

УДК 531.74.084.2

Т. М. АЛИЕВ, М. А. НАБИЕВ, А. А. ТЕР-ХАЧАТУРОВ

(Сумгаит)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СО СПЛОШНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Преобразователи угловых перемещений индуктивного типа находят широкое распространение в различных устройствах автоматики и сигнализации наряду с преобразователями других типов. В настоящее время индуктивные преобразователи выполняются из изолированных друг от друга листов электротехнической стали. Однако, как показывают исследования, преобразователи угловых перемещений из массивной конструкционной стали более технологичны в изготовлении и сборке и отличаются значительной простотой [1]. При этом известно [2], что по сравнению с преобразователями, магнитопроводы которых набраны из листовой электротехнической стали, преобразователи со сплошным магнитопроводом будут обладать меньшей чувствительностью и худшей линейностью вследствие влияния вихревых токов.

Авторами статьи разработаны вопросы теории преобразователей со сплошным магнитопроводом, что позволило установить ряд оптимальных соотношений для получения высокой чувствительности и линейности характеристики преобразования.

Один из разработанных преобразователей имеет конструкцию, представленную на рис. 1. Неподвижная часть преобразователя (статор) /

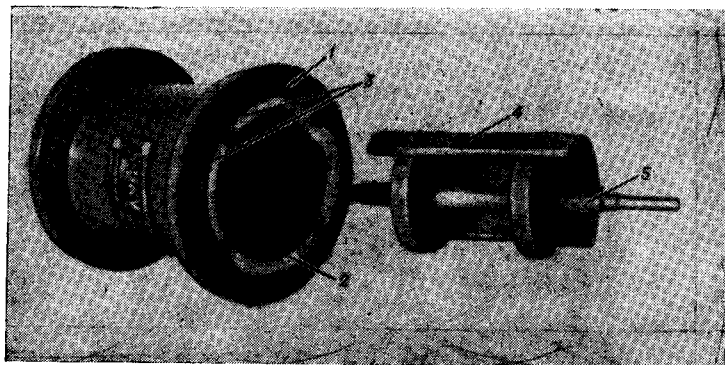


Рис. 1.

представляет собой пустотелый и тонкостенный цилиндр, вдоль тела которого имеются три паза, в которых уложена одна обмотка возбуждения 2 и две измерительные обмотки 3, включенные по дифференциальной схеме. Обмотка возбуждения уложена в двух диаметрально расположенных пазах, а лобовые части ее размещены в торцовых пазах статора. Измерительные обмотки расположены в пазах так, что их оси образуют угол, равный $\frac{\pi}{2}$. Подвижная часть (ротор) 4 описываемого преобразователя представляет собой половину тонкостенного пустотелого цилиндра, закрепленного на поворотной оси 5.

Работа преобразователя основана на следующем. При повороте подвижной части преобразователя на угол β изменяется потокосцепление встречно включенных измерительных обмоток, что приводит к изменению выходной э. д. с.

В исследуемом преобразователе аналитическое решение зависимости выходной э. д. с. от конструктивных параметров сводится к расчету переменного во времени магнитного поля в сплошных проводящих телах [3]. В реальных конструкциях преобразователей статор и ротор (в плоскости обмотки возбуждения, под которой понимается плоскость, проходящая вдоль активной длины обмотки) имеют практически одинаковую геометрию и в силу этого магнитные поля в них будут распределяться по одному и тому же закону.

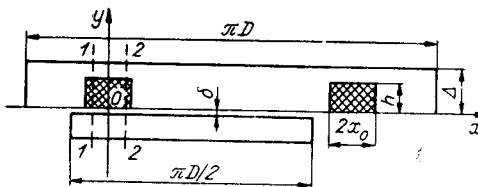


Рис. 2.

На рис. 2 представлен преобразователь в развернутом виде. Для удобства расчета принята прямоугольная система координат. В описываемом преобразователе ширина $2x_0$ и глубина h паза для обмотки, как правило, во много раз превосходят величину воздушного зазора δ между статором и ротором. Поэтому магнитным полем внутри паза, по сравнению с полем в теле статора и ротора, можно пренебречь. Отсюда следует, что в некоторой области статора и ротора, ограниченной плоскостями, следами которых являются прямые 1—1 и 2—2, будет иметь место практически плоскопараллельное магнитное поле. Следовательно, в указанной области магнитопровода напряженность поля H имеет лишь составляющую по оси x

$$\dot{H} = \dot{H}_x \quad (\text{при } -x_0 \leq x \leq x_0) \quad (1)$$

и не зависит от переменной x

$$\frac{\partial \dot{H}}{\partial x} = \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{при } -x_0 \leq x \leq x_0). \quad (2)$$

При определении переменного во времени поля в сплошном проводящем теле, каким является магнитопровод исследуемого преобразователя, исходим из основных уравнений Максвелла [3]. Решая их в принятой нами прямоугольной системе координат с учетом (1) и (2), для вектора напряженности поля в указанной выше области магнитопровода получим

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial z^2} = j \omega \gamma \dot{H}, \quad (3)$$

где ω — круговая частота питающего тока; γ — удельная электриче-

ская проводимость стали; μ — статическая магнитная проницаемость стали. Здесь координатная плоскость xoz проходит через средние точки воздушного зазора (см. рис. 2), поэтому начало координатной системы совмещено со средней точкой активной длины обмотки преобразователя.

Для решения (3) определим граничные условия, учитывая, что торцовые поверхности статора и ротора, а также наружная поверхность статора и внутренняя поверхность ротора магнитным потоком не пронизываются. Тогда граничными условиями для расчета поля в теле статора будут следующие:

$$H|_{z=\pm L} = \dot{H}_0 = \frac{i \omega_1}{2\delta} \frac{1}{\mu_e \frac{4\Delta}{\pi D} + \frac{\pi D}{8\delta}}; \quad (4)$$

$$\dot{H}|_{y=0} = \dot{H}_0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} \Big|_{y=\Delta} = 0. \quad (6)$$

В (4) — (6) приняты следующие обозначения: \dot{H}_0 — напряженность поля в точках торцовой поверхности преобразователя, где вихревые токи отсутствуют; $i \omega_1$ — магнитодвижущая сила обмотки возбуждения; Δ — толщина стенки статора; D — внутренний диаметр статора; $2L$ — полная длина статора; μ_e — относительная величина магнитной проницаемости стали, равная $\mu_e = \frac{\mu}{\mu_0}$, где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Решив уравнение (3) методом Фурье при найденных граничных условиях, будем иметь

$$\begin{aligned} \dot{H} = \dot{H}_0 \left\{ \frac{\operatorname{ch} a_1 z}{\operatorname{ch} a_1 L} + \frac{4a_1^2}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\cos \pi n \operatorname{ch} a_{2n} y}{a_{2n}^2 (1+2n) \operatorname{ch} \frac{1}{2} a_{2n} \Delta} \cos \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi (1+2n) z}{2L} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $a = \sqrt{j \omega \mu \gamma}$; n — ряд натурального числа; $a_{2n} = \sqrt{a_1^2 + \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 (1+2n)^2}$.

В силу того, что измерительные обмотки, включенные встречно, имеют одинаковое число витков, магнитный поток Φ_n , создающий э. д. с. на выходе измерительной обмотки, определяется из выражения

$$\Phi_n = -\mu \int_{-L}^L \int_0^y \dot{H} dy dz. \quad (8)$$

Подставив значение \dot{H} из (7) в (8), после почленного интегрирования ряда и других простых преобразований получим

$$\begin{aligned} \Phi_n = 4\mu_0 \dot{H}_0 \left\{ \frac{\operatorname{sh} a_1 y}{a_1 \operatorname{ch} a_1 \Delta} + \frac{8a_1^2}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\cos \pi n \operatorname{sh} a_{2n} L}{a_{2n}^2 (1+2n) \operatorname{ch} a_{2n} L} \sin \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi (1+2n)}{2\Delta} y \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что ряд, стоящий в правой части (7), является равномерно сходящимся, и в силу этого допустимо почленное его интегрирование.

Выражение (9) характеризует зависимость потока Φ_n от y . Связь между координатами точек плоскости yoz и xoz , через которые проходит одна и та же силовая линия, имеет вид

$$y = \frac{\Delta}{2} \left(1 - \frac{\beta}{\pi/2} \right), \quad (10)$$

где β — угол поворота ротора, отсчитываемый от плоскости обмотки возбуждения.

Если теперь принять за начало отсчета не плоскость обмотки возбуждения, а ее ось (линия, перпендикулярная плоскости обмотки), выражение (10) можно переписать в более простой форме

$$y = \Delta \frac{\beta}{\pi}. \quad (11)$$

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

$$\dot{E}_n = -j 8 \frac{H_0 \omega_2 \omega \mu L}{a_1 \operatorname{ch} \left(a_1 \frac{\Delta}{2} \right)} \operatorname{sh} \frac{a_1 \Delta \beta}{\pi}, \quad (12)$$

где ω_2 — число витков одной измерительной обмотки.

Модуль (величина) э.д.с. на выходе измерительной обмотки E_2 составляет

$$E_2 = \frac{I \omega_1 \omega_2 \omega \mu \pi D L \sqrt{\operatorname{ch} (a \beta_{\text{отн}}) - \cos (a \beta_{\text{отн}})}}{\left[\mu_e \Delta \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D}{4} \right)^2 \right] \sqrt{\omega \mu \gamma} \sqrt{\operatorname{ch} a + \cos a}}, \quad (13)$$

где $a = \frac{\Delta}{\sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}}$ — отношение толщины магнитопровода к глубине

проникновения электромагнитной волны; $\beta_{\text{отн}} = \frac{\beta}{\pi/2}$.

На рис. 3 приведены экспериментальная 1 и теоретическая 2 характеристики [рассчитаны по выражению (13)] преобразователя угловых перемещений со сплошным магнитопроводом, имеющего следующие технические данные: $I=0,1$ а; $\omega_1=500$; $\omega_2=800$; $D=55$ мм; $L=35$ мм; $\Delta=3,5$ мм; $\delta=1$ мм. При расчете величина магнитной проницаемости конструкционной стали μ_e принята равной 200, а частота питающего тока — 50 гц.

Как следует из рис. 3, погрешность расчета не превосходит величины 5%, что допустимо при определении переменного во времени магнитного поля в сплошных стальных телах.

Из (13) также видно, что характеристика преобразователя в общем случае имеет нелинейный вид. Однако ана-

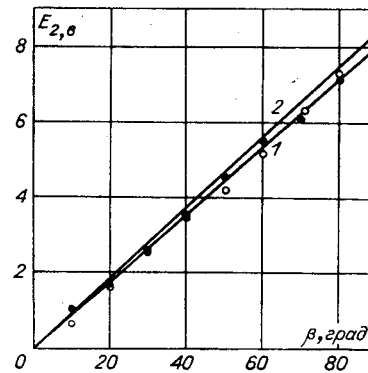


Рис. 3.

Из (13) показывает, что при достаточно малых значениях Δ будет иметь место практически линейная характеристика преобразования. Действительно, при малых значениях Δ параметр a также будет иметь малую величину, и, следовательно, можно принять:

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} a \beta_{\text{отн}} &\approx 1 + \frac{(a \beta_{\text{отн}})^2}{2!} + \frac{(a \beta_{\text{отн}})^4}{4!}; \\ \cos a \beta_{\text{отн}} &\approx 1 - \frac{(a \beta_{\text{отн}})^2}{2!} - \frac{(a \beta_{\text{отн}})^4}{4!}. \end{aligned} \quad (14)$$

Учитывая (14), для выходной величины э. д. с. [см. выражение (13)] можно написать $E_2 = k \beta_{\text{отн}}$, где через k обозначено произведение всех постоянных величин, не зависящих от угла поворота β .

Таким образом, путем изменения толщины магнитопровода можно обеспечить требуемую величину линейности характеристики преобразователя со сплошным магнитопроводом.

В заключение отметим, что предложенная методика расчета магнитной цепи может быть использована при проектировании преобразователей угловых перемещений с магнитопроводом из сплошной стали, а также при расчете магнитных цепей устройств с явно выраженным влиянием вихревых токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. М. Алиев, В. Я. Едуш, М. А. Набиев, А. А. Тер-Хачатуров. Телединамометрирование глубиннонасосных скважин. Баку, «Азернешр», 1963.
2. В. Я. Едуш, М. А. Набиев. К вопросу о расчете индуктивного преобразователя с подвижным короткозамкнутым витком.— Измерительная техника, 1962, № 8.
3. В. В. Никольский. Теория электромагнитного поля. М., «Высшая школа», 1961.

*Поступила в редакцию
23 января 1967 г.,
окончательный вариант —
1 августа 1967 г.*