

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3
по дисциплине «Теоретические основы электротехники»
Тема: «ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ
ЦЕПЕЙ»**

Студенты гр. 3114

Преподаватель

Злобин М. А.

Федулова Л. В.

Раузер А. А.

Лановенко Е. В.

Санкт-Петербург
2025

Цель работы: экспериментальное определение параметров двух индуктивно связанных катушек и проверка основных соотношений индуктивно связанных цепей при различных соединениях катушек.

Определение индуктивностей катушек, взаимной индуктивности и коэффициента связи

Расчет параметров катушек осуществляется по формулам

$$\begin{cases} x_1 = \omega L_1 = U_1/I_1; |x_M| = |\omega M| = U_2/I_1; \\ x_2 = \omega L_2 = U_2/I_2; |x_M| = U_1/I_2. \end{cases} \quad (1)$$

Первая катушка:

$$x_1 = 2/13.3 = 0.151 \text{ кОм}; L_1 = x_1/\omega = 0.151/2\pi = 24 \text{ мГн}; x_M = 1.45/13.3 = 0.11 \text{ кОм};$$

$$M = 0.11/2\pi = 18 \text{ мГн};$$

Вторая катушка:

$$x_2 = 2/6.8 = 0.294 \text{ кОм}; L_2 = x_2/\omega = 0.294/2\pi = 47 \text{ мГн}$$

$$x_M = 0.72/6.8 = 0.11 \text{ кОм};$$

$$M = 0.11/2\pi = 18 \text{ мГн};$$

Коэффициент связи:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 0.11/\sqrt{0.151 \cdot 0.294} = 0.52;$$

Исследование последовательного соединения индуктивно связанных катушек

При последовательном соединении $I_1 = I_2$.

Согласное включение: $L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + 2M = 24 + 47 + 36 = 107 \text{ мГн}$.

$$\begin{aligned} \dot{I} = U/Z = U/(j\omega(L_1 + L_2 + 2M)) = \\ = -j \frac{2}{2\pi 1000 \cdot (L_{\Sigma})} = -j3 \text{ мА} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}(j\omega L_1 + jM\omega) = 3(0.151 + 0.11) = 0.783 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}(j\omega L_2 + jM\omega) = 3(0.294 + 0.11) = 1.212 \text{ В.}$$

Встречное включение: $L_{\text{э}} = L_1 + L_2 - 2M = 24 + 47 - 36 = 37 \text{ мГн.}$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= U/Z = U/(j\omega(L_1 + L_2 - 2M)) = \\ &= -j \frac{2}{2\pi 1000 \cdot (L_{\text{э}})} = -j8.89 \text{ мА} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}(j\omega L_1 + jM\omega) = 8.89(0.151 - 0.11) = 0.365 \text{ В.}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}(j\omega L_2 + jM\omega) = 8.89(0.294 - 0.11) = 1.636 \text{ В.}$$

Исследование параллельного соединения индуктивно связанных катушек

Согласное включение:

$$L_{\text{э}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} = \frac{0.151 \cdot 0.294 - 0.11^2}{0.151 + 0.294 - 0.22} / 2\pi = 0.1435 / 2\pi = 23 \text{ мГн};$$

$$\dot{I}_{\text{вх}} = U / j\omega L_{\text{э}} = 1 / 0.1435 = -j6.97 \text{ мА};$$

Встречное включение:

$$L_{\text{э}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} = \frac{0.151 \cdot 0.294 - 0.11^2}{0.151 + 0.294 + 0.22} / 2\pi = 0.0485 / 2\pi = 7.7 \text{ мГн};$$

$$\dot{I}_{\text{вх}} = U / j\omega L_{\text{э}} = 1 / 0.0485 = -j20.61 \text{ мА};$$

Исследование АЧХ функции передачи трансформатора по напряжению

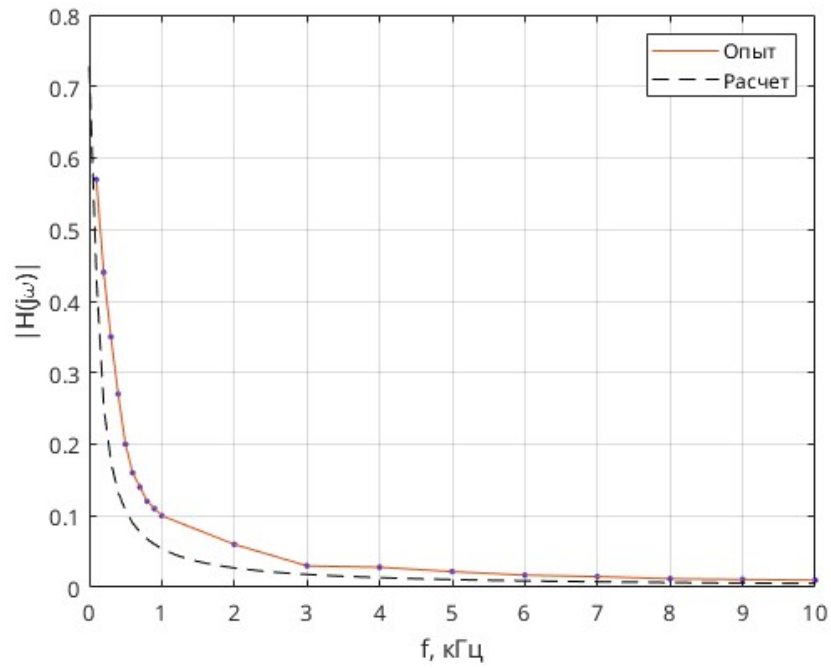


Рис. 1: АЧХ трансформатора при $R_n = 100 \text{ Ом}$

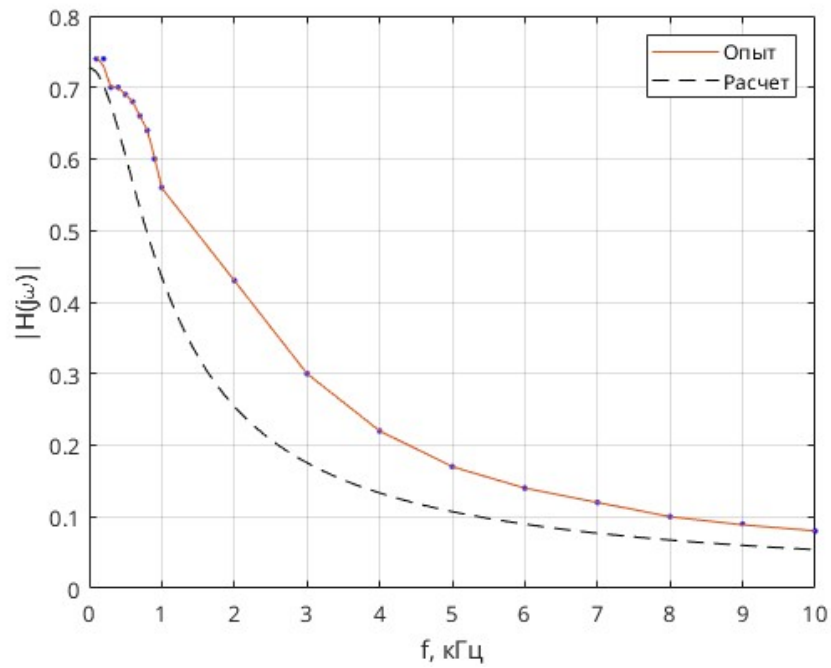


Рис. 2: АЧХ трансформатора при $R_n = 1000 \text{ Ом}$

Теоретический расчет АЧХ осуществлялся по формуле

$$|H(j\omega)| = \frac{|M|R_n}{\omega \sqrt{L_1 L_2 - M^2 + (L_1 R_n / \omega)^2}} \quad (4)$$

Вопросы

1. Правильность проведенных экспериментов устанавливается путем сравнения расчетных (теоретических значений) токов и напряжений в катушках, со значениями, полученными в ходе эксперимента. Таким образом устанавливается правильность расчета L_1, L_2, M .
2. Чтобы разметить однополярные выводы двух индуктивно связанных катушек, необходимо добиться из согласного включения: его характеризует меньший вследствие увеличения эквивалентной индуктивности протекаемый в цепи ток, который возможно измерить амперметром. В таком случае катушки соединены разнополярными выводами. Соответственно, при встречном включении общий ток в цепи будет больше, а катушки будут соединены однополярными выводами.
3. Напряжение на одной из катушек будет отставать от тока при последовательном встречном включении, если коэффициент взаимной индукции M больше индуктивности этой катушки:
 $M > L_1$ (для U_1) или $M > L_2$ (для U_2). При этом должно выполняться условие физической реализуемости: $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$.
4. При уменьшении частоты индуктивное сопротивление падает, что приводит к увеличению тока и увеличению напряжения на активном сопротивлении обмотки. На высоких частотах растет индуктивность рассеяния L_s и сопротивление рассеяния $X_s = L_s 2\pi f$, что снижает передачу мощности во вторую обмотку. На нулевой частоте АЧХ равно нулю, потому что при постоянном токе отсутствует явление электромагнитной индукции. Трансформатор стремится к идеальному в области средних частот (1-2 кГц).
5. В теоретической формуле отсутствуют активные сопротивления обмоток, которые на низких частотах становятся сравнимы с реактивными

ми сопротивлениями. Активные потери при этом становятся велики и значения АЧХ падают. Также формула предполагает постоянство параметров катушек, но в реальности они зависят от тока.

Вывод

В ходе работы были вычислены параметры катушек $L_1 = 24$ мГн, $L_2 = 47$ мГн и $M = 18$ мГн. Были исследованы индуктивно связанные катушки с последовательным и параллельным соединениями, экспериментальные данные позволили подтвердить правильность расчета параметров катушек, измеренные и рассчитанные напряжения (При согласном включении и последовательном соединении: $U_{1\text{расч}} = 0.78$ В, $U_{1\text{опыт}} = 0.79$ В; $U_{2\text{расч}} = 1.21$ В, $U_{2\text{расч}} = 1.22$ В; при встречном включении: $U_{1\text{расч}} = 0.36$ В, $U_{1\text{опыт}} = 0.35$ В; $U_{2\text{расч}} = 1.64$ В, $U_{2\text{опыт}} = 1.62$ В; токи при параллельном соединении и встречном включении: $I_{1\text{расч}} = 6.97$ А, $U_{1\text{опыт}} = 7.5$ А; при встречном включении: $U_{1\text{опыт}} = 21.2$ мА, $I_{1\text{расч}} = 20.6$ мА.) Были измерены и построены АЧХ. Теоретическая кривая АЧХ оказалась ниже опытной из-за пренебрежения в теоретической формуле (4) активным сопротивлением обмоток и паразитными емкостями между витками обмотки.