

Работа 3.7.1

Скин-эффект

Киркича Андрей, Б01-202, МФТИ

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

Толщина скин-слоя проводника:

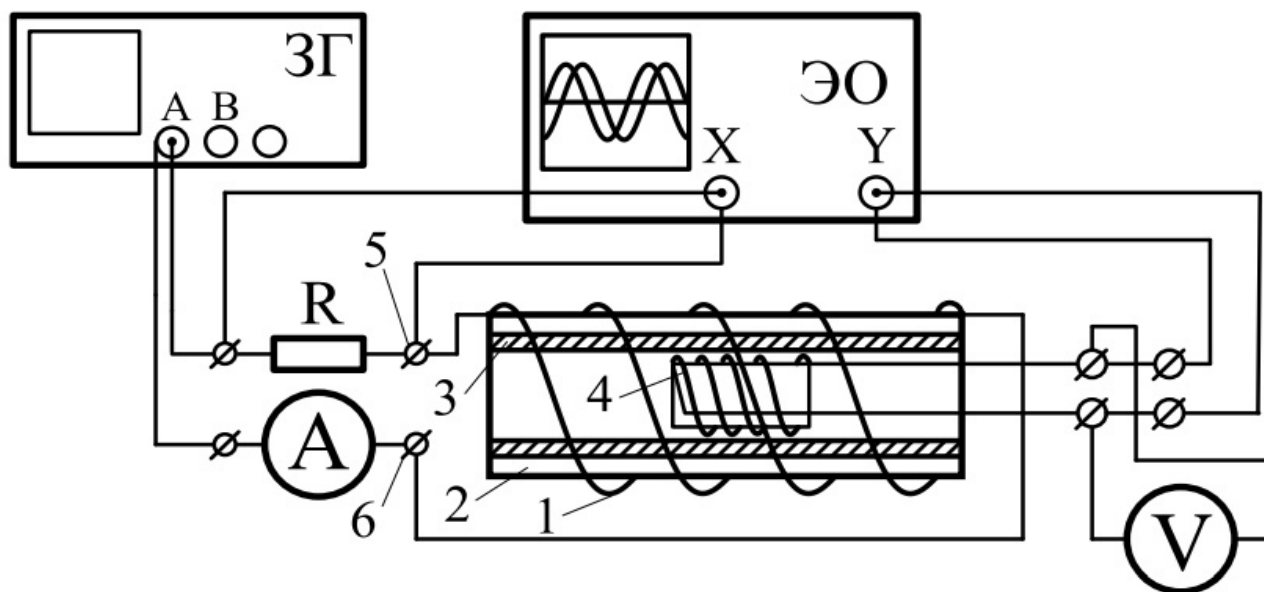
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0}}. \quad (1)$$

Связь полей внутри и снаружи цилиндра:

$$H_1 = \frac{H_0}{\operatorname{ch}(\alpha h) + \frac{1}{2}\alpha a \operatorname{sh}(\alpha h)}; \quad \alpha = \sqrt{i\omega \sigma \mu_0} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} e^{i\pi/4}. \quad (2)$$

Отношение амплитуд полей:

$$\frac{|H_1|}{|H_0|} = c \cdot \frac{U}{\nu I} = c\xi. \quad (3)$$



Результаты измерений

Перед началом работы запишем данные установки и вычислим необходимую нам для измерений частоту ν_h по формуле (1), приняв $\delta = h$.

$d_{\text{нар}}, \text{ мм}$	$d_{\text{стен}}, \text{ мм}$	$\sigma, \frac{\text{См}}{\text{м}}$	$\nu_h, \text{ кГц}$	$\nu_0, \text{ Гц}$	A, В
45	1,5	0,08	2,2	22	8

Далее приступим к измерению проводимости разными методами.

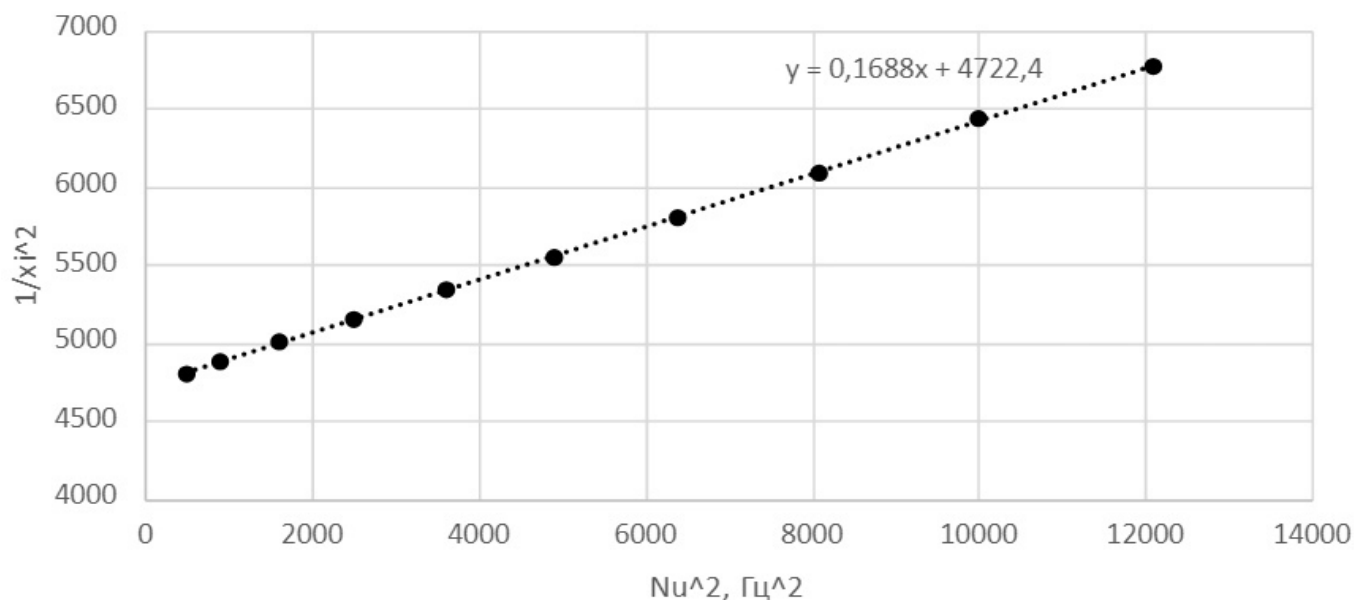
Измерение проводимости через отношение амплитуд

Снимем зависимость тока через амперметр и напряжения на вольтметре от частоты, выставяемой на генераторе. Подсчитаем ξ , руководствуясь формулой (3).

$\nu, \text{ Гц}$	22	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$I, \text{ А}$	0,53	0,53	0,52	0,51	0,51	0,40	0,49	0,48	0,47	0,46
$U, \text{ В}$	0,16	0,22	0,29	0,36	0,42	0,47	0,51	0,55	0,59	0,62
$\xi \cdot 10^{-2}$	1,44	1,43	1,41	1,39	1,37	1,34	1,31	1,28	1,25	1,22

В области частот $\nu \ll \nu_h$ $\alpha h \ll 1$. Из формулы (2) получаем:

$$(c\xi)^2 \approx \frac{1}{1 + A\nu^2} \Leftrightarrow \frac{1}{\xi^2} = B\nu^2 + c^2, \text{ где } B = \pi a h \sigma \mu_0 c.$$



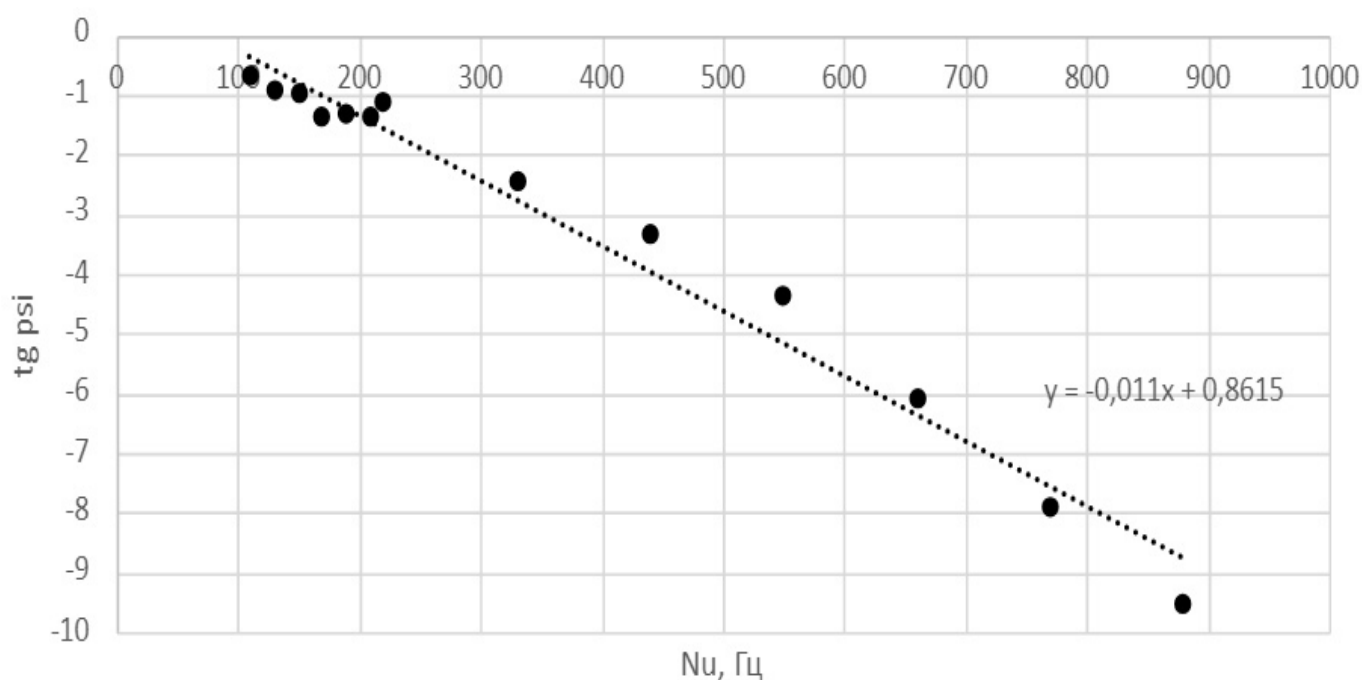
Рассчитанное значение индуктивности: $B = (1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-1} \text{ 1/Гц}^2$. Значит, $\sigma = (4,2 \pm 0,7) \cdot 10^7 \text{ См/м}$ и $c = 69 \pm 10$.

Измерение проводимости через разность фаз на низких частотах

Измерим ток и напряжение в зависимости от частоты, параллельно считывая с осциллографа величину фазового сдвига ψ .

ν , Гц	110	130	150	170	190	210	220	330	440	550	660	770	880	990	1100
I , мА	462	432	421	411	403	395	392	369	355	344	335	326	317	308	299
U , В	620	650	689	720	743	761	768	811	819	814	802	787	768	749	730
$\xi \cdot 10^{-2}$	1,22	1,16	1,09	1,03	0,97	0,92	0,89	0,67	0,52	0,43	0,36	0,31	0,28	0,25	0,22
ϕ , рад	0,98	0,81	0,79	0,63	0,64	0,63	0,72	0,39	0,29	0,22	0,16	0,13	0,11	0,04	0,00
ψ , рад	-0,59	-0,76	-0,79	-0,94	-0,93	-0,94	-0,85	-1,19	-1,28	-1,35	-1,41	-1,45	-1,47	-1,53	-1,57

На основе данных из таблицы строим график на низких частотах.

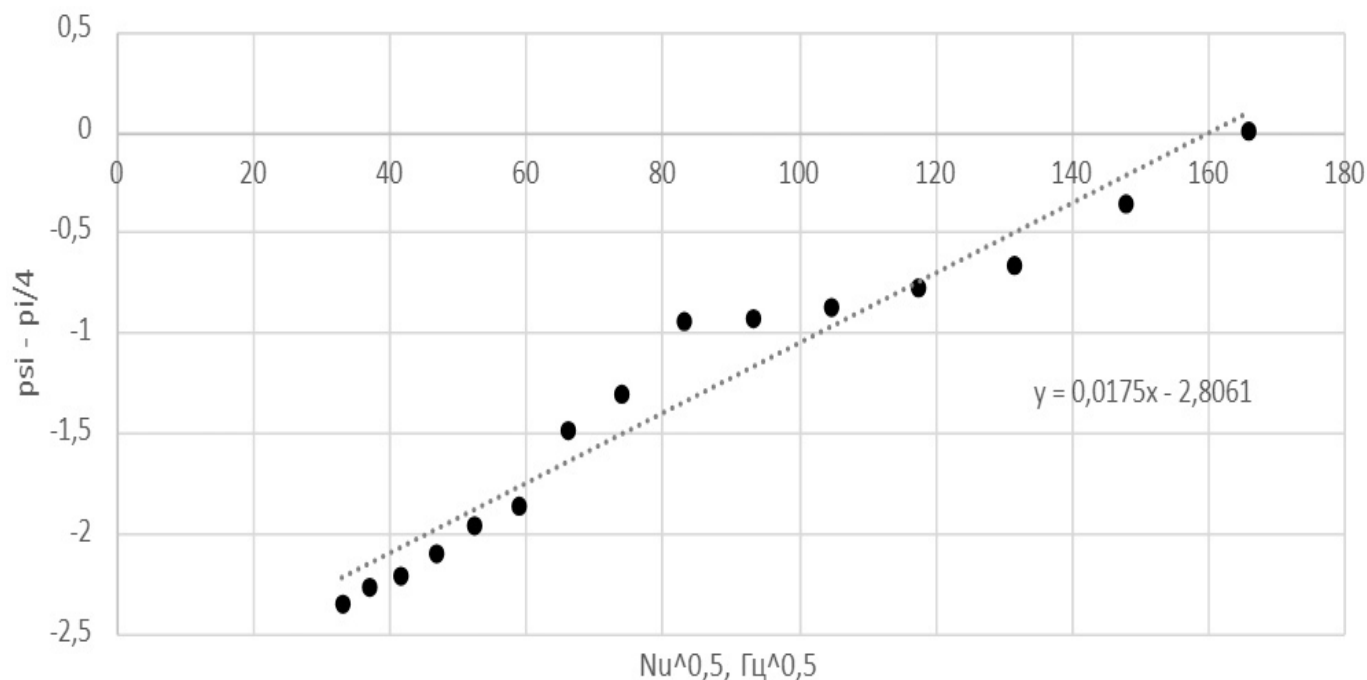


Согласно формуле $\text{tg } \psi = \pi a h \sigma \mu_0 \nu$ получаем, что $\sigma = (8,3 \pm 1,3) \cdot 10^7$ См/м.

Измерение проводимости через разность фаз на высоких частотах

Повторим измерения для более высоких частот.

ν , Гц	1100	1300	1700	2200	2800	3500	4400	5500	7000	8700	11000	14000	17000	22000	28000
I , мА	299	277	249	219	187	157	129	105	84	67	52	39	28	18	9
U , В	730	676	609	532	452	374	303	239	184	140	104	76	57	48	46
$\xi \cdot 10^{-3}$	2,22	1,76	1,40	1,11	0,88	0,69	0,54	0,41	0,32	0,24	0,18	0,14	0,12	0,12	0,19
ϕ , рад	0,00	0,09	0,14	0,26	0,39	0,50	0,86	1,05	1,41	1,42	1,48	1,57	1,69	1,99	2,35
ψ , рад	-1,57	-1,48	-1,43	-1,32	-1,18	-1,07	-0,71	-0,52	-0,16	-0,15	-0,09	0,00	0,12	0,42	0,79



При $\delta \ll h$ выполняется:

$$\psi - \pi/4 = k \cdot \sqrt{\nu}; \quad k = h\sqrt{\pi\mu_0\sigma}.$$

Таким образом, $k = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$ рад/Гц, тогда $\sigma = (3,45 \pm 0,15) \cdot 10^7$ См/м.

Заключение

В ходе выполнения работы мы проверили формулы для вычисления параметров скин-эффекта в соленоидальной катушке, вычислив отношения магнитных полей как на малых частотах токов, проходящих через катушку, так и на больших.

Литература

1. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. Т. III. Электричество. - 6-е издание. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019
2. *Никулин М.Г., Попов П.В., Нозик А.А., и др.* Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т. II. Электричество и магнетизм. - 2-е издание. М.: МФТИ, 2019