

В. И. ИВАНОВ, Е. И. ФЕОФИЛОВ

(Москва)

БЕЗМОМЕНТНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК

Индуктивные низкочастотные преобразователи линейных и угловых перемещений являются наиболее распространенными датчиками первичной информации. Благодаря своей простоте и исключительной надежности эти датчики все шире внедряются в ответственных автоматических и телеизмерительных устройствах [1]. Наиболее распространенной конструкцией индуктивного преобразователя является дифференциальный преобразователь, в котором чувствительным элементом является якорь, воспринимающий линейные или угловые перемещения.

Если под датчиком понимать измерительную цепь с включенным в нее индуктивным преобразователем, то к такому датчику предъявляются обычно требования высокой чувствительности и линейности статической характеристики. При относительно небольших перемещениях статическая характеристика датчика, собранного, например, по схеме моста, достаточно линейна [2], однако чувствительность, коэффициент усиления датчика, составляет сравнительно небольшую величину, недостаточную во многих случаях для использования его в прецизионных приборах.

Известно, что повышение чувствительности индуктивного датчика может быть легко достигнуто увеличением напряжения питания измерительной цепи. Однако такое увеличение напряжения вызывает резкое увеличение реакции датчика — электромагнитного момента, так как реакция датчика растет приблизительно пропорционально квадрату напряжения питания. В таких приборах, как, например, в линейном акселерометре, использующем принцип электрической пружины, появление большого электромагнитного момента уменьшает точность измерения и считается недопустимым явлением. Поэтому при разработках новых конструкций таких датчиков следует отыскивать какой-то оптимальный вариант схемы и устанавливать напряжение питания не свыше определенного, заранее заданного значения [3].

Используя некоторые работы наших и зарубежных ученых [4], установили, что величину электромагнитного момента можно уменьшить до сколь угодно малой величины и даже создать в индуктивном датчике положительную реакцию, т. е. осуществить упругую подвеску якоря посредством саморегулирующего магнитного поля. Предлагаемый метод значительно уменьшает реакцию датчика и заключается в следующем.

Рассмотрим мостовую схему включения дифференциального индуктивного преобразователя (рис. 1). Как видно из этой схемы, катушки

преобразователя включаются последовательно с конденсаторами C и образуют в правой и левой ветвях мостовой схемы последовательные резонансные контуры.

При частоте источника питания ω , во много раз большей наивысшей гармоники измеряемой величины, выходное напряжение U_2 представляет амплитудно-модулированное колебание, а величина электромагнитного момента в таком датчике будет определяться огибающей этого напряжения [5]. Поэтому определим характер изменения амплитудных значений токов I_1 и I_2 в зависимости от изменений зазора x дифференциального датчика. В конструкции преобразователя предполагается, что толщина якоря достаточно велика и катушки L_1 и L_2 не оказывают взаимного влияния. Тогда при принятых обозначениях

$$I_1^2 = \frac{U_1^2}{R_2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad I_2^2 = \frac{U_1^2}{R^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (1)$$

Если относительное перемещение якоря невелико, индуктивности каждой катушки в предположении, что магнитодвижущая сила затрачивается только на проведение магнитного потока в воздушном зазоре, могут быть определены, согласно рис. 2:

$$L_1 = \frac{\mu_0 S}{2} \frac{w^2}{\Delta - x} = \frac{\mu_0 S}{2} \frac{w^2}{\Delta} \frac{\Delta}{\Delta - x} = L_0 \frac{1}{1 - \varepsilon};$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 S}{2} \frac{w^2}{\Delta} \frac{\Delta}{\Delta + x} = L_0 \frac{1}{1 + \varepsilon}, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; S — сечение магнитопровода датчика; w — число витков; ε — относительное перемещение якоря.

Следовательно, выражения для токов I_1 и I_2 будут иметь вид*

$$I_{1,2}^2 = \frac{U_1^2}{R^2 + \left(\omega L_0 \frac{1}{1 \mp \varepsilon} - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (3)$$

Силы F_1 и F_2 электромагнитного притяжения якоря преобразователя с учетом наложенных выше ограничений могут быть определены производными от энергий магнитного поля по перемещению, поэтому

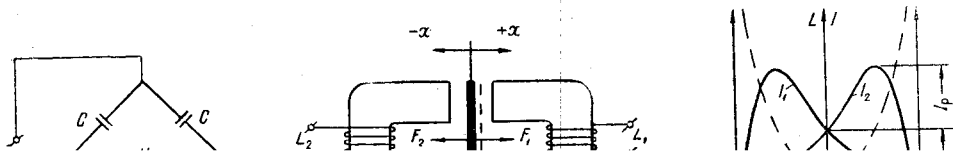
$$F_{1,2} = \frac{1}{2} I_{1,2}^2 \frac{dL_{1,2}}{dx} = \pm \frac{L_0}{2\Delta} \frac{I_{1,2}^2}{(1 \mp \varepsilon)^2}. \quad (4)$$

Из этих выражений видно, что электромагнитные силы, действующие на якорь со стороны верхней и нижней катушек преобразователя, зависят от перемещения якоря и имеют резко выраженный гиперболический характер. С другой стороны, эти силы зависят от токов I_1 и I_2 , величины которых, как это видно из (3), определяются перемещением якоря преобразователя.

Естественно предположить, что уменьшение реакции датчика может быть осуществлено, если параметры мостовой схемы подобраны так, что с уменьшением зазора, например в катушке L_1 , ток I_1 будет уменьшаться и, наоборот, ток I_2 в катушке L_2 будет увеличиваться. Рассматривая качественную картину зависимостей тока (рис. 3),

* Здесь и далее для сокращения записи формулы объединяются, так что они имеют одинаковую форму, отличаясь только знаками.

можно убедиться, что подобное явление будет действительно иметь место, если начальная индуктивность L_0 выбрана так, что в среднем положении якоря преобразователя ($x=0$) левая и правая ветви мостовой схемы будут настроены на падающие участки резонансных кривых токов I_1 и I_2 .



Введем безразмерную величину ξ , определяющую ток I_0 в катушках L_1 и L_2 в среднем положении якоря по отношению к току последовательного резонанса I_p , и определим при этом начальную индуктивность L_0 , соответствующую указанной выше настройке. Из уравнений (1) при $L_1=L_2=L_0$ имеем

$$\xi^2 \frac{U_1^2}{R^2} = \frac{U_1^2}{R^2 + \left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Если далее ввести затухание контура $d = \omega CR$, получим уравнение $\xi^2 d^2 - \xi^2 (1 - \omega^2 L_0 C)^2 = d^2$, которое дает возможность определить требуемую величину

$$L_0 = \frac{1 \pm x d}{\omega^2 C}, \quad (5)$$

где $x = \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}$. В этом выражении в числителе необходимо взять знак плюс, так как только в этом случае настройка преобразователя будет соответствовать падающему участку резонансных кривых токов I_1 и I_2 . Введем теперь найденную величину L_0 в уравнения (3), определяющие токи в катушках в функции относительного перемещения ε ; тогда

$$I_{1,2}^2 = \frac{U_1^2}{R^2 + \left(\omega \frac{1 + x d}{\omega^2 C} \frac{1}{1 \mp \varepsilon} - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \frac{U_1^2}{R^2} \frac{d^2}{d^2 + \left(\frac{x d \pm \varepsilon}{1 \mp \varepsilon} \right)^2}. \quad (6)$$

Если теперь в уравнения (4) подставить найденные значения токов I_1 и I_2 , то получим зависимость сил F_1 и F_2 в функции относительного перемещения

$$F_{1,2} = \pm \frac{U_1^2}{2 \Delta R^2} \frac{d^2}{d^2 + \left(\frac{x d \pm \varepsilon}{1 \mp \varepsilon} \right)^2} \frac{1 + x d}{\omega^2 C} \frac{1}{(1 \mp \varepsilon)^2}.$$

После алгебраических преобразований выражения для F_1 и F_2 значительно упрощаются:

$$F_{1,2} = \pm F_0 \frac{1}{(1 \mp \varepsilon)^2 + Q^2 (\kappa d \pm \varepsilon)^2}, \quad (7)$$

где $F_0 = \frac{U_1^2}{2 \omega^2 R^2 C} \frac{1 + \kappa d}{\Delta}$ — удвоенное значение силы, действующей на якорь преобразователя в среднем положении при $\kappa=1$, что соответствует $\xi=0,707$; Q — добротность резонансного контура. Уравнения (7) позволяют определить результирующую силу $F=F_1+F_2$, т. е. реакцию индуктивного преобразователя:

$$F = F_0 \frac{4 \varepsilon (1 - \kappa Q)}{[1 + \varepsilon^2 + Q^2 (\varepsilon^2 + \kappa^2 d^2)]^2 - 4 \varepsilon^2 (1 - \kappa Q)^2}. \quad (8)$$

Если параметры левой и правой ветвей мостовой схемы выбрать так, чтобы $\kappa=1$, уравнения (8) значительно упрощаются и принимают следующий вид:

$$F = F_0 \frac{4 \varepsilon (1 - Q)}{(1 + 2 Q^2 + Q^4) \varepsilon^4 + 8 \varepsilon^2 Q + 4}. \quad (9)$$

Анализ полученного уравнения позволяет установить, что результирующая сила, действующая на якорь при заданных геометрических размерах, напряжении и частоте питания мостовой схемы, зависит только от величины добротности контура и выбора начальной рабочей точки на резонансной кривой тока.

Так, при $Q < 1/\kappa$, как видно из (8), эта сила создает отрицательную жесткость, что обуславливает определенную величину реакции датчика и неустойчивое состояние равновесия якоря в среднем положении. Для компенсации этой неустойчивости в преобразователях, включенных по обычным схемам, вводят механические пружины, которые обладают заметным механическим гистерезисом, и тем самым делают невозможным применение таких преобразователей в прецизионных приборах. Формула (8) показывает, что при $Q=1/\kappa$ индуктивный преобразователь становится безреактивным датчиком, так как $F \equiv 0$ при любых перемещениях якоря.

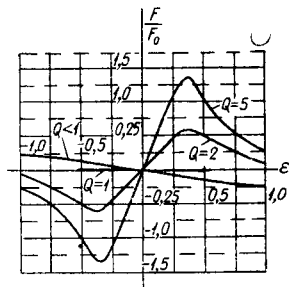


Рис. 4.

На рис. 4 представлены графики $F=F(\varepsilon)$, вычисленные, согласно (9), для различных значений Q . Эти графики дают наглядное представление о характере магнитных сил и подтверждают сделанные выше выводы.

Нас, однако, интересует случай, когда $Q=1/\kappa$, так как целью настоящей работы является построение схемы безреактивного датчика,

в котором $F \equiv 0$. Указанная методика расчета дифференциального датчика требует некоторых уточнений. Во-первых, величина Q (при малых ее значениях) представляет некоторую фиктивную величину, ибо добротность контура будет также определяться и величиной эквивалентного сопротивления вихревым токам в самом магнитопроводе. Следовательно, практическая величина Q для безреактивного датчика должна быть несколько больше единицы. Во-вторых, следует отличать добротность контура от добротности катушки, так как добротность катушки при $Q_{\text{кон}} = 1$ составит $Q_{\text{кат}} = \sqrt{1 + Q_{\text{кон}}^2} \approx 1,41$. В-третьих, добротность катушки зависит от перемещения, т. е. $Q_{\text{кат}} = f(\varepsilon)$. Приведенный выше теоретический расчет датчика необходимо скорректировать по величинам $Q_{\text{кат}} = f(\varepsilon)$.

Определение фактической величины Q при учете всех перечисленных факторов очень усложняет расчет и выходит за рамки настоящей статьи. Тем не менее для хорошего совпадения практических результатов с расчетными необходимо брать величину Q порядка 2—4 и иметь возможность ее регулировать. Такая регулировка может быть осуществлена включением сопротивлений параллельно катушкам. Следует также при расчетах учитывать величину внутреннего сопротивления источника питания. Лучшие практические результаты получаются, если мост питать от специального согласующего трансформатора.

Определим теперь чувствительность датчика. Так как токи нам известны, то выходное напряжение \dot{U}_2 можно определить как разность падений напряжения на двух конденсаторах:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{1}{j\omega C} (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) = \frac{\dot{U}_1}{j\omega RC} \left[\frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon - j(xd - \varepsilon)Q} - \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon + j(xd + \varepsilon)Q} \right] = \\ &= \frac{\dot{U}_1}{j\omega RC} \frac{2j\varepsilon(Q + x)}{(1 + jx)^2 - \varepsilon^2(1 - j)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что $F \equiv 0$ при $Q = x = 1$, получим:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{j} \frac{2\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}; \quad S_U = \frac{2\dot{U}_1}{j} \frac{1 - \varepsilon^2}{(1 + \varepsilon^2)^2}. \quad (11)$$

Так, например, если напряжение моста равно 115 в ($f = 400$ гц), то чувствительность датчика в среднем положении якоря при $\varepsilon = 0$ составит величину порядка 230 в/мм. Однако если эта величина недостаточна, то ее можно легко повысить соответствующим увеличением напряжения питания моста. При этом опять-таки датчик будет безреактивным, в то время как в обычных схемах произойдет значительное увеличение реакции, что повлечет за собой ухудшение точности преобразования неэлектрической величины.

Испытания описываемого датчика, имеющего сердечник из феррита, показали хорошее совпадение полученных результатов с расчетными данными по графику рис. 4.

Следует указать, что хотя якорь и центрируется в среднем положении при $Q > 4$, тем не менее возникают колебания двойной частоты с амплитудой до 10—20 мкм, которые можно погасить путем шунтирования конденсаторов активными сопротивлениями.

Анализ устойчивости работы датчика как системы регулирования с самовыравниванием показал, что имеются определенные зоны неустойчивости [4], зависящие от массы якоря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Никитин, С. А. Шестов. Магнитный подвес для поплавковых приборов.— ИВУЗ, Приборостроение, 1961, № 6.
2. Ю. Е. Нитусов. Статические характеристики электромагнитного вибратора с конденсатором.— Сб. научных трудов МВТУ, вып. 87. М., Госэнергоиздат, 1958.
3. К. Д. Колесников. Индуктивные и взаимноиндуктивные преобразователи малых перемещений высокой чувствительности по мощности с малыми электромагнитными силами. ЦИТЭИ, 1960.
4. J. F. Kippard. Applied electrical measurements. N. Y. John Wiley & Sons, Inc. 1956.
5. Ю. Е. Нитусов. О процессах в системе электромагнит — конденсатор.— Сб. научных трудов. МВТУ, вып. 87. М., Госэнергоиздат, 1958.

*Поступила в редакцию
25 июля 1967 г.,
окончательный вариант
30 января 1968 г.*