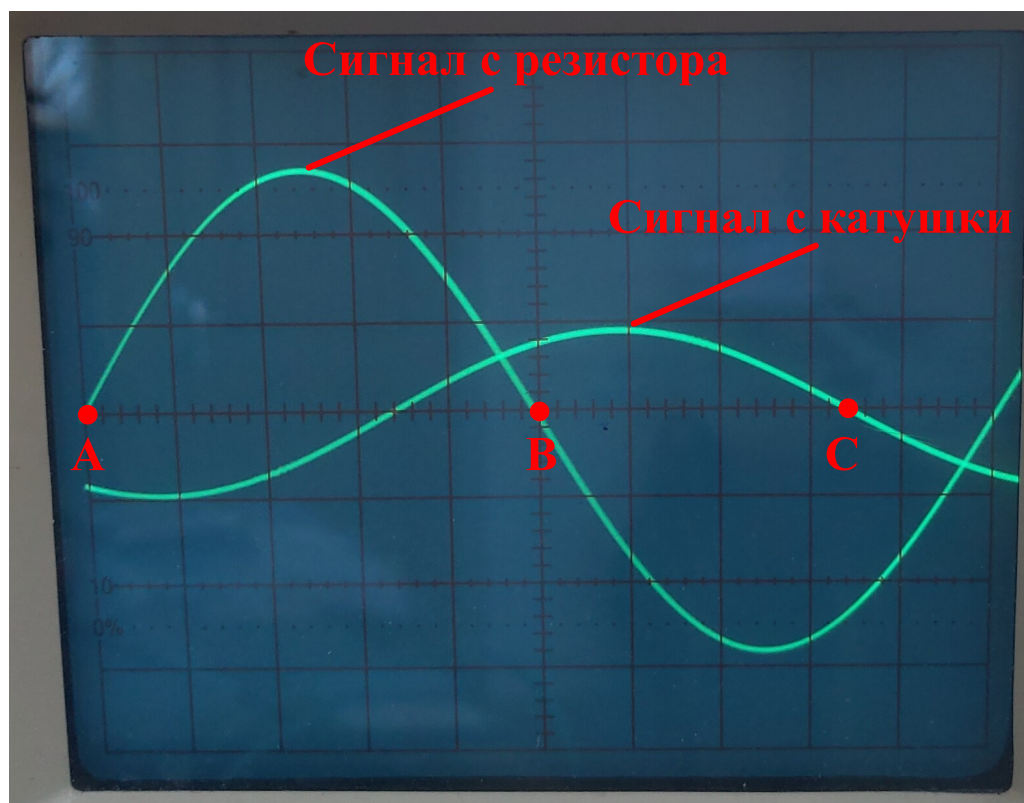


Рис. 3. Пример осциллограммы при $f = 100$ Гц

Г. Определение разности фаз по осциллограмме

На рис. 3 приведен пример осциллограммы, 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 "земляных" 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 π). 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 подъёма, 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 осциллограмме получаем $\Delta\varphi = (3,4/5) \cdot \pi = 0,68\pi$. Напряжение на катушке отстаёт от напряжения на резисторе на $\Delta\varphi = 0,68\pi$.