

Я. Р. АБДУЛЛАЕВ
 (Смоленск)

РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ Э. Д. С. ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА С ДВУМЯ ПОДВИЖНЫМИ ЭКРАНАМИ

Индукционные датчики с подвижными экранами находят широкое применение в различных приборах и устройствах современной автоматической и информационно-измерительной техники [1]. В настоящее время индукционные датчики с подвижными экранами выполняются в основном с одним подвижным экраном. Однако, как показывают исследования [2—4], датчики с несколькими подвижными экранами имеют ряд преимуществ по сравнению с датчиками с одним подвижным экраном: высокую чувствительность, незначительный нулевой сигнал, широкий предел линейного участка статической характеристики и т. д.

Одна из конструкций таких датчиков, показанная на рис. 1, предназначена для измерения угловых перемещений рамки карданного подвеса гироскопического прибора. Магнитопровод датчика состоит из наружного 1 и внутреннего 2 статоров. На наружном статоре 1 расположены секции 3 обмотки возбуждения, которые соединены последовательно-встречно. Обмотка возбуждения питается от источника переменного тока. На внутреннем статоре расположены экраны 4, соединенные между собой механически жестко. Внутренний статор имеет стержень 5, на котором расположена сигнальная обмотка 6 датчика. В начале координат 0—0 экраны пересекаются двумя встречно направленными магнитными потоками и через стержень внутреннего статора магнитный поток не проходит, так как результирующая э. д. с. каждого экрана равна нулю и влияние экранов на перераспределение магнитных потоков отсутствует. Поэтому э. д. с. сигнальной обмотки при расположении экранов в начале координат 0—0 будет равна нулю. При повороте экранов на угол α (см. рис. 2) в них появляются результирующие э. д. с. Токи в экранах, вызванные этими э. д. с., создают потоки, которые в основном замыкаются через стержень внутреннего статора и наводят э. д. с. в сигнальной обмотке. Эти потоки размагничивают одну из половин статоров, а другую — намагничивают. Таким образом, при повороте экранов стержень

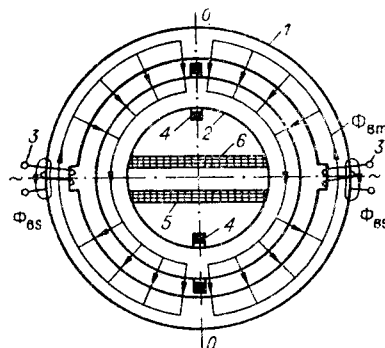


Рис. 1.

внутреннего статора играет роль диагонали моста и через него проходит магнитный поток, величина и фаза которого зависят от направления перемещения и положения экранов.

Э. д. с. на выходе сигнальной обмотки определяется как

$$\dot{E}_c = -j \omega \omega_c (2 \Phi_{\text{э.с}}) = -j 2 \omega M_{\text{э.с}} \dot{I}_\text{э}, \quad (1)$$

где ω_c — число витков сигнальной обмотки; $\Phi_{\text{э.с}}$ — поток экрана в стержне внутреннего статора; $\dot{I}_\text{э}$ — ток экрана; $M_{\text{э.с}}$ — взаимоиндуктивность между экраном и сигнальной обмоткой. Обмотка возбуждения может быть подключена к источнику стабилизированного тока ($I_\text{в} = \text{const}$) или к источнику стабилизированного напряжения ($U_\text{в} = \text{const}$). В режиме тока, согласно второму закону Кирхгофа, ток экрана определяется из следующего выражения:

$$\dot{I}_\text{э} = -j \dot{I}_\text{в} \frac{\omega M_{\text{в.э}}}{\dot{Z}_\text{э}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{в.э}}$ — взаимоиндуктивность между обмоткой возбуждения и экраном; $\dot{Z}_\text{э} = R_\text{э} + j x_\text{э}$ — полное комплексное электрическое сопротивление экрана, учитывающее его активное сопротивление $R_\text{э}$ и полное индуктивное сопротивление $x_\text{э}$.

Подставив (2) в (1), для выходной э. д. с. датчика получим

$$\dot{E}_c = -\dot{I}_\text{в} \frac{2 \omega^2 M_{\text{в.э}} M_{\text{э.с}}}{R_\text{э} + j x_\text{э}}. \quad (3)$$

В режиме напряжения ток экрана определяется выражением

$$\dot{I}_\text{э} = \frac{-j \omega M_{\text{в.э}} \dot{U}_\text{в}}{\dot{Z}_{\text{в.о}} \dot{Z}_\text{э} + \omega^2 M^2} = -j \dot{I}_{\text{в.о}} \frac{\omega M_{\text{в.э}}}{\dot{Z}_\text{э} + \frac{\omega^2 M_{\text{в.э}}^2}{\dot{Z}_{\text{в.о}}}}, \quad (4)$$

где $\dot{Z}_{\text{в.о}} = R_{\text{в.о}} + j x_{\text{в.о}}$ — комплексное электрическое сопротивление обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке экрана; $\dot{I}_{\text{в.о}} = \frac{\dot{U}_\text{в}}{\dot{Z}_{\text{в.о}}}$ — ток возбуждения при разомкнутых обмотках экранов. Тогда для выходной э. д. с. в режиме напряжения получим

$$\dot{E}_c = -\dot{U}_\text{в} \frac{2 \omega^2 M_{\text{э.с}} M_{\text{в.э}} \frac{1}{R_{\text{в.о}} + j x_{\text{в.о}}}}{R_\text{э} + R_{\text{в.о}} \frac{\omega^2 M_{\text{в.э}}^2}{R_{\text{в.о}}^2 + x_{\text{в.о}}^2} + j \left(x_\text{э} - x_{\text{в.о}} \frac{\omega^2 M_{\text{в.э}}^2}{R_{\text{в.о}}^2 + x_{\text{в.о}}^2} \right)}, \quad (5)$$

или

$$\dot{E}_c = -\dot{I}_{\text{в.о}} \frac{2 \omega^2 M_{\text{э.с}} M_{\text{в.э}}}{R_\text{э} + R_{\text{в.о}} \frac{\omega^2 M_{\text{в.э}}^2}{R_{\text{в.о}}^2 + x_{\text{в.о}}^2} + j \left(x_\text{э} - x_{\text{в.о}} \frac{\omega^2 M_{\text{в.э}}^2}{R_{\text{в.о}}^2 + x_{\text{в.о}}^2} \right)}. \quad (6)$$

Обычно активное сопротивление экрана значительно меньше его индуктивного сопротивления. Поэтому если в режиме тока за стабилизированный ток принять ток $\dot{I}_{\text{в.о}}$ (что часто имеет место в практике), то, согласно (3) и (6), можно прийти к выводу, что в режиме напряжения чувствительность рассматриваемого датчика больше, чем в режиме тока.

Из полученных выражений (3), (5) и (6) видно, что расчет выходной э. д. с. датчика сводится к определению индуктивностей обмоток. А расчет последних связан с определением закона распределения магнитодвижущей силы (м. д. с.) и потоков вдоль окружностей статоров, так как магнитная проводимость воздушного зазора распределена вдоль окружностей статоров. Вследствие непрерывного ответвления магнитного потока через воздушный зазор и наличия комплексного магнитного сопротивления стали происходит изменение как модуля, так и аргумента комплексного значения индукции в самих статорах вдоль их окружностей. Кроме того, все электрические и магнитные параметры системы с изменением положений экранов будут изменяться. Поэтому точный расчет закона распределения м. д. с. и потоков при наличии комплексного магнитного сопротивления стали и подвижных электромагнитных экранов весьма сложен.

В целях упрощения решения задачи и получения инженерных результатов для оценки исследуемых параметров целесообразно сделать следующие допущения и ограничения: удельная магнитная проводимость рабочего воздушного зазора g между концентрическими поверхностями статоров принята постоянной; удельные \dot{Z}'_{μ} и полные магнитные сопротивления стали \dot{Z}'_{σ} статоров, приходящиеся на единицу длины дуги статоров, в пределах длины рабочего поля остаются неизменными; магнитная цепь работает на линейном участке кривой намагничивания; электрические и магнитные величины изменяются по синусоидальному закону; витки обмотки возбуждения и экрана приняты сосредоточенными.

С целью определения индуктивностей $M_{\text{н.э}}$ и $L_{\text{в}}$ вначале определим законы распределения м. д. с. и потоков в статорах при разомкнутых обмотках экранов. При разомкнутых обмотках экранов (или при их расположении в начале координат $0-0$) магнитный поток возбуждения не проходит через стержень внутреннего статора и в сечениях статоров, соответствующих координатам $\alpha_1=0$ и $\alpha_2=0$, магнитный поток равен нулю (рис. 2). Магнитная цепь относительно оси $0-0$ симметрична; рассматривая одну из половин магнитопровода как двухпроводную магнитную линию и воспользовавшись основными уравнениями магнитных цепей с распределенными параметрами [1, 4—6], для зоны рабочего потока можно записать:

$$d\dot{\Phi}_{\text{вз}} = \dot{F}_{\text{вз}} g d\alpha; \quad (7)$$

$$d\dot{F}_{\text{вз}} = \dot{\Phi}_{\text{вз}} \dot{Z}'_{\mu} d\alpha; \quad (8)$$

$$d^2\dot{\Phi}_{\text{вз}} = \dot{F}_{\text{вз}} \dot{Z}'_{\mu} g d\alpha^2; \quad (9)$$

$$d^2\dot{F}_{\text{вз}} = \dot{\Phi}_{\text{вз}} \dot{Z}'_{\mu} g d\alpha^2, \quad (10)$$

где $\dot{F}_{\text{вз}}$ и $\dot{\Phi}_{\text{вз}}$ — разность магнитных потенциалов между статорами и поток в статорах для координаты α . Из (7) — (10) получим:

$$\dot{\Phi}_{\text{вз}} = A_1 e^{-\dot{p}\alpha} + A_2 e^{-\dot{p}\alpha}; \quad (11)$$

$$\dot{F}_{\text{вз}} = \frac{\dot{p}}{g} (A_1 e^{\dot{p}\alpha} - A_2 e^{-\dot{p}\alpha}), \quad (12)$$

где A_1 и A_2 — постоянные интегрирования; $\dot{p} = \sqrt{\dot{Z}'_{\mu} g}$ — комплексная величина. Постоянные интегрирования определяем из краевых условий:

$$\dot{\Phi}_{\text{вз}} = 0; \quad \alpha = 0; \quad (13)$$

$$\dot{F}_{\text{вз}} = 2\dot{F}_{\text{вз}\alpha\text{м}}; \quad \alpha = \alpha_{\text{м}}. \quad (14)$$

Решая совместно (11) — (14), получим

$$A_1 = -A_2 = \frac{\dot{F}_B g}{4p \operatorname{ch} p \alpha_M}$$

Подставляя значения коэффициентов в (11) и (12), имеем:

$$\dot{\Phi}_{B\alpha} = \dot{F}_B \frac{g \operatorname{sh} p \alpha}{2p \operatorname{ch} p \alpha_M}; \quad \dot{F}_{B\alpha} = \dot{F}_B \frac{\operatorname{ch} p \alpha}{2 \operatorname{ch} p \alpha_M} \quad (15)$$

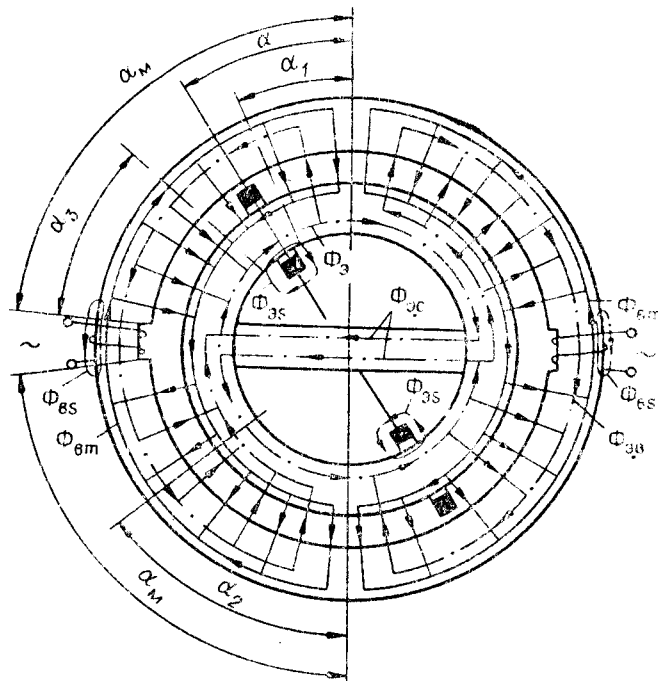


Рис. 2.

Принимая в (15) $\alpha = \alpha_M$, с учетом рассеяния определяем полный магнитный поток, создаваемый каждой секцией обмотки возбуждения:

$$\dot{\Phi}_{B.0} = \dot{\Phi}_{B\alpha} + \dot{\Phi}_{B\alpha M} = \dot{F}_B \left(G_{B\alpha} + \frac{g}{2p} \operatorname{th} p \alpha_M \right),$$

где $G_{B\alpha}$ — магнитная проводимость на пути потока рассеяния секции
Тогда индуктивность каждой секции обмотки возбуждения и э. д. с. разомкнутого экрана будут равны:

$$L_{B.0} = L_{B\alpha} + \omega_B^2 \frac{g}{2p} \operatorname{th} p \alpha_M; \quad \dot{E}_{B.0} = -j \omega_B \omega_B \dot{F}_B \frac{g \operatorname{sh} p \alpha}{2p \operatorname{ch} p \alpha_M}$$

Отсюда взаимоиנדуктивность и м. д. с. экрана:

$$M_{B.0} = \omega_B \omega_B \frac{g \operatorname{sh} p \alpha}{2p \operatorname{ch} p \alpha_M}; \quad \dot{F}_0 = \frac{\dot{E}_{B.0} \omega_B}{Z_0} = -j \dot{F}_B \frac{\omega_B \omega_B^2 g \operatorname{sh} p \alpha}{2p Z_0 \operatorname{ch} p \alpha_M}$$

На рис. 2 штрих-пунктирными линиями показана схема распределения магнитного потока экрана. Полный поток, создаваемый обмоткой экрана, определяется

$$\dot{\Phi}_s = \dot{\Phi}_{ss} + \dot{\Phi}_{s.c} + \dot{\Phi}_{sm},$$

где $\dot{\Phi}_{ss}$ — поток рассеяния экрана; $\dot{\Phi}_{sm}$ — поток экрана, замыкающийся через внутренний и наружный статоры.

Поток экрана $\dot{\Phi}_{s.c}$ и выходная э. д. с. датчика равны:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{s.c} &= \frac{\dot{F}_s}{\dot{Z}_{\mu c}} = -j \dot{F}_s \frac{\omega L_{s.c} g \operatorname{sh} p \alpha}{2p \dot{Z}_s \operatorname{ch} p \alpha_m}; \\ E_c &= -j \dot{I}_B \frac{(\omega L_{s.c}) (\omega w_c w_B g \operatorname{sh} p \alpha)}{[R_s + j \omega (L_{ss} + L_{s.c} + L_{sm})] p \operatorname{ch} p \alpha_m}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\dot{Z}_{\mu c} = R_{\mu c} + \frac{1}{G_{\mu n}} + j X_{\mu c}$; $L_{s.c} = \frac{w_s^2}{\dot{Z}_{\mu c}}$. $R_{\mu c}$ и $X_{\mu c}$ определяют соответственно активное и реактивное магнитное сопротивление стали магнитопровода на пути потока $\dot{\Phi}_{s.c}$.

Обычно магнитная проводимость $G_{\mu n}$ паразитных зазоров между стержнем и внутренним статором значительно меньше, чем магнитная проводимость стали на пути потока $\dot{\Phi}_{s.c}$. В (16) индуктивность L_{sm} , соответствующая потоку $\dot{\Phi}_{sm}$, зависит от положения экрана, так как с поворотом экрана магнитная проводимость воздушного зазора по обе стороны от экрана изменяется.

Чтобы рассчитать индуктивность L_{sm} , определим законы распределения м. д. с. и потока экрана в статорах при разомкнутой обмотке возбуждения. Запишем решение дифференциальных уравнений м. д. с. и потоков по обе стороны экрана (см. рис. 2) в следующем виде:

$$\dot{\Phi}_{s\alpha_1} = \dot{A}_1 e^{p\alpha_1} + \dot{A}_2 e^{-p\alpha_1}; \quad (17)$$

$$\dot{F}_{s\alpha_1} = \frac{p}{g} (\dot{A}_1 e^{p\alpha_1} - \dot{A}_2 e^{-p\alpha_1}); \quad (18)$$

$$\dot{\Phi}_{s\alpha_2} = \dot{B}_1 e^{p\alpha_2} + \dot{B}_2 e^{-p\alpha_2}; \quad (19)$$

$$\dot{F}_{s\alpha_2} = \frac{p}{g} (\dot{B}_1 e^{p\alpha_2} - \dot{B}_2 e^{-p\alpha_2}), \quad (20)$$

где $\alpha_1 = 0 \div \alpha$; $\alpha_2 = 0 \div (2\alpha_m - \alpha)$. Постоянные интегрирования находим из следующих краевых условий:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{s\alpha_1} &= 0; \quad \alpha_1 = 0; \\ \dot{\Phi}_{s\alpha_2} &= 0, \quad \alpha_2 = 0; \\ \dot{\Phi}_{s\alpha_1} &= \dot{\Phi}_{s\alpha_2}; \quad \dot{F}_s = \dot{F}_{s\alpha_1} + \dot{F}_{s\alpha_2}; \\ \alpha_1 &= \alpha; \quad \alpha_2 = 2\alpha_m - \alpha. \end{aligned} \quad (21)$$

Решая систему уравнений, полученную путем подстановки в (17)–(20) значений потоков и м. д. с. из (21), определяем постоянные интегрирования:

$$\dot{A}_1 = -\dot{A}_2 = \dot{F}_s \frac{g \operatorname{sh} p \alpha}{2p \operatorname{sh} p 2\alpha_m}; \quad (22)$$

$$\dot{B}_1 = -\dot{B}_2 = \dot{F}_3 \frac{g \operatorname{sh} \dot{p} (2\alpha_m - \alpha)}{2\dot{p} \operatorname{sh} \dot{p} 2\alpha_m} \quad (23)$$

Подставляя значения постоянных из (22) и (23) в (17) и (19), получим законы распределения потоков экрана без учета $\dot{\Phi}_{э,с}$:

$$\dot{\Phi}_{э\alpha_1} = \dot{F}_3 \frac{g}{\dot{p}} \frac{\operatorname{sh} \dot{p} (2\alpha_m - \alpha) \operatorname{sh} \dot{p} \alpha_1}{\operatorname{sh} \dot{p} 2\alpha_m}; \quad (24)$$

$$\dot{\Phi}_{э\alpha_2} = \dot{F}_3 \frac{g}{\dot{p}} \frac{\operatorname{sh} \dot{p} \alpha \operatorname{sh} \dot{p} \alpha_2}{\operatorname{sh} \dot{p} 2\alpha_m}. \quad (25)$$

Полагая в (24) $\alpha_1 = \alpha$ или в (25) $\alpha_2 = 2\alpha_m - \alpha$, находим

$$\dot{\Phi}_{эm} = \dot{F}_3 \frac{g}{\dot{p}} \frac{\operatorname{sh} \dot{p} \alpha \operatorname{sh} \dot{p} (2\alpha_m - \alpha)}{\operatorname{sh} \dot{p} 2\alpha_m}.$$

Отсюда

$$L_{эm} = \omega_3 \frac{g \operatorname{sh} \dot{p} \alpha \operatorname{sh} \dot{p} (2\alpha_m - \alpha)}{\dot{p} \operatorname{sh} \dot{p} 2\alpha_m}. \quad (26)$$

Согласно (4) — (6), можно получить выражение для выходной э. д. с. датчика в режиме заданного напряжения. Из (16) и (26) видно, что зависимость $E_c = f(\alpha)$ датчика в общем случае имеет нелинейный характер. Но анализ (16) и (29) показывает, что при работе датчика на линейном участке кривой намагничивания стали датчик имеет практически линейную статическую характеристику.

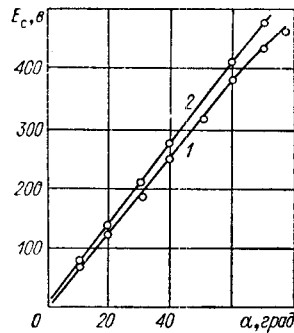


Рис. 3.

На рис. 3 приведены экспериментальная 1 и теоретическая 2 характеристики [последняя рассчитана по выражению (16)] датчика с двумя подвижными экранами, имеющего следующие технические данные: габариты $\varnothing 20 \times 160$ мм; $I_B = 0,485$ а; $\omega_B = 1200$; $\omega_c = 3000$; $\alpha_m = 78^\circ$. Расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем на 8%.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Зарипов. Преобразователи с распределенными параметрами. М., «Энергия», 1969.
2. Я. Р. Абдуллаев. Исследование магнитных систем с подвижными электромагнитными экранами. Реферат канд. дисс. М., МЭИ, 1969.
3. Б. К. Буль, Я. Р. Абдуллаев. Индукционный датчик. Авторское свидетельство № 222905.— ОИПОТЗ, 1968, № 23.
4. Я. Р. Абдуллаев. К расчету магнитной цепи с подвижным экраном.— За технический прогресс, 1969, № 9.
5. В. И. Коваленков. Основы теории магнитных цепей. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1940.
6. Б. К. Буль. Основы теории и расчета магнитных цепей. М., «Энергия», 1964.

Поступила в редакцию
19 декабря 1969 г.,
окончательный вариант —
30 апреля 1970 г.