

УДК 621.1

В.В. Кирюха

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ КОРРОЗИИ

Рассмотрены теоретические и практические вопросы применения индуктивных преобразователей для оперативного контроля толщины слоя коррозии, предложены практические схемы построения приборов контроля.

Ключевые слова: индуктивный преобразователь, точность контроля, коррозия, датчик.

V.V. Kiryuha

INDUCTIVE SENSORS AND THEIR APPLICATION TO SOLVING OPERATIONAL CONTROL CORROSION LAYER THICKNESS

Theoretical and practical issues of application of inductive transducers to control the thickness of the layer of corrosion.

Key words: converter, precision, control, corrosion, wear.

Индуктивные преобразователи представляют собой катушку индуктивности, параметры которой изменяются при механическом перемещении элементов магнитопровода относительно друг друга. Полное сопротивление любой катушки индуктивности – дросселя – складывается из активного и индуктивного сопротивлений и может быть определено по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2},$$

где R – активное сопротивление; f – частота; L – индуктивность.

Индуктивные датчики относятся к классу параметрических. Если датчик имеет незамкнутый магнитопровод, то любое перемещение элементов магнитопровода вызывает изменение параметров магнитной и электрической цепей, что, в свою очередь, вызывает изменение выходной величины – электрического тока или напряжения.

На рис. 1 показан индуктивный преобразователь с изменяющейся индуктивностью, а на рис. 2 – индуктивный датчик с нагрузкой L , подключенный к питающему напряжению V .

Индуктивность катушки с обмоткой определяется по формуле

$$L = \frac{w\Phi}{I},$$

где w – число витков катушки; Φ – магнитный поток, пронизывающий катушку; I – ток, проходящий по катушке.

В свою очередь, ток, проходящий по катушке, можно выразить как

$$I = \frac{HI}{w},$$

где HI – МДС катушки.

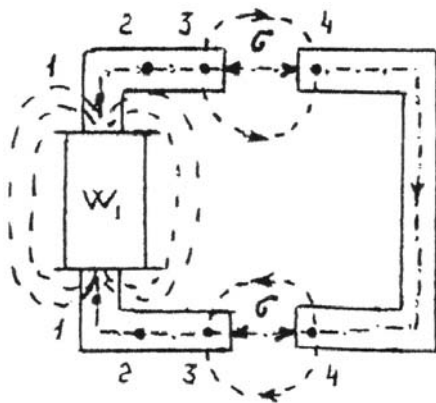


Рис. 1. Индуктивный преобразователь
Fig. 1. Inductive transducer

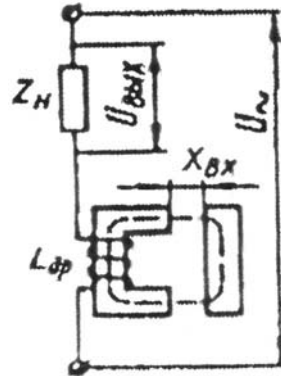


Рис. 2. Подключение индуктивного датчика
Fig. 2. Connection of the inductive sensor

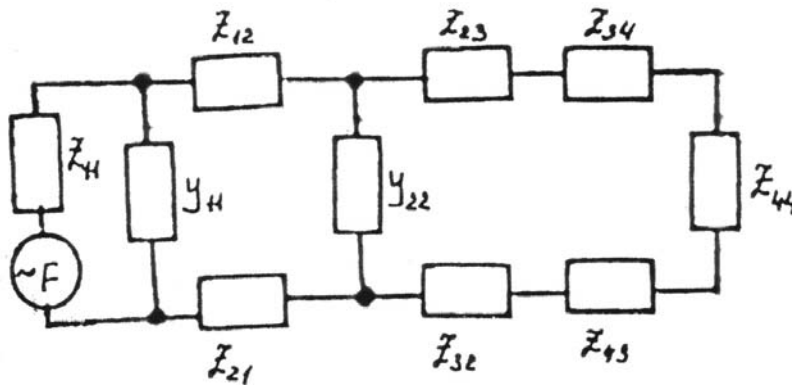


Рис. 3. Схема замещения
Fig. 3. Equivalent network

Тогда
$$L = w \frac{2}{R_m},$$

где R_m – магнитное сопротивление преобразователя.

Полное магнитное сопротивление преобразователя складывается из магнитного сопротивления ферромагнитного участка и магнитного сопротивления зазоров.

Магнитное сопротивление ферромагнитного участка может быть определено как

$$R_\delta = \frac{l_\delta}{\mu_\delta \cdot \mu_i \cdot S_\delta},$$

где l_δ – длина средней силовой линии, проходящей по ферромагнитным участкам; μ_δ – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечника; $\mu_i = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{A}{i}$ – магнитная постоянная; S_δ – поперечное сечение ферромагнитных участков.

Магнитное сопротивление воздушных зазоров может быть определено как

$$R_{\zeta} = \frac{2\delta}{\mu_i S_{\zeta}},$$

где δ – толщина воздушного зазора; S_{ζ} – поперечное сечение воздушного зазора.

При $S_{\delta} = S_{\zeta} = S$ и с учетом того, что магнитное сопротивление ферромагнитного участка много меньше магнитного сопротивления воздушного зазора, индуктивность преобразователя может быть определена по формуле

$$L = \frac{\mu_i S \cdot w^2}{2\delta}.$$

Тогда для схемы, показанной на рис. 2 среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя может быть определено по формуле

$$I = V / \sqrt{R^2 + X_L^2} = V / \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}.$$

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие $R \ll X_L$, получаем:

$$V_{\dot{a}i\delta} = \frac{VR_i}{\sqrt{R^2 + (\omega\mu_o S \cdot w^2 / \delta)^2}} = \frac{VR_i \delta}{\omega\mu_o Sw^2} = K\delta,$$

где $K = VR_i / (\omega\mu_o Sw^2)$ – коэффициент преобразования.

Коэффициент преобразования – величина постоянная, поэтому статическая характеристика $V_{\dot{a}i\delta} = f(\delta)$ должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат под углом $\alpha = ar\ ctg\ K$ к оси абсцисс. Реальные характеристики отличаются от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях δ допущение, что $r_m \ll r_{\delta}$ становится неверным, так как магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи становится неизмеримым с магнитным сопротивлением воздушного зазора, а при больших значениях зазора падает индуктивность обмотки L и реактивное сопротивление X_L становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т.е. $R \cong X_L$. Эти несоблюдения принятых в начале рассмотрения допущений и приводят к искажению статической характеристики.

Однако приведенные расхождения показывают, что имеется однозначная, близкая к линейной, зависимость выходных параметров индуктивного преобразователя от величины зазора в магнитопроводе.

Если индуктивный преобразователь изготовить без собственного якоря, а в качестве якоря использовать внешнюю ферромагнитную поверхность, то выходные параметры такого преобразователя будут изменяться в зависимости от расстояния (зазора) между измерительным преобразователем и внешней ферромагнитной поверхностью. Причем зазор может быть заполнен любым веществом с магнитной проницаемостью, отличной от магнитной проницаемости ферромагнитного вещества магнитопровода.

Магнитная проницаемость окислов железа (ржавчины) отличается от магнитной проницаемости железа. Поэтому датчики индуктивного типа можно использовать для контроля толщины слоя коррозии. Часто слой коррозии возникает под лакокрасочными покрытиями или имеются отдельные участки, покрытые ржавчиной и с нанесенными слоями краски. В таком случае датчик будет определять расстояние между непосредственно датчиком и ферромагнитным материалом.

Все ферромагнитные материалы в той или иной степени подвержены коррозии. Особенно сильно подвергаются коррозии металлические конструкции, работающие на открытом воздухе или в условиях агрессивней среды (опоры линий электропередач, корпус судна и т.д.). Коррозивные повреждения могут носить неравномерный характер. Это связано с тем, что на отдельных частях поверхности конструкций может быть нарушен защитный слой краски или отдельные части больше подвержены воздействию влаги. Контроль толщины слоя коррозии определяется эксплуатационными требованиями к таким сооружениям. Наиболее часто требуется контроль на достаточно громоздких и объемных сооружениях. Это опоры линий электропередач, металлические поверхности воздухо- и дымоотводных труб, листовые металлические поверхности крыш складов и пакгаузов, поверхности судовых конструкций. Зачастую часть таких конструкций находится в труднодоступных местах, что затрудняет проведение контрольных измерений. Для контроля толщины слоя коррозии в этих случаях необходимы приборы, удобные для обслуживания и позволяющие проводить замеры в условиях повышенного риска (большая высота, подводные замеры и т.д.) с достаточно высокой степенью точности. Необходимая точность таких измерений составляет 0,5-1,0 мм. Это объясняется тем, что толщина слоя коррозии может варьировать на вышеназванных сооружениях от долей до десятков миллиметров и допустимая погрешность оперативного контроля для оценки эксплуатационной надежности составляет 10-15 %.

Теоретически расчет электромагнитного преобразователя заключается в определении его электрических и магнитных параметров. Для преобразователя, показанного на рис. 1, может быть применена схема замещения, показанная на рис. 3. Преобразователь состоит из магнитопровода с зазором, в котором находится вещество с магнитными свойствами, отличными от свойств основного магнитопровода и катушки, расположенной на этом магнитопроводе. Полное сопротивление обмотки при питании ее переменным током можно записать в виде

$$L = R_0 + j\omega \frac{w^2}{L_m + R_\Delta} = R_0 + j\omega \cdot \frac{w^2 (R_m + R_\Delta)}{(R_m + R_\Delta)^2 + X_m^2} + \frac{w_\omega^2 X_m}{(R_m + R_\Delta)^2 + X_m^2} = R_{y\acute{e}a} + j\omega L$$

$$L_m = R_m + jX_m,$$

где w – число витков обмотки; R_0 – сопротивление обмотки постоянному току; L_m – магнитное сопротивление магнитопровода; $R_\Delta = \frac{2\delta}{\mu_i S}$ – магнитное сопротивление зазора; δ , S – толщина и площадь зазора.

Расчет магнитной цепи преобразователя с учетом сопротивления утечек производится на основе эквивалентной схемы замещения магнитной цепи. Для упрощения расчетов можно считать сосредоточенными параметрами комплексные магнитные сопротивления отдельных участков магнитопровода ($L_1 - L_4$), магнитные сопротивления воздушных зазоров R_Δ и проводимости путей утечек (J_{11} , J_{22}).

Расчет магнитных сопротивлений основных участков магнитопровода должен основываться на учете изменения значения индукции в материале и от степени проявления поверхностного эффекта. Поверхностный эффект необходимо учитывать при применении магнитопровода из сплошного материала и достаточно высокой частоте питающего напряжения. В расчетах поверхностный эффект учитывается при толщине листа или сплошного магнитопровода более чем $2L_{0,05}$, где $L_{0,05}$ – глубина проникновения электромагнитной волны в материал. Глубина проникновения для стали на частоте 50 Гц составляет 1-2 мм.

В условиях переменного магнитного поля при отсутствии или слабом проявлении поверхностного эффекта активная R_m и реактивная X_m составляющие магнитного сопротивления каждого участка рассчитываются по формулам

$$R_m = l / \mu S, \quad X_m = P_{\text{нб}} / \omega \hat{O}^2,$$

где Φ – действующий магнитный поток; $P_{\text{нб}}$ – мощность потерь на гистерезис и вихревые токи.

Значение мощности потерь для различных материалов магнитопровода учитывалось по ГОСТ 21427.0-75 и ГОСТ 21427.3-75. При сильном поверхностном эффекте магнитные сопротивления определяются не площадями S , а периметрами сечений ферромагнитных участков исследуемого магнитопровода V :

$$R_m = pl / V, \quad X_m = \chi l / V,$$

где p, χ – удельные поверхностные сопротивления, зависящие от свойств материала, частоты и линейной плотности магнитного потока.

На рис. 4 приведены характеристики p и χ для мягкой стали. Характеристики даны для частоты 50 Гц, однако их можно пересчитать на другую частоту по формулам

$$P_f = P_{50} \sqrt{f/50}, \quad \chi_f = \chi_{50} \sqrt{f/50}, \quad (\hat{O}/V)_f = (\hat{O}/V)_{50} \cdot \sqrt{50/f},$$

где $P_{50} : \chi_{50} : (\hat{O}/V)_{50}$ – параметр на частоте 50 Гц; $P_f : \chi_f : (\hat{O}/V)_f$ – параметр на искомой частоте.

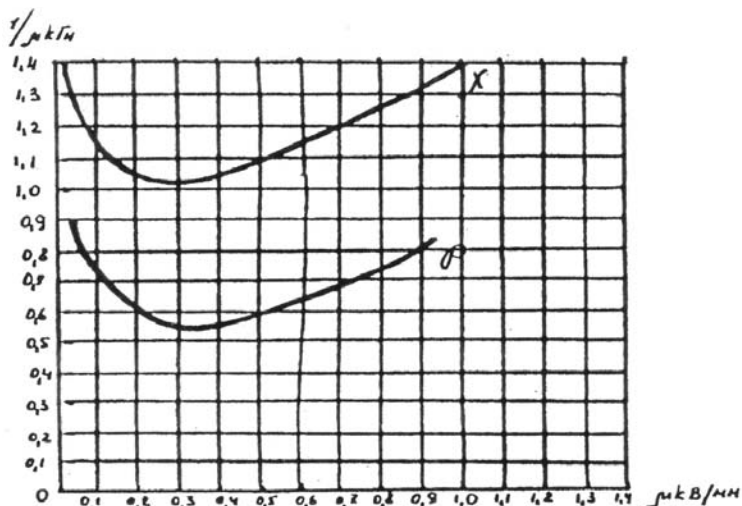


Рис. 4. Характеристики p и χ
 Fig. 4. Characteristic p and χ

При расчете магнитных сопротивлений зазоров и путей утечек через воздух необходимо учитывать, что невозможно добиться абсолютного прилегания датчика к контролируемой поверхности, поэтому будут иметься воздушные зазоры, которые будут влиять на распределение магнитной индукции в зазоре и на величину утечек с боковых поверхностей и ребер полюсов. При этом значение магнитного потока, идущего мимо рабочего зазора, будет тем больше, чем больше отношение толщины зазора к площади рабочей поверхности датчика. Поэтому равномерность индукции в зазоре достигается при использовании датчиков с сердечниками, геометрические размеры, плоскости контакта которых значительно превышают величину зазоров.

Электрическое сопротивление преобразователя с некоторыми допущениями, что все сопротивления утечек включены параллельно зазору, может быть выражено формулой

$$L = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_m + jX_m + P_\Delta \parallel R_{\delta\delta}} = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_m jX_m + \frac{\sigma}{\mu S} \parallel R_{\delta\delta}} =$$

$$= \frac{\omega w^2 X_m}{R_0 + \sqrt{(R_m + R_\Delta \parallel R_{\delta\delta})^2 + X_m^2}} + j \frac{\omega w^2 \left(R_m + \frac{\sigma}{\mu S} \parallel R_{\delta\delta} \right)}{\sqrt{(R_m + R_\Delta \parallel R_{\delta\delta})^2 + X_m^2}}.$$

Из этой формулы видно, что L связано с параметром зазора δ зависимостью, близкой к гиперболической. Данная зависимость показана на рис. 5.

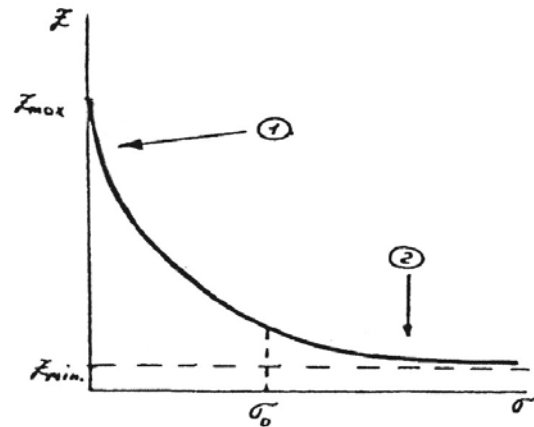


Рис. 5. Зависимость $Z = f(\sigma)$

Fig. 5. Relation $Z = f(\sigma)$

Для успешной работы датчика желательно иметь участок линейной зависимости. Он может быть выбран либо в верхней, либо в нижней части зависимости. Использование в качестве рабочего участка верхней части зависимости (участок 1) дает высокую чувствительность измерителя. Этот участок можно использовать для контроля толщин в пределах 0,001-0,1 мм. При необходимости контроля толщин 1,0-10,0 мм целесообразно использовать нижний участок зависимости (участок 2).

Автором разработан и успешно применяется прибор для оперативного контроля толщины слоя коррозии с датчиком индуктивного типа, построенного на основе вышеизложенных соображений. Применен датчик на основе броневого сердечника с катушкой, содержащей около 4000 витков. При работе на верхнем участке характеристики имеется изменение со-

противления 5-10 Ом на 1 мкм, при работе на нижнем участке характеристики – 0,1-0,3 Ом на 1 мкм. Такое изменение легко фиксируется приборами. Для увеличения точности контроля применена мостовая схема измерения. В одно плечо измерительного моста включен датчик, а в другое – компенсатор, который представляет собой копию датчика с нулевым или фиксированным зазором. Блок-схема прибора для оперативного контроля толщины слоя коррозии показана на рис. 6.

Применение приборов такого типа позволяет оперативно и с приемлемой точностью проводить контроль больших поверхностей, в том числе в труднодоступных местах.

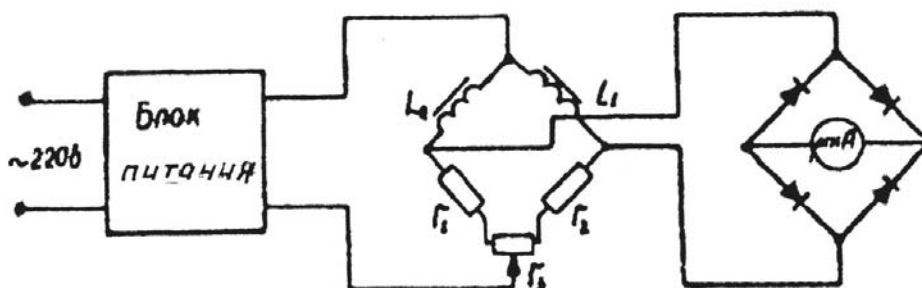


Рис. 6. Блок-схема прибора
Fig. 6. Block diagram of the device

Список литературы

1. Кирюха В.В. Измерительные преобразователи в системах автоматики. Теория, устройство, применение. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 216 с.
2. Кирюха В.В., Соломанюк Л.С. Задача оперативного контроля толщины слоя коррозии и способы ее технического решения // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2001. – Вып. 14.

Сведения об авторе: Кирюха Владимир Витальевич, доцент.