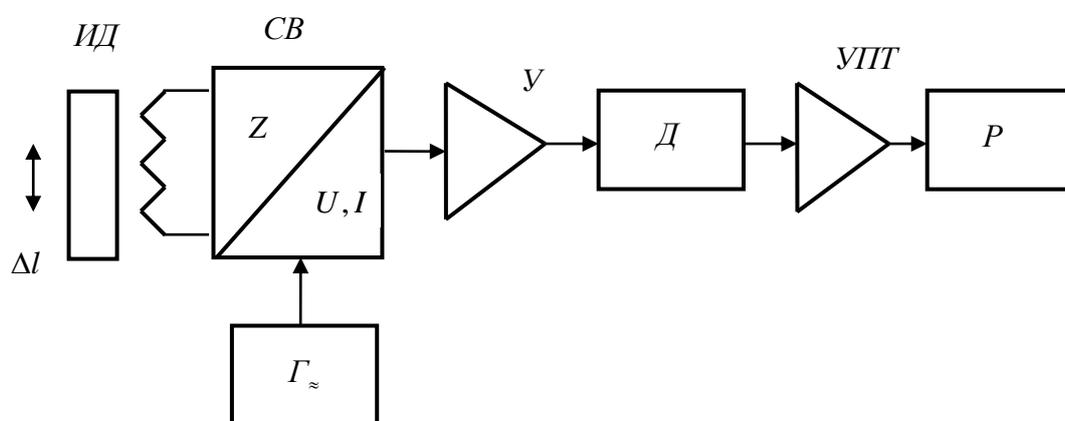


Лекция №14.

Индуктивные измерительные устройства

Индуктивный преобразователь представляет собой катушку индуктивности, полное сопротивление Z которой меняется при взаимном относительном перемещении элементов магнитопровода под влиянием измеряемого параметра. По принципу работы индуктивный преобразователь – датчик перемещений, однако, преобразуя разные физические величины (давление, сила, угол поворота, расход жидкости или газа и т. п.) в перемещение, можно эти физические величины эффективно измерять.

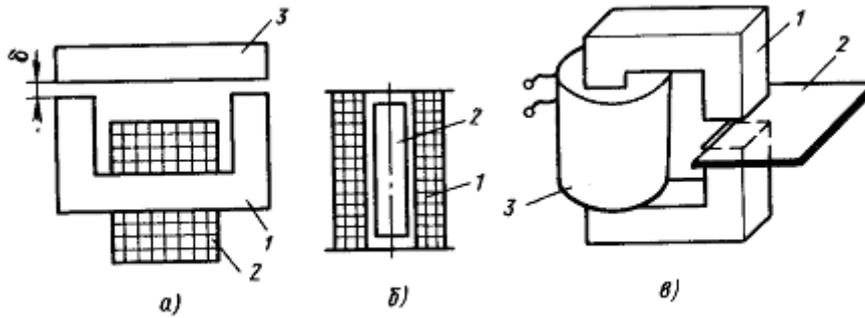
Структурная схема типовой измерительной системы, содержащей индуктивный преобразователь, приведена на рисунке.



Здесь *ИД* – индуктивный датчик, измеряющий перемещение Δl ; *СВ* – схема включения датчика, питаемая от генератора Γ_{\approx} и преобразующая изменение сопротивления Z катушки в изменение напряжения U или тока I ; *У* – усилитель сигналов датчика; *Д* – демодулятор (амплитудный детектор), выделяющий огибающую промодулированного и усиленного напряжения несущей частоты; *УПТ* – усилитель постоянного тока, усиливающий сигнал низкой частоты; *Р* – устройство, регистрирующее выходной сигнал в виде напряжения или тока. Поскольку структура измерительной системы построена по принципу прямого преобразования, ее интегральная чувствительность определяется соотношением:

$$S = \prod_{i=1}^k S_i = \frac{\partial Z}{\partial l} \cdot \frac{\partial U}{\partial Z} \cdot k_y \cdot k_d \cdot k_p \quad (14.1)$$

Принцип действия индуктивного датчика перемещений. Имеются два класса преобразователей: с изменяющейся индуктивностью и с изменяющимся активным сопротивлением. Пример схемы преобразователя первого класса показан на рис. 1, а.



Преобразователь состоит из П-образного сердечника (магнитопровода) 1, на котором размещена катушка 2, и подвижного якоря 3. При перемещении якоря изменяется длина воздушного зазора δ и, следовательно, магнитное сопротивление, что вызывает изменение индуктивности катушки датчика, которая может быть зарегистрирована. Возможен вариант преобразователя, в конструкции которого якорь перемещается горизонтально относительно П-образного сердечника и изменяет эффективную площадь замыкания магнитного потока. Оба варианта датчика: и с переменным зазором, и с переменной площадью – относятся к датчикам с замкнутой магнитной цепью.

Другая широко используемая модификация первого класса относится к датчикам с разомкнутой магнитной цепью. Пример такого датчика, называемого соленоидным или плунжерным преобразователем, показан на рис.1,б. Преобразователь представляет собой катушку 1, из которой может выдвигаться ферромагнитный сердечник 2 (плунжер). При среднем положении плунжера индуктивность максимальна. Этот тип преобразователя применяется для измерения значительных перемещений сердечника (до 100 мм).

Схема преобразователя второго класса приведена на рис. 1, в. В зазор магнитной цепи 1 вводится пластинка 2 с высокой электропроводностью, в которой наводятся вихревые токи, приводящие к увеличению потерь активной мощности катушки 3. Это приводит к изменению составляющих полного комплексного сопротивления катушки индуктивности, в частности, к увеличению ее активного сопротивления, что тоже может быть зарегистрировано. Этот тип датчика будет рассмотрен в классе вихретоковых преобразователей.

Определим *функцию преобразования* датчика на примере преобразователя с переменным зазором (рис. 1,а). Как известно, индуктивность катушки L определяется соотношением: $L = w\Phi/I$, где w – число витков; Φ – пронизывающий ее магнитный поток; I – проходящий по катушке ток. С учетом $\Phi = Iw/Z_M$, получим:

$$L = \frac{w^2}{Z_M}, \quad (14.2)$$

где Z_M – полное сопротивление магнитному потоку, которое состоит из двух составляющих: магнитного сопротивления сердечника Z_{mc} и магнитного сопротивления воздушных зазоров R_3 . Если пренебречь рассеянием магнитного потока и нелинейностью кривой намагничивания сердечника (они будут учтены в форме потерь на вихревые токи и магнитный гистерезис как составляющие сопротивления потерь R_{II}), то

$$Z_M = R_C + R_3 = \frac{l}{\mu\mu_0 S_C} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_3}, \quad (14.3)$$

где R_C – суммарное магнитное сопротивление участков магнитопровода; l – длина средней силовой линии по участкам магнитопровода; S_C – их поперечное сечение; μ – магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; δ и S_3 – соответственно длина и сечение воздушного зазора. Отсюда:

$$L = \frac{\mu_0 w^2}{\frac{l}{\mu S_C} + \frac{2\delta}{S_3}}. \quad (14.4)$$

Так как $S_C \approx S_3 = S_0$, а для удовлетворительной работы датчика требуется выполнение условия $2\delta \gg l/\mu$, что достигается выбором для магнитопровода материала с большим значением магнитной проницаемости $\mu \geq 10^3$, то окончательно получаем:

$$L \approx \mu_0 w^2 S_0 / 2\delta \quad (14.5)$$

и полное комплексное сопротивление Z катушки запишется в виде:

$$Z = R_{II} + j\omega L \approx R_{II} + j\omega\mu_0 w^2 S_0 / 2\delta. \quad (14.6)$$

Модуль полного комплексного сопротивления катушки индуктивности часто записывают в виде:

$$|Z| = \sqrt{R_{II}^2 + (\omega L)^2} = \omega L \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}}, \quad (14.7)$$

где $Q = \omega L / R_{II}$ – добротность индуктивного датчика, характеризуемая отношением запасенной энергии в контуре к энергии рассеянной. Значения Q для разных сердечников такие – сталь: $Q = 1-4$; пермаллой: $Q = 3-10$; ферриты: $Q = 3-20$.

Из выражения (14.6) оценим чувствительность датчика с переменным зазором:

$$S = \left| \frac{\partial Z}{\partial L} \right| \left| \frac{\partial L}{\partial \delta} \right| = \omega \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}} \cdot \frac{\mu_0 w^2 S_0}{2\delta^2} \quad (14.8)$$

В ряде случаев чувствительность индуктивного преобразователя удобно характеризовать величиной:

$$S \approx \frac{\Delta Z/Z}{\Delta \delta} = \frac{1}{Z} \cdot \frac{dZ}{d\delta} = 1/\delta, \quad (14.9)$$

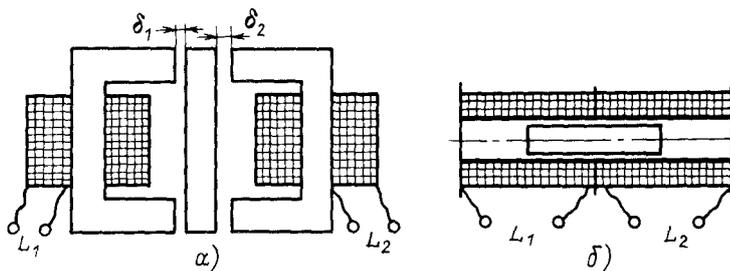
из которой следует существенное возрастание чувствительности датчика с уменьшением протяженности воздушного зазора δ . Из (14.9) следует, что относительное изменение индуктивности датчика равно:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta \delta}{\delta}. \quad (14.10)$$

Последнее выражение позволяет оценить порог чувствительности индуктивных датчиков перемещений. Современные измерительные схемы и приборы позволяют измерить относительное изменение индуктивности $\Delta L/L$ с точностью до (0,1-0,01) %, что соответствует относительному изменению зазора $\Delta \delta/\delta = 10^{-3} - 10^{-4}$. При номинальной величине зазора $\delta_0 = 0,5 \text{ мм}$ минимальные перемещения, которые могут быть зарегистрированы, равны 0,5 – 0,05 мкм.

Описанные одинарные индуктивные преобразователи имеют ряд недостатков: их функции преобразования нелинейны; аддитивные погрешности, вызванные температурным изменением активного сопротивления обмотки, сравнительно велики; электромагнитная сила притяжения, воздействующая на якорь, значительна. Поскольку связь между Z и δ описывается зависимостью, близкой к гиперболической, линейный участок рабочей характеристики ограничен значением $\Delta \delta = (0,1 - 0,15)\delta_0$.

Этих недостатков лишены дифференциальные преобразователи. Они состоят из двух одинаковых одинарных преобразователей, которые имеют общий подвижный элемент. Примеры схем таких преобразователей приведены на рисунке.



При перемещении якоря одна индуктивность L_1 возрастает, другая L_2 – уменьшается. Дифференциальные индуктивные преобразователи включаются в соответствующие плечи мостовых схем. Благодаря этому уменьшается аддитивная погрешность, улучшается линейность функции преобразования, вдвое возрастает чувствительность и уменьшается сила притяжения якоря.

Схема включения индуктивного преобразователя преобразует изменение полного сопротивления датчика в изменение электрического тока или напряжения в

зависимости от используемой схемы. Типовыми являются следующие схемы:

- последовательная схема, или схема генератора тока, преобразующая ΔZ в изменение тока ΔI ;
- схема делителя напряжения, преобразующая ΔZ в изменение напряжения ΔU ;
- мостовая схема включения, обеспечивающая преимущества дифференциальных индуктивных преобразователей по сравнению с одинарными датчиками;
- трансформаторная схема включения, основанная на измерении ЭДС, наведенной во второй обмотке датчика при изменении ΔZ первой обмотки;
- частотная схема включения, в которой изменение индуктивности ΔL катушки, входящей в состав колебательного контура, трансформируется в изменение частоты генерации Δf , измеряемой, например, с помощью частотомера.