

Министерство образования и науки Российской Федерации



Институт неразрушающего контроля

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИНК

_____ В.Н. Бориков

“ _____ ” _____ 2016 г.

ИНДУКТИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 9
по дисциплине “Первичные измерительные преобразователи и приборы”

ТОМСК 2016

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 "ИНДУКТИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ"

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Индуктивное измерительное преобразование основано на зависимости индуктивности обмотки от параметров обмотки и магнитной цепи, в которую включена обмотка.

Взамоиндуктивное измерительное преобразование основано на зависимости взаимной индуктивности обмоток от параметров обмоток и магнитной цепи, в которую включены обмотки, а также от взаимного положения обмоток.

Индуктивность L (от латинского *inductio* – наведение), величина, характеризующая связь между протекающим в обмотке электрическим током I (рис. 1а) и создаваемым этим током потокоцеплением Ψ через данную обмотку (полный магнитный поток через все витки обмотки):

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

Единицей измерения индуктивности является Генри (Гн).

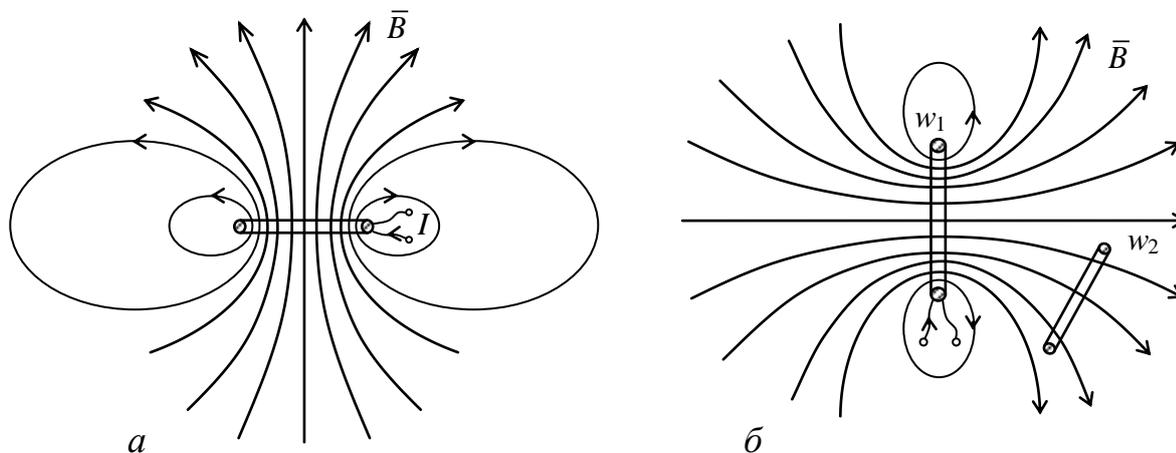


Рис. 1. Магнитное поле обмотки с током (а) и обмотка w_2 в магнитном поле электрического тока обмотки w_1

Если электрическая емкость конденсатора характеризует способность конденсатора накапливать электрический заряд, то индуктивность обмотки – способность последней создавать магнитное поле. Чем выше значение индуктивности обмотки, тем более сильное магнитное поле создает данная обмотка при фиксированном значении электрического тока I .

Взаимная индуктивность – величина, характеризующая магнитную связь двух или более электрических контуров (обмоток). Численно взаимная индуктивность M_{12} двух обмоток: w_1 , в которой протекает электрический ток I_1 ,

и w_2 , находящейся в магнитном поле электрического тока первой обмотки (рис. 1б), равен отношению потокосцепления Ψ_{12} магнитного поля электрического тока первой обмотки со второй обмоткой и силы тока первой обмотки:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}.$$

Если электрический ток протекает по второй обмотке рис. 1б, то взаимная индуктивность M_{21} определяется выражением:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2},$$

где I_2 – ток второй обмотки; Ψ_{21} – потокосцепление магнитного поля электрического тока второй обмотки с первой обмоткой.

Важно отметить, что $M_{21} = M_{12}$.

Очевидно, что взаимная индуктивность обмоток определяется не только интенсивностью и распределением в пространстве магнитного поля обмотки с током, но зависит от взаимного расположения обмоток (расстояния между обмотками и их ориентации в пространстве).

Индуктивность обмотки зависит от ее формы, размеров, числа витков, диаметра провода, способа намотки, а также от магнитных свойств окружающей обмотку среды.

Факторы, влияющие на значение индуктивности наиболее наглядно можно проиллюстрировать на примерах обмоток простейших геометрических форм.

Индуктивность двухпроводной линии с высокой степенью приближения описывается выражением:

$$L \approx \frac{\mu l}{\pi} \ln \frac{2a}{r},$$

где l – длина двухпроводной линии; $2a$ – расстояние между центрами проводников; r – радиус проводников; μ – магнитная проницаемость среды.

Индуктивность круглой одновитковой обмотки описывается выражением:

$$L \approx \frac{\mu R}{\pi} \ln \frac{2R}{r},$$

где R – радиус обмотки; r – радиус проводника; μ – магнитная проницаемость среды.

Анализ приведенных выше выражений показывает, что индуктивность одновитковой обмотки возрастает с увеличением ее размера, уменьшением диаметра провода и увеличением магнитной проницаемости окружающей среды.

Соответствующие выражения получены для одновитковых обмоток иной формы (прямоугольной, треугольной, эллиптической, сложной). Однако на практике одновитковые обмотки имеют ограниченное применение из-за

невозможности получения при малых размерах достаточных значений индуктивности. Более широкое применение для измерительных преобразований имеют многovitковые обмотки, примером которых является *соленоид* (многовитковая обмотка, длина которой много больше ее поперечного размера – рис. 2).

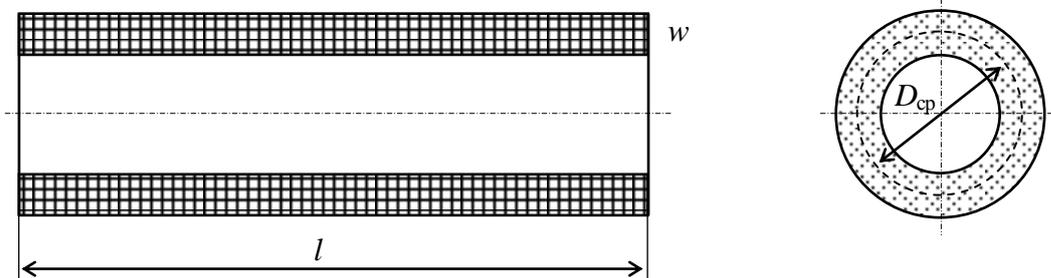


Рис. 2. Вид и геометрические параметры соленоида с витками круглой формы

Индуктивность соленоида определяется выражением:

$$L = \mu w^2 \frac{\pi D_{cp}^2}{4l} k_l,$$

где D_{cp} – диаметр среднего витка обмотки; l – длина соленоида; μ – магнитная проницаемость среды; w – число витков обмотки; k_l – множитель, зависящий от соотношения геометрических размеров l и D_{cp} . Для длинных соленоидов ($l > 10 D_{cp}$) множитель $k_l \rightarrow 1$. При $l < 10 D_{cp}$ значение множителя k_l определяется функциональной зависимостью рис. 3.

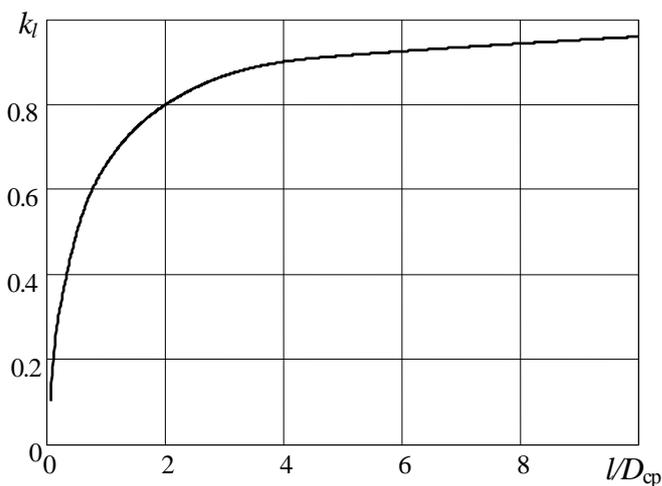


Рис. 3. Зависимость множителя k_l от соотношения длины соленоида и диаметра его среднего витка

Для нахождения индуктивности соленоидов, форма витков которых отличается от круглой, с достаточной для инженерных расчетов точностью можно воспользоваться выражением:

$$L = \mu w^2 \frac{S_{cp}}{l} k_l,$$

где $S_{\text{ср}}$ – площадь среднего витка обмотки.

Анализ приведенного выражения позволяет сделать некоторые выводы, справедливые не только для соленоида, но и любой многовитковой обмотки. Индуктивность многовитковой обмотки пропорциональна квадрату числа витков, площади среднего витка обмотки и магнитной проницаемости среды. С увеличением длины обмотки индуктивность уменьшается (для длинного соленоида по обратно пропорциональному закону).

Многовитковые обмотки без ферромагнитных сердечников (магнитопроводов) нашли применение в различных электронных устройствах, однако их использование непосредственно для измерительных преобразований ограничено главным образом задачей преобразования (измерения) магнитной проницаемости среды. Широкое же применение для индуктивного измерительного преобразования имеют обмотки с ферромагнитными сердечниками различной конструкции.

На рис. 4 показана обмотка с замкнутым ферромагнитным сердечником постоянного сечения. Особенность такой магнитной цепи заключается в том, что практически весь магнитный поток, создаваемый электрическим током I обмотки, замыкается по магнитопроводу, магнитная проницаемость которого на несколько порядков превышает магнитную проницаемость воздуха. В данном случае магнитными потоками рассеяния (замыкающимися не по магнитопроводу, а по воздуху) можно пренебречь, а магнитное поле в магнитопроводe считать однородным. Последнее, как правило, справедливо для постоянного и низкочастотного электрического тока.

С учетом принятых допущений магнитный поток Φ через обмотку может быть определен следующим образом:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = B S ,$$

где B – индукция в магнитопроводe; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

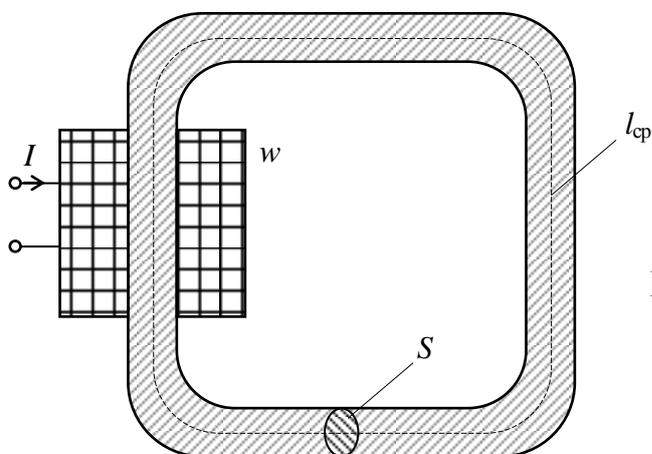


Рис. 4. Обмотка с замкнутым ферромагнитным сердечником (магнитопроводом).

Функциональная связь между током обмотки I и напряженностью H магнитного поля в магнитопроводе устанавливается законом полного тока, который с учетом принятых допущений может быть записан в виде:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = H l_{cp} = i_{пл} = I w,$$

где l_{cp} – длина средней силовой линии; w – число витков обмотки.

Соответственно выражение для индуктивности обмотки приобретает вид:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w\Phi}{I} = \frac{wBSw}{Hl_{cp}} = \frac{w^2 S}{l_{cp}} \frac{B}{H} = w^2 \frac{S\mu}{l_{cp}},$$

где $\mu = \mu_0 \mu_r$ – магнитная проницаемость материала магнитопровода.

Величина $r_m = \frac{l_{cp}}{S\mu}$ получила название *магнитного сопротивления*

магнитопровода. Единицей измерения магнитного сопротивления в системе СИ является ампер на вебер (А/Вб).

Таким образом, индуктивность обмотки прямо пропорциональна квадрату числа витков и обратно пропорциональна магнитному сопротивлению магнитопровода. Магнитное сопротивление магнитопровода прямо пропорционально длине средней силовой линии и обратно пропорционально площади поперечного сечения магнитопровода и магнитной проницаемости его материала.

На основании ранее полученных выражений:

$$\Phi = \frac{IL}{w} = \frac{Iw}{r_m}.$$

Это соотношение называют законом магнитной цепи. Оно по форме

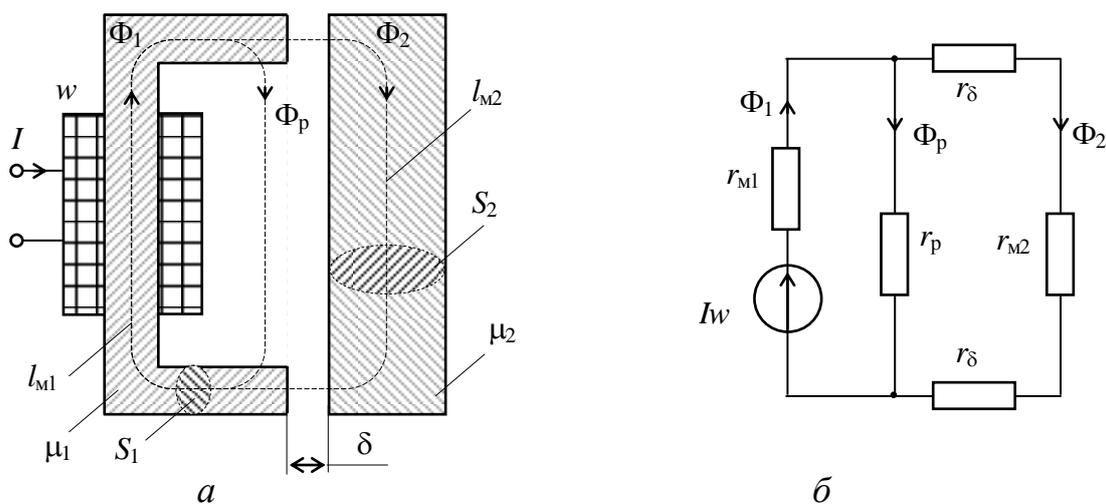


Рис. 5. Сложная магнитная цепь (а) и ее схема замещения (б)

аналогично закону Ома для замкнутой электрической цепи. Произведение Iw по аналогии с электродвижущей силой (эдс) называется *магнитодвижущей силой* (мдс) или намагничивающей силой.

В случае если магнитопровод состоит из участков с различными поперечным сечением и магнитной проницаемостью, имеет воздушные зазоры, а потоками рассеивания нельзя пренебречь (рис. 5а), то индуктивность обмотки определяется выражением:

$$L = \frac{w^2}{r_{m\Sigma}},$$

где $r_{m\Sigma}$ – полное магнитное сопротивление магнитной цепи, определяемое по аналогии с полным электрическим сопротивлением электрической цепи путем замены магнитной цепи ее схемой замещения (рис. 5б).

Магнитные сопротивления однородных участков магнитопровода определяются по формулам:

$$r_{mi} = \frac{l_i}{S_i \mu_i},$$

где l_i , S_i , μ_i – протяженность, площадь поперечного сечения и магнитная проницаемость материала i - того участка магнитопровода.

Магнитные сопротивления воздушных промежутков (зазоров) определяются выражением:

$$r_\delta = \frac{\delta}{S_\delta \mu_0},$$

где δ – длина воздушного зазора; S_δ – эквивалентная площадь воздушного зазора, равная для малых зазоров ($\delta \rightarrow 0$) площади магнитных полюсов и корректируемая для больших зазоров с учетом потоков выпучивания.

Магнитные сопротивления r_p участков магнитной цепи, характеризующихся наличием потоков рассеивания Φ_p определяются с использованием специальных методик. Существенное усложнение при расчетах индуктивности обмотки со сложным магнитопроводом кроме необходимости учета потоков рассеивания представляют наличие распределенной по магнитопроводу мдс, проявление нелинейных свойств ферромагнетиков, неоднородность магнитных полей на отдельных участках магнитопровода.

Зависимость индуктивности обмотки от геометрических и магнитных свойств всех участков магнитной цепи позволяет получать измерительную информацию о любом из этих параметров (например, длине воздушного зазора либо магнитной проницаемости материала).

На рис. 6 в качестве примеров иллюстрируется использование индуктивного измерительного преобразования для измерения толщины немагнитного покрытия на ферромагнитной пластине, поперечного размера ферромагнитного стержня, перемещения ферромагнитного предмета.

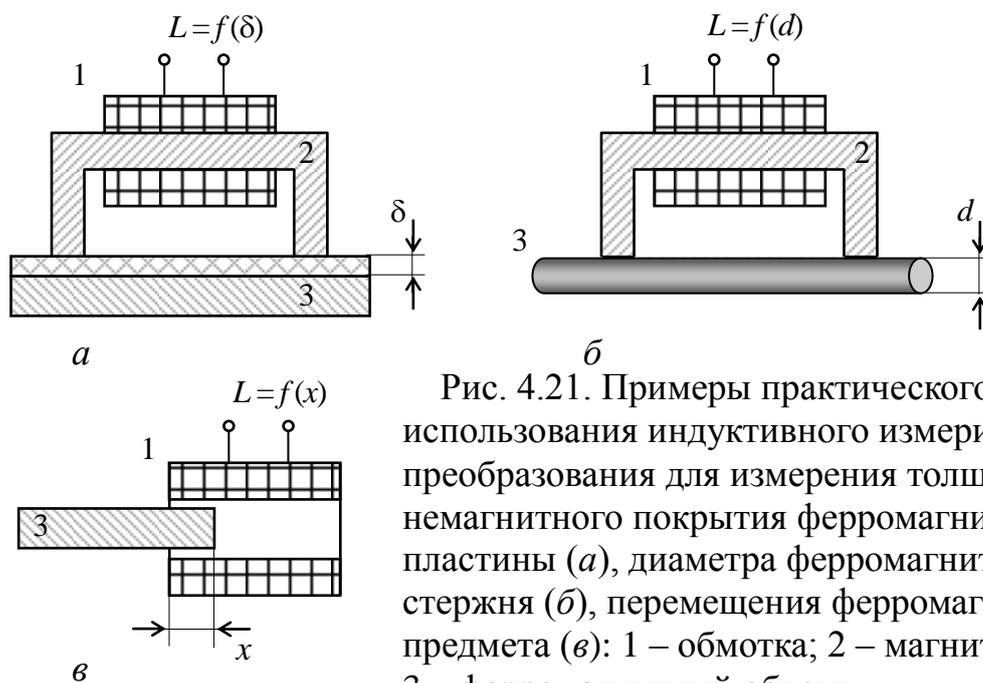


Рис. 4.21. Примеры практического использования индуктивного измерительного преобразования для измерения толщины немагнитного покрытия ферромагнитной пластины (а), диаметра ферромагнитного стержня (б), перемещения ферромагнитного предмета (в): 1 – обмотка; 2 – магнитопровод; 3 – ферромагнитный объект

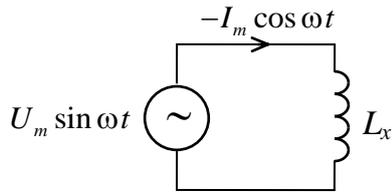
Взаимная индуктивность обмоток, как и собственная индуктивность, зависит от формы и размеров обмоток, числа витков, геометрических и магнитных характеристик магнитной цепи, в которую включены обмотки, магнитной проницаемости окружающей среды. Характер этой зависимости от указанных факторов, по сути, тот же, что и для собственной индуктивности.

Для случая замкнутого магнитопровода постоянного сечения (рис. 4) при наличии на магнитопроводе двух обмоток с числами витков w_1 и w_2 , их взаимная индуктивность определяется выражением близким выражению для индуктивности обмотки:

$$M = w_1 w_2 \frac{S \mu}{l_{cp}}$$

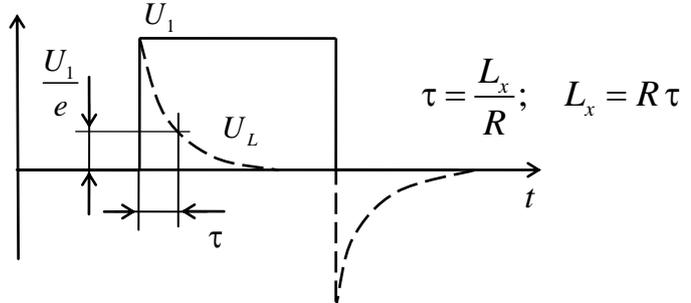
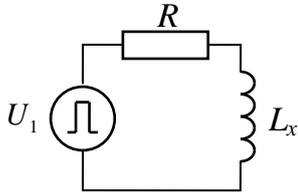
Кроме названных выше влияющих факторов взаимная индуктивность зависит также от взаимного положения обмоток, что может быть использовано в измерительных системах определения местоположения и ориентации объектов в пространстве.

На рис. 4 иллюстрируются основные методы измерения индуктивности: амперметра-вольтметра (а); переходного процесса (б); резонансный (в); мостовой (г, д).



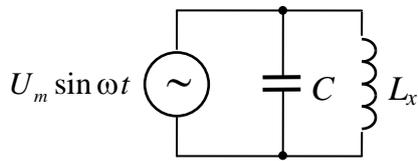
$$x_L = \frac{U_m}{I_m}; \quad L_x = \frac{x_L}{\omega}$$

a



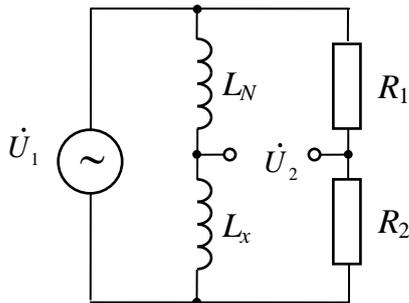
$$\tau = \frac{L_x}{R}; \quad L_x = R\tau$$

б



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_x C}}; \quad L_x = \frac{1}{\omega_0^2 C}$$

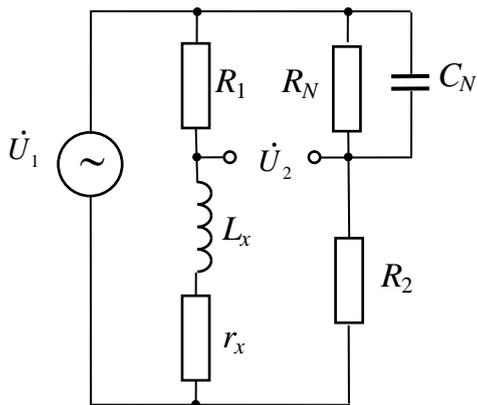
в



$$\dot{U}_2 = 0 \quad \text{при} \quad L_x R_1 = L_N R_2;$$

$$L_x = \frac{L_N R_2}{R_1}$$

г



$$\dot{U}_2 = 0 \quad \text{при} \quad r_x R_N = R_1 R_2; \quad \frac{L_x}{C_N} = R_1 R_2;$$

$$L_x = C_N R_2 R_1; \quad r_x = \frac{R_2 R_1}{R_N}$$

д

Рис. 4. Основные методы измерения индуктивности: амперметра-вольтметра (а); переходного процесса (б); резонансный (в); мостовой (г, д)

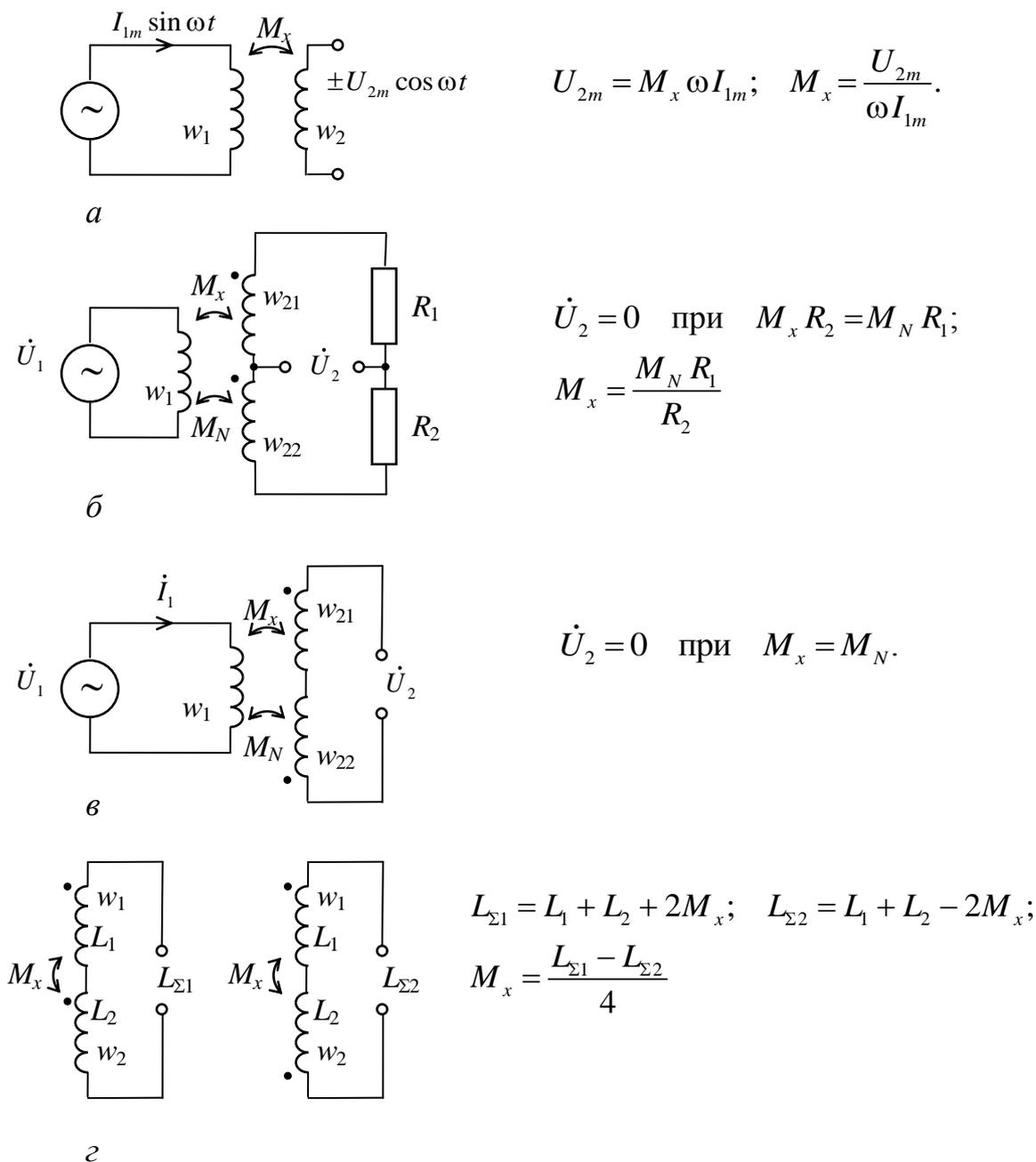


Рис. 5. Основные методы измерения взаимной индуктивности: амперметра-вольтметра (а); мостовой (б); полумостовой (в); изменением направления включения (г)

Обе схемы реализации мостового метода измерений рис. 4г и рис. 4д представляют собой уравновешенные мосты переменного тока. Уравновешивание осуществляется регулировкой значений сопротивлений резисторов R_1, R_2 (рис. 4г) и регулировкой значений сопротивления резистора R_N и емкости конденсатора C_N (рис. 4д). Отличие этих схем измерения заключается в возможности во втором случае измерять не только значение индуктивности обмотки L_x , но и значение активного сопротивления r_x . Такой же возможностью характеризуется схема реализации метода амперметра-вольтметра рис. 4а при условии использования для измерения тока и

напряжения приборов амплитудно-фазового преобразования, обеспечивающих измерение комплексных значений тока и напряжения.

Схема рис. 4г может быть использована также в варианте неуравновешенного моста переменного тока. В этом случае выходное напряжение моста \dot{U}_2 является функцией разности значений индуктивности L_x и L_N . Поэтому данная схема удобна для использования в качестве схемы включения дифференциального индуктивного измерительного преобразователя. Дифференциальные измерительные преобразователи, а также дифференциальное включение отдельных абсолютных измерительных преобразователей используют для корректировки функции преобразования (в том числе с целью обеспечения нулевого значения выходного сигнала при нулевом значении преобразуемого параметра, повышения линейности функции преобразования), а также компенсации влияния на результат преобразования какого либо мешающего фактора.

На рис. 5 иллюстрируются основные методы измерения взаимной индуктивности: амперметра-вольтметра (а); мостовой (б); полумостовой (в); изменением направления включения (г).

Схемы рис. 5б и рис. 5в могут быть использованы в вариантах как уравновешенного, так и неуравновешенного моста (полумоста) переменного тока. Во втором случае выходное напряжение \dot{U}_2 является функцией разности значений взаимной индуктивности M_x и M_N . Поэтому данные схемы удобны для использования в качестве схем включения дифференциального индуктивного измерительного преобразователя.

Метод измерения взаимной индуктивности изменением направления включения (рис. 5г) заключается в измерении значений суммарной индуктивности двух индуктивно связанных обмоток при согласном и встречном направлениях их включения и вычислении значения взаимной индуктивности по приведенной на рисунке формуле. Измерение значений индуктивности может осуществляться любым из ранее описанных способов.

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

- 2.1. В чем заключается физический смысл индуктивности и взаимной индуктивности обмоток?
- 2.2. От каких физических параметров зависят индуктивности и взаимные индуктивности обмоток?
- 2.3. Какого влияние на индуктивность и взаимную индуктивность обмоток параметров магнитной цепи?
- 2.4. Какого влияние на взаимную индуктивность обмоток их взаимного расположения?
- 2.5. Для решения каких измерительных задач могут быть использованы индуктивное и взаимноиндуктивное измерительные преобразования?
- 2.6. Каковы основные методы измерения индуктивности?
- 2.7. Каковы основные методы измерения взаимной индуктивности?
- 2.8. Для чего используется дифференциальное включение индуктивных и взаимноиндуктивных измерительных преобразователей?

3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с физическими основами индуктивного и взаимдуктивного измерительных преобразований. Ознакомление с вариантами конструкции, схемами включения и областями применения индуктивного и взаимдуктивного измерительных преобразований. Ознакомление с теоретическими основами и практическим применением для получения измерительной информации об объекте индуктивного и взаимдуктивного измерительных преобразователей соленоидальной конструкции с разомкнутым ферромагнитным сердечником.

4. ПРОГРАММА РАБОТЫ.

- 4.1. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала абсолютного индуктивного измерительного преобразователя от перемещения ферромагнитного сердечника.
- 4.2. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального индуктивного измерительного преобразователя от перемещения ферромагнитного сердечника.
- 4.3. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала абсолютного взаимдуктивного измерительного преобразователя от перемещения ферромагнитного сердечника.
- 4.4. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального взаимдуктивного измерительного преобразователя от перемещения ферромагнитного сердечника.
- 4.5. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального индуктивного измерительного преобразователя от толщины непроводящего покрытия ферромагнитной пластины.
- 4.6. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального индуктивного измерительного преобразователя от толщины электропроводящего покрытия ферромагнитной пластины.
- 4.7. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального взаимдуктивного измерительного преобразователя от толщины непроводящего покрытия ферромагнитной пластины.
- 4.8. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального взаимдуктивного измерительного преобразователя от толщины электропроводящего покрытия ферромагнитной пластины.

5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ.

Объектами исследований являются индуктивный и взаимдуктивный измерительные преобразователи соленоидальной конструкции с разомкнутыми ферромагнитными сердечниками стержневого типа. В качестве сердечника для исследования зависимости выходного сигнала от перемещения используется цилиндрический ферритовый стержень длиной 35 мм, а для исследования зависимости выходного сигнала от толщины покрытия – цилиндрический ферритовый стержень длиной 62 мм.

Измерение перемещения сердечника осуществляется с помощью щупа из оргстекла с метрической шкалой. В качестве образца ферромагнитной

пластины с немагнитным покрытием используется стальная пластинка размерами (43×43×1) мм. Изменение толщины покрытия осуществляется с помощью набора диэлектрических пластин толщиной 0,8 мм и немагнитных металлических пластин толщиной 0,5 мм.

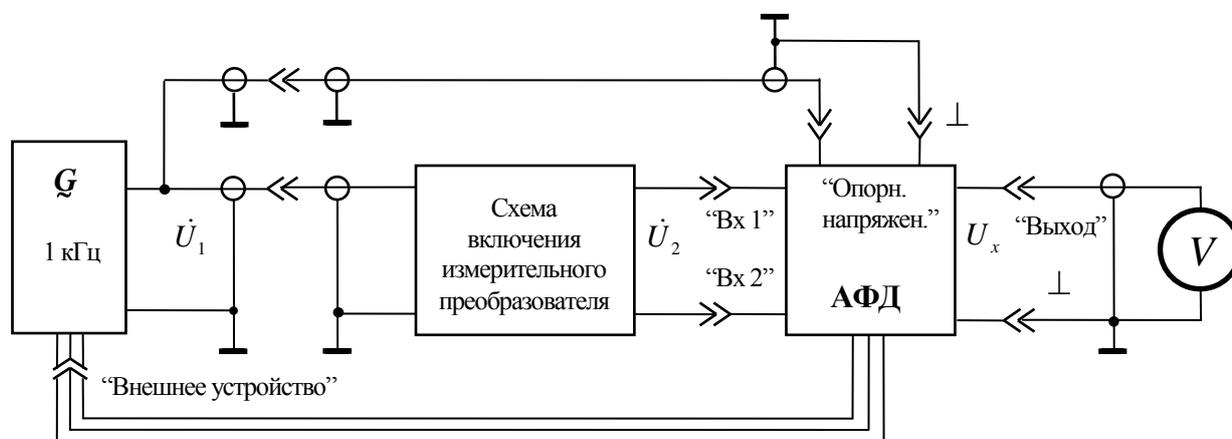


Рис. 6. Схема измерительной установки для исследования индуктивного и взаимноиндуктивного измерительных преобразователей

Схема измерительной установки для исследования индуктивного и взаимноиндуктивного измерительных преобразователей показана на рис. 6.

Исследуемый измерительный преобразователь размещается на специальной панели (рис. 7а). В варианте абсолютного индуктивного измерительного преобразователя используется обмотка w_{22} , в варианте дифференциального индуктивного измерительного преобразователя используются обмотки w_{21} и w_{22} , в варианте абсолютного взаимноиндуктивного измерительного преобразователя используются обмотки w_1 и w_{22} , в варианте дифференциального взаимноиндуктивного измерительного преобразователя используются обмотки w_1 , w_{21} и w_{22} .

Входным сигналом схемы включения всех измерительных преобразователей является гармоническое напряжение \dot{U}_1 генератора напряжения частотой 1 кГц. Выходные сигналы \dot{U}_2 схем включения измерительных преобразователей подаются на входы амплитудно-фазового детектора (АФД) (рис. 7б), выходным сигналом которого является постоянное напряжение U_x равное амплитуде входного переменного напряжения. В качестве опорного напряжения АФД используется входное синусоидальное напряжение \dot{U}_1 .

Кабель питания АФД подключается к разъему КИП "Внешнее устройство". Измерение выходного напряжения АФД U_x осуществляется с помощью мультиметра МУ-65.

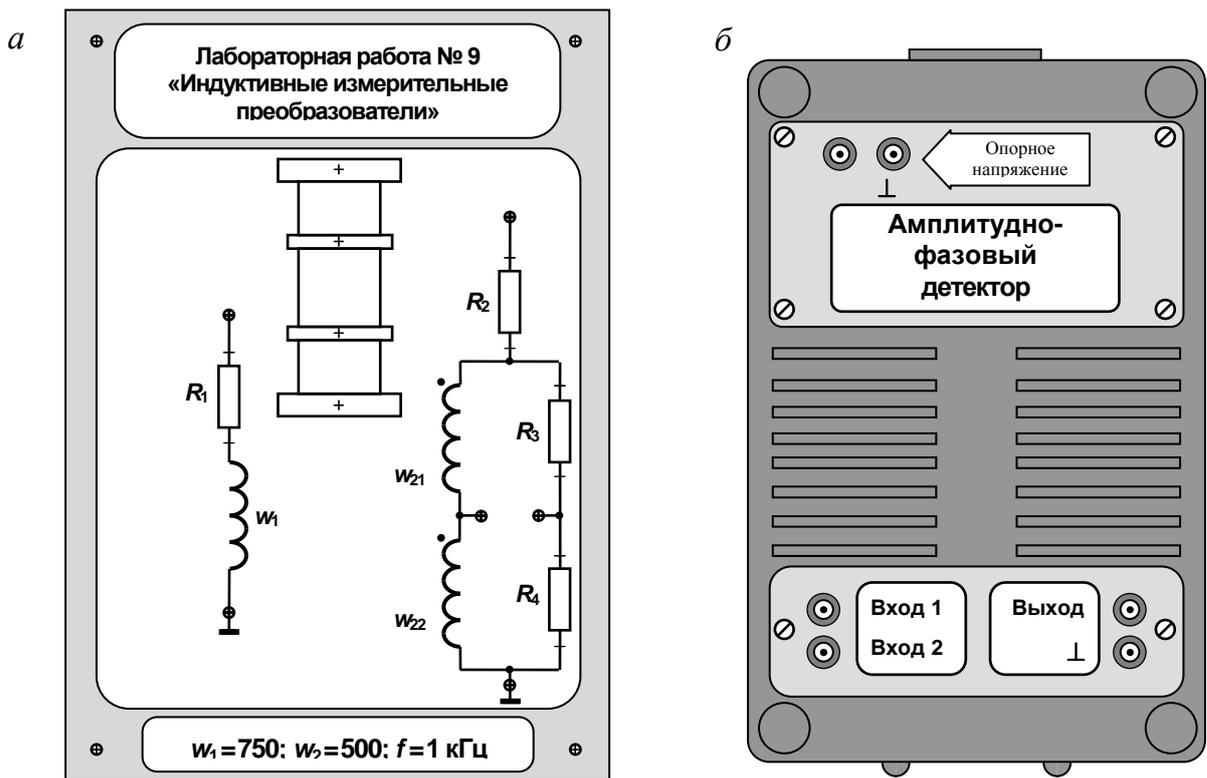


Рис. 7. Внешний вид панели индуктивного (взаимоиндуктивного) измерительного преобразователя (а) и амплитудно-фазового детектора (б)

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

На рис. 8 показана принципиальная электрическая схема панели индуктивного (взаимоиндуктивного) измерительного преобразователя и варианты включения отдельных преобразователей.

6.1. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала U_x абсолютного и дифференциального индуктивных измерительных преобразователей от перемещения ферромагнитного сердечника x в диапазоне (0...25) мм осуществляется с использованием схем включения рис. 8б и рис. 8в. Измерение x осуществляется с помощью щупа. Отсчет производится от нижнего торца каркаса преобразователя.

Результаты измерения значений U_x при заданных значениях x фиксируются в таблице. По результатам эксперимента строятся зависимости $U_x(x)$.

6.2. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала U_x абсолютного и дифференциального взаимноиндуктивных измерительных преобразователей от перемещения ферромагнитного сердечника x в диапазоне (0...25) мм осуществляется с использованием схем включения рис. 8г и рис. 8д. Измерение x осуществляется с помощью щупа. Отсчет производится от нижнего торца каркаса преобразователя.

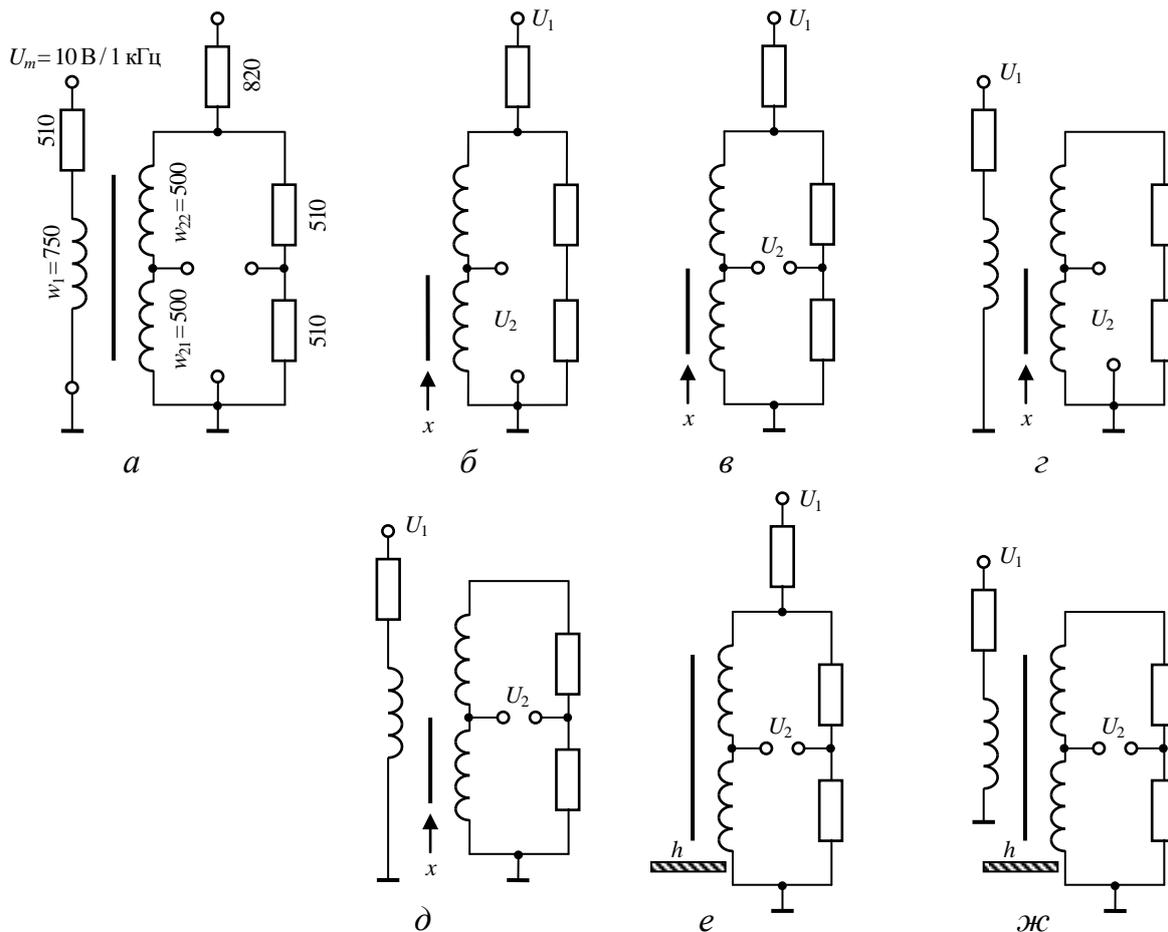


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема панели индуктивного (взаимоиндуктивного) измерительного преобразователя (а) и варианты включения отдельных преобразователей (б, в, з, д, е, ж)

Результаты измерения значений U_x при заданных значениях x фиксируются в таблице. По результатам эксперимента строятся зависимости $U_x(x)$.

6.3. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального индуктивного измерительного преобразователя U_x от изменения толщины h непроводящего и немагнитного электропроводящего покрытий ферромагнитной пластины осуществляется с использованием схемы включения рис. 8е. Изменение толщины непроводящего покрытия в диапазоне (0...4) мм осуществляется с помощью набора диэлектрических пластин толщиной 0,8 мм, изменение толщины немагнитного электропроводящего покрытия в диапазоне (0...2,5) мм – с помощью набора немагнитных металлических пластин толщиной 0,5 мм.

Результаты измерения значений U_x при заданных значениях h фиксируются в таблице. По результатам экспериментов строятся зависимости $U_x(h)$.

6.4. Экспериментальное определение зависимости выходного сигнала дифференциального взаимдуктивного измерительного преобразователя U_x от изменения толщины h непроводящего и немагнитного электропроводящего покрытий ферромагнитной пластины осуществляется с использованием схемы включения рис. 8ж.

Методика проведения экспериментов аналогична описанной в предыдущем разделе.

Полученные в разделах 6.1, 6.2 и разделах 6.5, 6.6 зависимости сравниваются между собой. Результаты сравнений отражаются в выводах по работе.

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 7.1. Название работы.
- 7.2. Цель работы.
- 7.3. Программа работы.
- 7.4. Схемы экспериментальных установок.
- 7.5. Основные соотношения, примеры расчетов.
- 7.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.
- 7.7. Графики зависимостей.
- 7.8. Выводы.

8. ЛИТЕРАТУРА

- 8.1. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.
- 8.2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.

Кафедра физических методов и приборов контроля качества.

Составитель: профессор кафедры ФМПК, д.т.н. А.Е. Гольдштейн.