

Оглавление

0.1	ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ТЕХНИ-	
	КЕ	2
0.2	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	3
0.3	ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	7
0.4	ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ . . .	9
0.5	ВЫВОД	11

0.1 ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ТЕХНИКЕ

Цель работы: изучение закона электромагнитной индукции и его применений для точного измерения перемещений и исследования пространственного распределения магнитного поля. .

Теоретическая часть

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции ε , возникающая в замкнутом контуре, равна взятой с обратным знаком скорости изменения потока Φ вектора магнитной индукции B через поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

При этом, в частности, изменение потока Φ может обеспечиваться внешним контуром с изменяющимся в нем током. Теория этого явления, называемого электромагнитной индукцией в связанных контурах подробно описана в [1, 2]. Рассмотрим важные для практики стороны этого явления. Если в первом контуре протекает ток $I_1(t) = I_{01}\sin(\omega t)$, то во втором контуре поток будет изменяться по закону

$$\Phi = L_{12}I_1(t) = L_{12}I_{01}\sin(\omega t) \quad (2)$$

где L_{12} - коэффициент взаимной индукции контуров 1 и 2, зависящий от формы и взаимного расположения контуров. Тогда с учетом (1) ЭДС индукции ε в контуре 2 выражается формулой

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = -\omega L_{12}I_{01}\cos(\omega t) = -\varepsilon_{02}\cos(\omega t) \quad (3)$$

Как видно из (3), величина ε_{02} зависит от величин L_{12} , I_{01} и ω , что дает возможность определить одну из них, зафиксировав остальные. Именно такая схема является основой многих современных измерительных приборов - электронных микрометров, измерителей силы или давления (при использовании дополнительной пружины или мембраны), амперметров переменного тока, частотомеров. Точность и чувствительность таких простых устройств очень высока, например смещения можно измерять с помощью описанной ниже лабораторной установки с погрешностью до долей микрометра, причем

результаты измерений получают сразу в виде электрического сигнала, что облегчает автоматизацию измерений.

Важная для практики задача измерения магнитной индукции неоднородного поля $B(r)$, создаваемого контуром (или их сложной системой), может быть решена с помощью явления взаимной индукции. Для этого необходимо второй контур сделать «пробным» - достаточно малым, чтобы вектор магнитной индукции B_1 , создаваемого первым контуром в каждой точке поверхности, ограниченной вторым, можно было считать примерно постоянным. На первый контур следует подать переменный ток $I_1(t) = I_{01}\sin(\omega t)$, с тем, чтобы $B_1(r, t)$ изменялось как $B_1(r, t) = B_{01}(r)\sin(\omega t)$. Тогда ЭДС индукции в пробном контуре площади S

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt} = -S\frac{dB}{dt} = -S\left|\frac{dB}{dt}\right|\cos\alpha = -\omega S|B_{01}(r)|\cos(\omega t)\cos(\alpha) \quad (4)$$

окажется пропорциональной $B_{01}(r)\cos(\alpha)$. Здесь α - угол между вектором $B_1(r, t)$ и нормалью n к плоскому контуру 2. Такой способ измерения позволяет очень просто получать распределение индукции магнитного поля в относительных единицах в случаях, когда известно, что $\cos\alpha = 1$. Это бывает нужно для проверки однородности магнитного поля или исследования закономерностей его изменения в пространстве. Ясно, что таким способом можно определять и относительные изменения амплитуды I_{01} в удаленном недоступном контуре 1.

Зависимость амплитуды ε_2 от α позволяет определять ориентацию вектора индукции B переменного магнитного поля с помощью пробного плоского контура. В тех случаях, когда нормаль n перпендикулярна B (B лежит в плоскости контура), ε_2 будет равна нулю, а когда вектор B параллелен n , ε_2 будет максимальна. Для более точного определения ориентации B в заданной точке следует поместить центр пробного контура в эту точку и определить два положения плоскости контура, обеспечивающие равенство нулю величины ε_2 . Вектор B будет параллелен линии пересечения двух плоскостей, обеспечивающих равенство нулю ε_2 . Можно приблизительно определять ориентацию B по ориентации n , поворачивая контур по разным направлениям и добиваясь максимума ε_2 . Примерно такими способами осуществляют пеленгацию радиопередатчиков.

0.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Используются одинаковые жестко закрепленные на станине 3 соосные контуры - катушки 1 и 1' и подвижный небольшой соосный с ними контур - катушка 2, который может перемещаться вдоль этой оси. Перемещение контура 2 осуществляется микрометрическим винтом 4 с шагом винта 1 мм, возможные зазоры и люфты уничтожаются постоянным прижимом с помощью пружины 5. Контуры 1, 1', 2 соединены с клеммами 1к - 6к, через которые их можно по разному соединять как друг с другом, так и присоединять к источнику переменного напряжения - звуковому генератору (ЗГ) 6 или измерительному прибору - цифровому вольтметру (ЦВ) 7. Цифровой вольтметр имеет входное сопротивление намного больше, чем сопротивление контуров, поэтому он позволяет измерять ЭДС индукции ε без введения поправок на их внутреннее сопротивление.

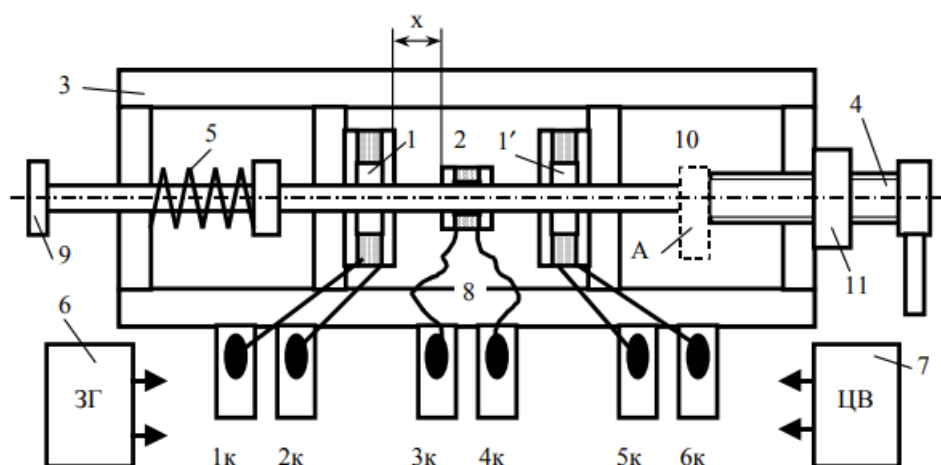


Рис. 1: ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Установка позволяет изучать взаимную индукцию в двух контурах 1 и 2, причем контур 1 может быть составлен из двух последовательно включенных контуров 1 и 1'. Использование составного контура 1+1' широко используется на практике. Дело в том, что одна катушка 1 создает очень неоднородное поле B на своей оси (см. рис. 2, а). Зависимость $L_{12}(x)$ при этом получается сильно нелинейной, что осложняет калибровку приборов. С целью получения зависимости $L_{12}(x)$, максимально приближенной к линейной, используют два одинаковых соосных контура, создающих противоположно направленные поля (у нас - катушки 1 и 1'), и одну измерительную катушку 2. Часто роль измерительной катушки играет контур 1+1', а роль катушки с током - катушка 2. Такое устройство называют дифференциальным трансформатором, поскольку его можно считать составленным из двух трансформаторов (без сердечника) - 1+2 и 1'+2, вторичные обмотки 1 и 1' которых включены на-

встречу друг другу. Разность ЭДС во вторичных обмотках будет приблизительно линейно зависеть от разности расстояний между контуром 2 и обмотками 1 и 1'. Такое устройство называют дифференциальным трансформатором. Зависимость $L_{12}(x)$ для контуров 1+1' и 2 в этом случае приведена на рис.2, а. Следует заметить, что приблизительно в средней точке $L_{12}(x)$ близко к нулю и изменяет знак, поскольку в этом месте фаза потока 2 и ЭДС ε_2 меняются на π (левее этой точки (см. рисунок) поток от катушки 1 превосходит противоположно направленный поток от катушки 1', а правее этой точки - наоборот, поэтому результирующий поток катушек от 1 и 1' меняет направление, а с ним и ЭДС ε_2). Дифференциальный трансформатор в настоящее время является измерительной головкой многих датчиков малых смещений, обеспечивающих точность измерений в доли микрометра, в том числе электронных микрометров, индикаторов и т.д. Часто необходимо получать более однородное поле В. Для этого используют два соосных, создающих сонаправленные поля контура, у нас - катушки 1 и 1', называемые катушками Гельмгольца. Создаваемое ими поле оказывается сравнительно однородным, особенно в значительной по объему области вблизи оси контуров 1, 1', 2 и на примерно одинаковом расстоянии от контуров 1 и 1' (см. рис. 2, б). Такие катушки широко используются на практике, например для компенсации внешнего магнитного поля в измерительных установках, к которым необходимо обеспечить свободный доступ со всех сторон.

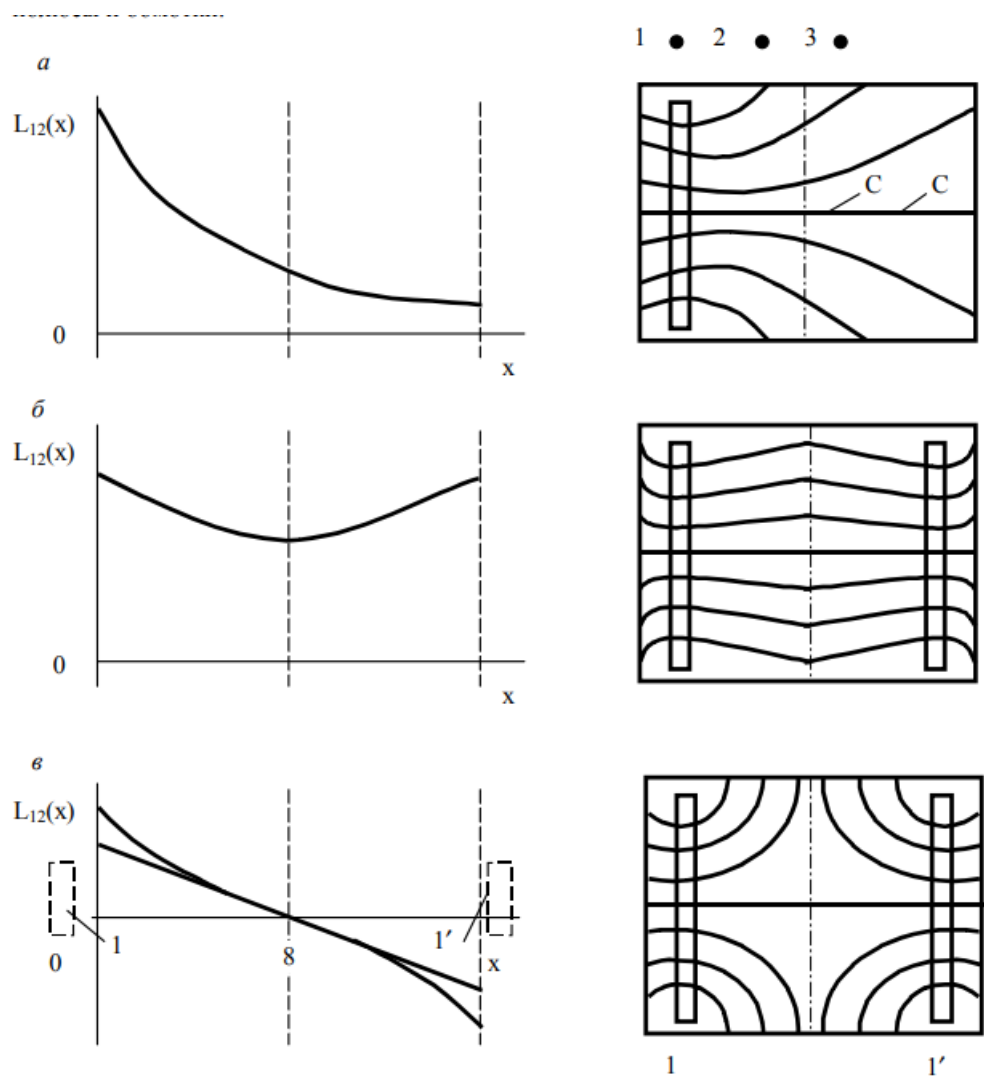


Рис. 2: Зависимость $L_{12}(x)$ (слева) и картина силовых линий вектора магнитной индукции B (справа) для случаев одиночного контура 1 (а), катушек контура 1+1', соединенных как катушки Гельмгольца (б), катушек контура 1+1' соединенных встречно (в).

0.3 ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задания (1-3)

Изучение распределения магнитного поля на оси катушки. Клеммы 1к и 2к исследуемой катушки 1 присоединить к генератору, а клеммы 3к и 4к контура 2 - к вольтметру, клеммы 5к и 6к не использовать (см. рис.1). Контур 2 установить винтом 4 на указанном на установке расстоянии от средней точки 8. Частоту генератора задать равной 800 Гц. Установить выходное напряжение генератора, указанное на установке.

Заносить показания напряжения с вольтметра $U_2(x_i)$ (приблизительно равное ε_2) в третий столбец таблицы, перемещая винтом 4 контур 2 с постоянным указанным на установке шагом Δx к центральной точке 8. Число точек i и положение точки 1 указано на установке. Величину U_2 измерять с максимально возможной точностью - наибольшим числом значащих цифр. При перемещении контура 2 винтом 4 удобно поворачивать его на целый оборот, останавливая указатель винта 4 в нижнем вертикальном положении около отметки на корпусе установки. Этим обеспечивается постоянство шага Δx .

№ точки	X_i , мм	$E_2=U_2(X_i)$, мВ Задание(1)	$E_2=U_2(X_i)$, мВ Задание(2)	$E_2=U_2(X_i)$, мВ Задание(3)
1	3	59,76	60,36	3,9
2	4	54,84	60,98	8,86
3	5	50,246	62,18	14,366
4	6	46,153	63,84	19,762
5	7	42,436	66,08	25,53
6	8	39,009	68,92	31,437
7	9	35,91	72,3	37,96
8	10	33,126	76,42	44,775
9	11	30,426	81,06	51,867
10	12	27,904	86,56	59,666
11	13	25,703	90,33	64,44
12	14	24,411	90,34	64,442

Задание (4)

Использование дифференциального трансформатора для измерения перемещений.

Использовать все соединения как в задании 3. Установить катушку 2 при-

близительно в среднюю точку, где $U_2 = 0$, после чего винт 4 повернуть приблизительно на два оборота так, чтобы указатель вита 4 был направлен вниз к отметке на корпусе установки, зафиксировать винт контрагайкой 11. Измерить и записать показание вольтметра U_2 , обозначив его как U_0 . Аккуратно оттянуть пружину за рукоятку 9 (см. рисунок) и вставить в измерительный зазор 10 измеряемую деталь А, записать показание вольтметра U_2 , обозначив его как U_a . По этим данным можно будет определить размер детали (см. ниже).

$$U_o = 3,895 \text{ мВ}$$

$$U_a = 9,05 \text{ мВ}$$

Задание 5

Изучение влияния частоты ν на работу дифференциального трансформатора.

Использовать все соединения как в задании 3. Установить катушку 2 на 4 мм от средней точки, указатель винта 4 направить вниз к отметке на корпусе установки. Измерить и записать показания вольтметра. Установить частоту генератора 900 Гц Измерить и записать показания вольтметра. Вычислить величину $dU_2/d\nu$, характеризующую влияние изменения частоты на изменение ЭДС, по формуле.

$$\frac{dU_2}{d\nu} = \frac{U_2(900) - U_2(800)}{100}$$

$$\frac{dU_2}{d\nu} = 0,02066$$

Задание 6.

Изучение влияния нестабильности напряжения генератора на работу дифференциального трансформатора.

Использовать все соединения как в задании 3. Установить катушку 2 на 4 мм от средней точки, указатель винта 4 направить вниз к отметке на корпусе установки. Установить частоту генератора 800 Гц. Измерить и записать показания вольтметра. Установить напряжение генератора на 10% выше установленного. Измерить и записать показания вольтметра.

$$U_{10} = 3,42 \text{ мВ}$$

$$U_{20} = 65,06 \text{ мВ}$$

$$U_1 = 3,767 \text{ мВ}$$

$$U_2 = 70,48 \text{ мВ}$$

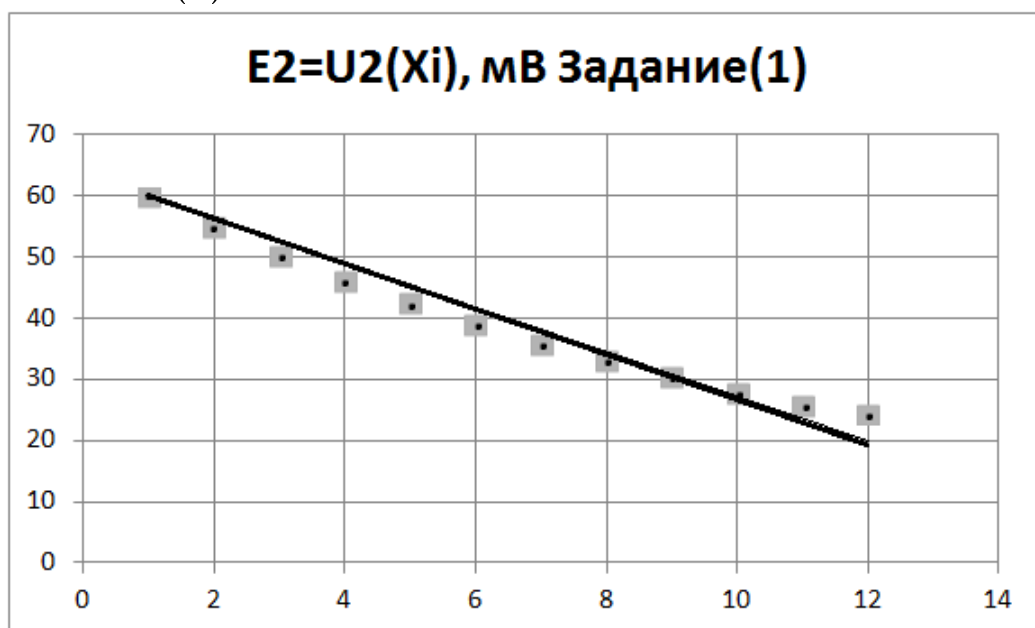
$$\frac{dU_2}{dU_1} = 11,53$$

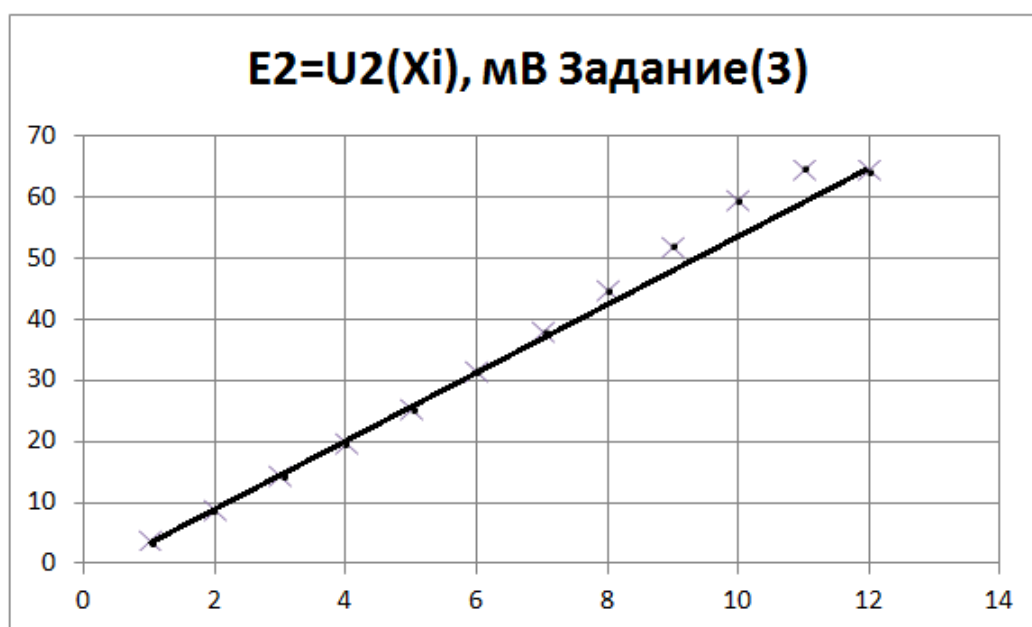
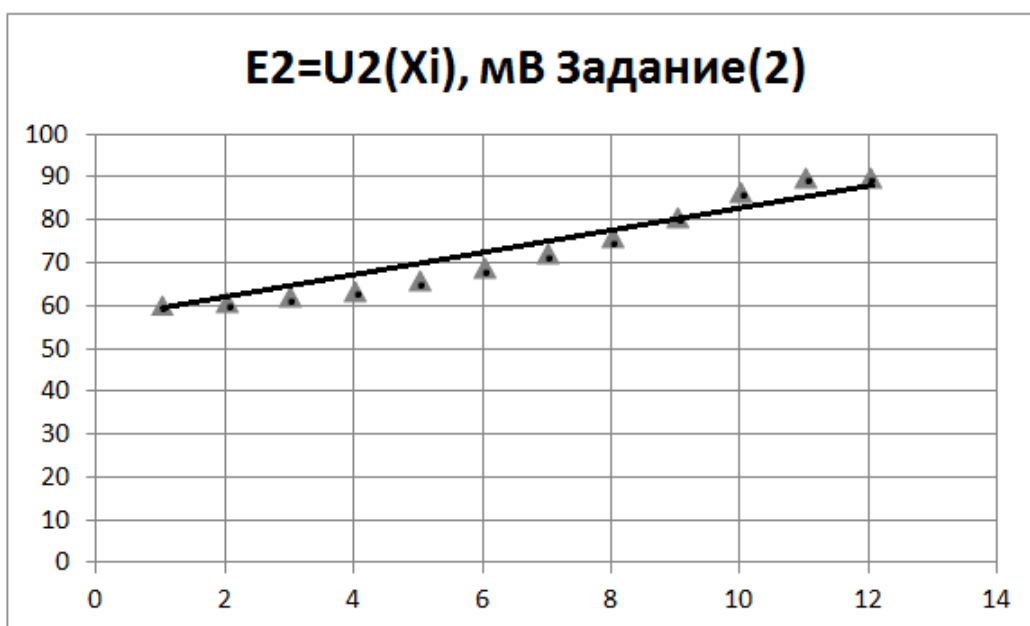
$$\frac{U_2}{U_1} = 18,7$$

$$\frac{dU_2/dU_1}{U_2/U_1} = 0,617$$

0.4 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Задание (1)





Задание (2)

По графику задания 2 определить диапазон положений x катушки 2, в котором $U_2(x)$, а значит и индукция поля B катушек Гельмгольца изменяются в пределах 10% от минимального значения.

В пределах от $x=3$ до 7 мм.

Задание (3)

По построенному для задания 3 графику оценить область изменения ве-

личины x , в котором зависимость $U_2(x)$ изменяется линейно.

В пределах от $x=3$ до 6 мм.

Задание (4)

Найти чувствительность дифференциального трансформатора $S = \Delta x / \Delta U_2$ в точке, где $U_2 = 0$, определив котангенс угла наклона касательной к графику, построенному для задания 3. Оценить погрешность измерения смещений δ по формуле $\delta x = S \delta U_2$, считая, что погрешность измерения δU_2 составляет половину последнего разряда цифрового вольтметра.

$$S = \Delta x / \Delta U_2 = 0,19$$
$$\delta x = S \delta U_2 = 0,04$$

Задание (5)

Найти толщину детали dA по значениям U_a и U_0 , полученным в задании 4, по формуле $dA = S(U_a - U_0)$.

$$dA = 0,98 \text{ мм.}$$

0.5 ВЫВОД

По результатам проведённого эксперимента был рассмотрен закон электромагнитной индукции и его применение для точного измерения перемещений и исследования пространственного распределения магнитного поля. Также мы ознакомились с экспериментальной установкой, позволяющей исследовать явление взаимной индукции в двух-трех контурах, неоднородность магнитного поля катушек Гельмгольца и измерить перемещения с погрешностью порядка 10 микрон, регистрировать изменения частоты и силы переменного тока. Помимо этого, была изучена методика градуировки и использования катушек Гельмгольца и дифференциального трансформатора для измерений различных физических величин.