

**МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ АКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ
ПОДВИЖНОГО СЕРДЕЧНИКА**

Мамадалиев Улугбек Шухратович

E-mail: mamadaliyev.u.sh@mail.ru

*Докторант кафедры «Электроснабжения», Ташкентский государственный
транспортный университет, г. Ташкент*

Аннотация. В статье магнитная цепь трансформаторного преобразователя угловых перемещений дифференциального типа с переменной активной площадью подвижного ферромагнитного кольца рассмотрена как магнитная цепь с распределенными параметрами, в которой толщина подвижного ферромагнитного кольца является линейной функцией углового перемещения преобразователя. Показано, что хотя в магнитных цепях со специальной структурой распределения магнитных параметров сопротивления ферромагнитных колец и магнитной проводимости рабочего зазора между кольцами создаются одинаковые условия для прохождения силовых линий рабочего магнитного поля по стали на протяжении всей длины воздушного зазора, из-за распределенного характера магнитных параметров имеет место нелинейность распределения рабочего магнитного потока и, следовательно, нелинейность статической характеристики преобразователя, и степень их нелинейности тем больше, чем больше величина коэффициента затухания магнитного поля в магнитной цепи.

Показано, что благодаря выполнению толщины обеих колец уменьшающиеся начиная от их точек, соединенных с перемычкой, до диаметрально противоположной точке кольца по линейному закону, в кольцах создаются рабочие магнитные потоки, распределенные по углу этих колец строго по линейному закону, вследствие чего достигается линейность

статической характеристики предлагаемого преобразователя угловых перемещений.

Ключевые слова: *дифференциальный трансформаторный преобразователь, угловое перемещение, ферромагнитное замкнутое кольцо, магнитная цепь, распределенный параметр, погонное магнитное сопротивление, погонная магнитная емкость, магнитный поток, магнитное напряжение, линейность потокораспределения.*

Вступление. В автоматических системах контроля и управления различными технологическими и производственными процессами для получения достоверной информации об угловых перемещениях контролируемых объектов широко используются преобразователи электромагнитного принципа действия, в частности, трансформаторные преобразователи [1,2]. Они по сравнению с другими типами преобразователей угловых перемещений имеют высокую надежность и стабильные метрологические характеристики в экстремальных условиях эксплуатации [3-8]. Вместе с тем они имеют нелинейную статическую характеристику [5]. Причиной этому, в основном, является нелинейное распределение рабочего магнитного потока по рабочему диапазону перемещения подвижной части преобразователей угловых перемещений [9].

С целью определения закона распределения рабочего магнитного потока по рабочему диапазону перемещения подвижной части и оценки степени ее нелинейности теоретически исследуем известную трансформаторную преобразователь угловых перемещений (ТПУП) (рис.1) [10].

ТПУП содержит подвижный магнитопровод в виде двух соосных ферромагнитных колец 1 и 2, Z-образную перемычку 3, соединяющую противоположные точки колец 1 и 2, лежащие в диаметральной плоскости, обмотку возбуждения 4, свободно расположенную на перемычке, и измерительные обмотки, расположенные соответственно на кольцах 1 и 2,

соединенные последовательно-согласно и выполненные сосредоточенными и подвижными относительно колец.

ТПУП работает следующим образом. При запитывании обмотки возбуждения 4 переменным, в частности, синусоидальным током в зазоре между кольцами 1 и 2 создается близкое к равномерному, магнитное поле, а в каждом из колец 1 и 2 магнитная индукция распределена близкое по линейному закону. В результате этого в измерительных обмотках 5 и 6 наводятся ЭДС, величина и фаза которых зависят от от положения подвижного магнитопровода. Магнитная цепь известного преобразователя симметрична относительно вертикальной диаметральной плоскости. Поэтому достаточно произвести расчет для одной половины цепи (рис.1).

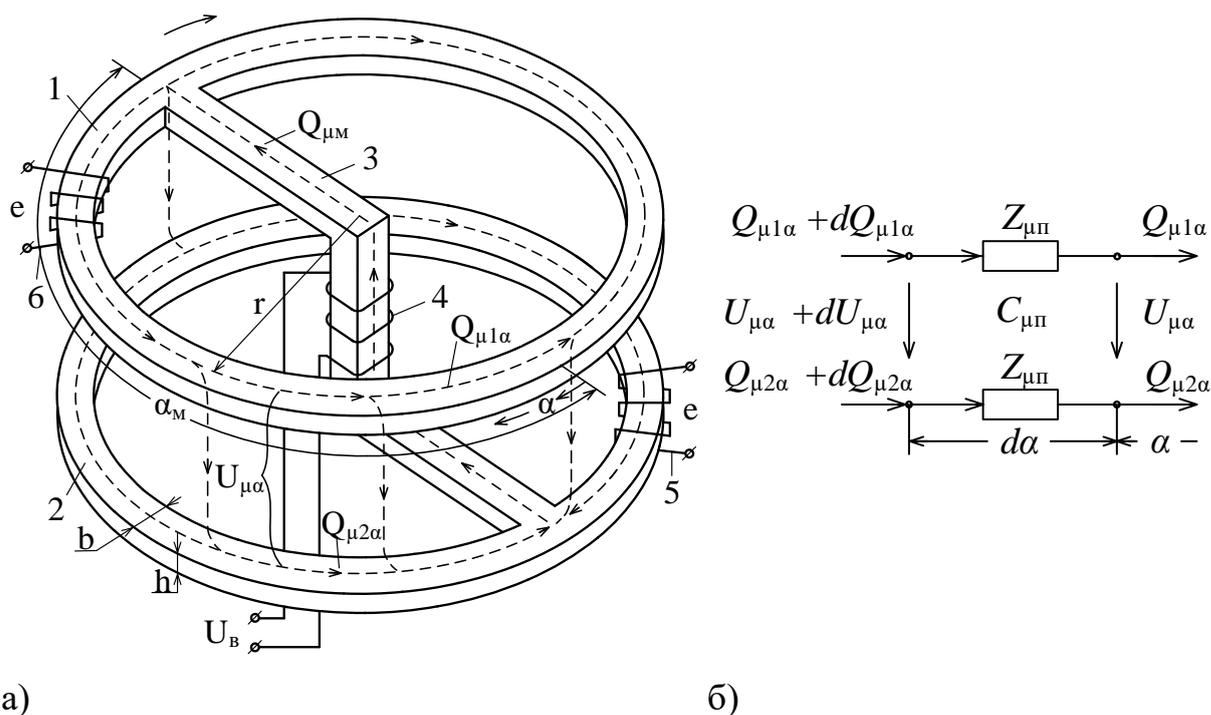


Рис.1. Конструктивная схема (а) магнитной цепи и схема замещения элементарного участка $d\alpha$ (б) ее одной половины известного преобразователя угловых перемещений.

Следует отметить, что в отличие от магнитных цепей с П-образными магнитопроводами, где длина силовых линий магнитного поля по стали на протяжении всей длины рабочего зазора неодинакова, в рассматриваемой

магнитной цепи длина силовых линий магнитного поля по стали на протяжении всей длины рабочего зазора одинакова. По этой причине первые называются магнитные цепи с обычной структурой распределения параметров сопротивления и проводимости, а вторые - магнитные цепи со специальной структурой распределения параметров сопротивления и проводимости [5].

Магнитные цепи с распределенными параметрами всех датчиков относятся либо к первой, либо ко второй категориям магнитных цепей [4].

В расчетах магнитной цепи пренебрегается нелинейностью характеристик магнитного сопротивления стали, потоками выпучивания на концах магнитной цепи, в области секции измерительной обмотки и их продольными размерами. Эти допущения не вносят ощутимых неточностей, однако значительно упрощают расчет [3].

Для определения текущих значений магнитного напряжения $U_{\mu\alpha}$ и магнитного потока $Q_{\mu\alpha}$, созданных вдоль магнитной цепи обмоткой возбуждения начало координаты α рассматриваемых сечений колец 1 и 2 магнитопровода показано на рис.1. Цифра в индексах величин и параметров означает, что они относятся к соответствующему кольцу магнитопровода.

Изменения магнитного потока и магнитного напряжения на элементарном участке магнитной цепи $d\alpha$ (рис.1, б), создаваемой током обмотки возбуждения, находятся составлением следующих дифференциальных уравнений на основании законов Кирхгофа [5]:

$$Q'_{\mu 1\alpha} = U_{\mu\alpha} C_{\mu\pi}, \quad (1) \qquad Q'_{\mu 2\alpha} = -U_{\mu\alpha} C_{\mu\pi}, \quad (2)$$

$$U'_{\mu\alpha} = Z_{\mu\pi} (Q_{\mu 1\alpha} - Q_{\mu 2\alpha}), \quad (3)$$

где $Z_{\mu 1\pi} = Z_{\mu 2\pi} = Z_{\mu\pi} = \frac{\pi r}{\mu \mu_0 b h \alpha_m}$, $C_{\mu\pi} = \mu_0 \frac{b \cdot \pi r}{\delta \alpha_m}$ - погонные значения магнитных сопротивлений колец магнитопровода и магнитной проводимости рабочего зазора δ между ними, приходящиеся на единицу угла магнитной цепи; μ , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ - соответственно относительная магнитная проницаемость стали и магнитная постоянная; r , h - соответственно средний радиус и толщина колец; α_m - максимальное значение координаты α .

Для рассматриваемой магнитной цепи справедливо следующее равенство [5]:

$$Q_{\mu 1\alpha} + Q_{\mu 1\alpha} = Q_{\mu m}, \quad (4)$$

здесь $Q_{\mu m}$ – максимальное значение магнитного потока, создаваемого током обмотки возбуждения в одно

й половине магнитопровода.

Дифференцируя (3) и вставляя в нее (1) и (2), получим следующее однородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$U''_{\mu\alpha} = 2Z_{\mu\pi} C_{\mu\pi} U_{\mu\alpha}. \quad (5)$$

Общее решение дифференциального уравнения (5) имеет следующий вид [11]:

$$U_{\mu x} = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}, \quad (6)$$

где $\gamma = \sqrt{2Z_{\mu\pi} C_{\mu\pi}}$ – значение коэффициента распространения магнитного потока по магнитной цепи, [1/degri]; A_1, A_2 – постоянные интегрирования.

Из (4) находим магнитный поток $Q_{\mu 2\alpha}$:

$$Q_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu m} - Q_{\mu 1\alpha}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), отсюда находим значение магнитного потока $Q_{\mu 1\alpha}$:

$$\begin{aligned} Q_{\mu 1\alpha} &= -\frac{1}{2Z_{\mu\pi}} U'_{\mu\alpha} + \frac{1}{2} Q_{\mu m} = \\ &= -\frac{\gamma}{2Z_{\mu\pi}} A_1 e^{\gamma\alpha} + \frac{\gamma}{Z_{\mu\pi}} A_2 e^{-\gamma\alpha} + \frac{1}{2} Q_{\mu m}. \quad (8) \end{aligned}$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяются при этом исходя из учета следующих граничных (краевых) условий:

$$Q_{\mu 1\alpha} \Big|_{\alpha=0} = 0; \quad Q_{\mu 1\alpha} \Big|_{\alpha=\alpha_m} = Q_{\mu m}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) граничные значения $Q_{\mu 1\alpha}$ по (8), получим следующие алгебраические уравнения:

$$-\frac{\gamma}{Z_{\mu\pi}} A_1 + \frac{\gamma}{Z_{\mu\pi}} A_2 = -\frac{1}{2} Q_{\mu m}, \quad (10)$$

$$-\frac{\gamma}{Z_{\mu\pi}} e^{\gamma X_M} A_1 + \frac{\gamma}{Z_{\mu\pi}} e^{-\gamma X_M} A_2 = \frac{1}{2} Q_{\mu M}. \quad (11)$$

Решая совместно уравнений (10) и (11), получим следующие значения постоянных интегрирования:

$$A_1 = -\frac{Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{2\gamma sh(\gamma\alpha_M)} e^{-\gamma\alpha_M} - \frac{Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{2\gamma sh(\gamma\alpha_M)}, \quad (12)$$

$$A_2 = -\frac{Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{2\gamma sh(\gamma\alpha_M)} e^{\gamma\alpha_M} - \frac{Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{2\gamma sh(\gamma\alpha_M)}. \quad (13)$$

Подставляя найденные значения A_1 и A_2 в выражения (6), (8) и воспользовавшись соответствующими тождествами гиперболических функций [11], окончательно имеем следующее:

$$\begin{aligned} U_{\mu\alpha} &= -\frac{Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{\gamma sh(\gamma\alpha_M)} \{ch[\gamma(\alpha_M - \alpha)] + ch(\gamma\alpha)\} = \\ &= -\frac{2Z_{\mu\pi} Q_{\mu M}}{\gamma sh(\gamma\alpha_M)} ch(0,5\gamma\alpha_M) ch[\gamma(0,5\alpha_M - \alpha)], \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\mu 1\alpha} &= \frac{Q_{\mu M}}{2} - \frac{Q_{\mu M}}{2sh(\gamma\alpha_M)} \{sh[\gamma(\alpha_M - \alpha)] - sh(\gamma\alpha)\} = \\ &= \frac{Q_{\mu M}}{2} - \frac{Q_{\mu M} ch(0,5\gamma\alpha_M)}{sh(\gamma\alpha_M)} sh[\gamma(0,5\alpha_M - \alpha)]. \quad (15) \end{aligned}$$

Значение магнитного потока $Q_{\mu 2\alpha}$ находится с помощью уравнения (7) и равно:

$$Q_{\mu 2\alpha} = \frac{Q_{\mu M}}{2} + \frac{Q_{\mu M} ch(0,5\gamma\alpha_M)}{sh(\gamma\alpha_M)} sh[\gamma(0,5\alpha_M - \alpha)]. \quad (16)$$

Наличие в выражениях (15) и (16) гиперболических функций уже означает, что зависимость $Q_{\mu 1\alpha} = f(\alpha)$ имеет нелинейный характер.

С целью построения графиков функции $Q_{\mu\alpha} = f(\alpha)$ и $U_{\mu\alpha} = f(\alpha)$, для удобства анализа, переходим в относительных единицах:

$$Q_{\mu 1\alpha^*}^* = \frac{Q_{\mu 1\alpha^*}}{Q_{\mu 1\alpha^*=1}} = \frac{1}{2} - \frac{ch(0,5\beta)}{sh\beta} sh[\beta(0,5 - \alpha^*)], \quad (17)$$

$$Q_{\mu 2\alpha^*}^* = \frac{Q_{\mu 2\alpha^*}}{Q_{\mu 2\alpha^*=0}} = \frac{1}{2} + \frac{ch(0,5\beta)}{sh\beta} sh[\beta(0,5 - \alpha^*)], \quad (18)$$

$$U_{\mu\alpha^*}^* = \frac{U_{\mu\alpha^*}}{U_{\mu\alpha^*=0}} = \frac{U_{\mu\alpha^*}}{U_{\mu\alpha^*=1}} = \frac{ch[\beta(0,5 - \alpha^*)]}{ch(0,5\beta)}, \quad (19)$$

здесь $\beta = \gamma\alpha_M$, $[-]$ - коэффициент затухания магнитного поля в

магнитной цепи; $\alpha^* = \alpha/\alpha_M$ – значение координаты в относительных единицах.

Графики функций $Q_{\mu\alpha}^* = f(\alpha^*)$ и $U_{\mu\alpha}^* = f(\alpha^*)$ построены при различных значениях β (рис.2).

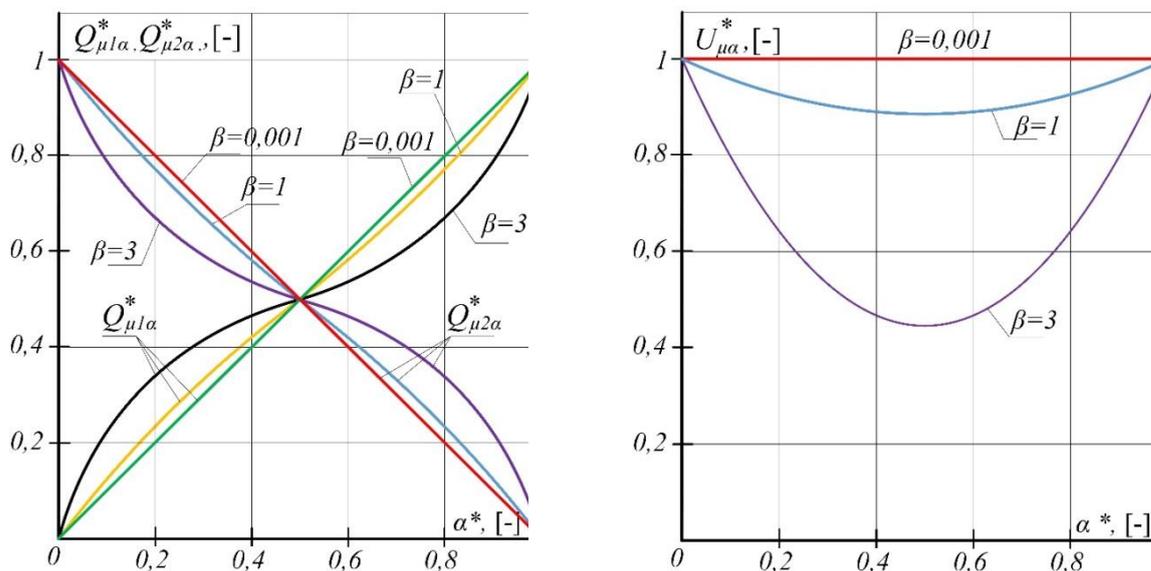


Рис.2. Графики зависимости рабочих магнитных потоков $Q_{\mu 1\alpha}^*$, $Q_{\mu 2\alpha}^*$ и магнитного напряжения $U_{\mu\alpha}^*$ от координаты подвижной части α при разных значениях коэффициент затухания магнитного поля в магнитной цепи β .

Анализ полученных выражений (17)-(19) и их графиков показывает, что рабочие магнитные потоки $Q_{\mu 1\alpha}$ и $Q_{\mu 2\alpha}$ распределены по координате подвижной части преобразователя по нелинейному закону, магнитная индукция (она определяется как $B_{\delta\alpha} = \mu_0 \frac{U_{\mu\alpha}}{\delta}$) в зазоре между кольцами по координате α неравномерна: в начале и конце магнитной цепи значение индукции максимальное, а в середине цепи минимальное. Кроме того, магнитные индукции в сечениях колец, определяемые как $B_{1\alpha} = Q_{\mu 1\alpha} \cdot S_{\mu k} = Q_{\mu 1\alpha} \cdot bh$ и $B_{2\alpha} = Q_{\mu 2\alpha} \cdot S_{\mu k} = Q_{\mu 2\alpha} \cdot bh$, также являются функциями координаты α . Это означает, что с изменением индукции в сечениях колец изменяется магнитное сопротивление колец. Это обстоятельства также влияет на распределение рабочих магнитных потоков по координате α . С увеличением значения коэффициент затухания магнитного поля в магнитной

цепи β степень нелинейности распределения рабочих магнитных потоков в соответствующих кольцах и степень неравномерности магнитной индукции в зазоре между кольцами возрастает.

Оценим степень нелинейности распределения магнитного потока $Q_{\mu 1 \alpha^*}^*$ в диапазоне перемещения подвижной части преобразователя по следующей формуле [3]:

$$\varepsilon = \frac{[Q_{\mu 1 \alpha}^*(\alpha_1^*) - Q_{\mu 1 \alpha \max}^* \alpha_1^*] + [Q_{\mu 1 \alpha \max}^* \alpha_2^* - Q_{\mu 1 \alpha}^*(\alpha_2^*)]}{2} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

здесь $Q_{\mu 1 \alpha^*=1}^* = 1$.

В выражении (20) величины α_1^* , α_2^* находятся как корни уравнения

$$[Q_{\mu 1 \alpha^*}^*(\alpha^*)]' = \frac{Q_{\mu 1 \alpha^*=1}^*}{\alpha^*=1} = 1, \quad (21)$$

соответствующие максимальным значениям положительной и отрицательной разности $Q_{\mu 3 x}^*(x_k^*) - Q_{\mu 3 x \max}^* x_k^*$, где $k = 1, 2$.

Решением уравнения (21) является:

$$\alpha_1^* = \frac{1}{2} - \frac{1}{\beta} \operatorname{arch} \frac{\operatorname{sh} \beta}{\beta \operatorname{ch}(0,5 \beta)}. \quad (22)$$

Согласно методики определения степени нелинейности характеристик [3], в случае, если корень уравнения (21) только один, то α_2^* в выражении (20) приравняется нулю.

Подставляя (21), (22) и $\alpha_2^* = 0$ в (20), получим следующее выражение для степени нелинейности распределения магнитного потока $Q_{\mu 1 \alpha^*}^*$:

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{\beta} \operatorname{arch} \frac{\operatorname{sh} \beta}{\beta \operatorname{ch}(0,5 \beta)} - \frac{\operatorname{ch}(0,5 \beta)}{\operatorname{sh} \beta} \operatorname{sh} \left[\operatorname{arch} \frac{\operatorname{sh} \beta}{\beta \operatorname{ch}(0,5 \beta)} \right] \right\} \cdot 50 \%. \quad (23)$$

При $\beta = 0$; $\beta = 0,91$ ($\pi r = 0,1 \text{ m}$; $h = 0,005 \text{ m}$; $\delta = 0,01 \text{ m}$ и $\mu = 1000$); $\beta = 3$ значения степени нелинейности распределения магнитного потока будут соответственно равны: $\varepsilon = 0$; $\varepsilon = 2,33 \%$; $\varepsilon = 4,73 \%$.

Неравномерность распределения магнитной индукции в зазоре между кольцами магнитопровода по диапазону перемещения подвижной части преобразователя можно показать, определив значения магнитных потоков в кольцах и магнитного напряжения между кольцами по упрощенной схеме

замещения рассматриваемой магнитной цепи (рис.3). В этой схеме замещения магнитное сопротивление каждого кольца магнитопровода представлены в виде четырех сосредоточенных сопротивлений, магнитное сопротивление воздушного зазора – пяти сосредоточенных сопротивлений. На рис.4 приведены результаты расчета упрощенной схемы замещения рассматриваемой магнитной цепи, составленная на основе программы «Electronics Workbench» [12]. Анализ измеренных значений падения напряжений на параллельных ветвях показывает, что значения этих напряжений по мере удаления от торцевых частей цепи уменьшаются.

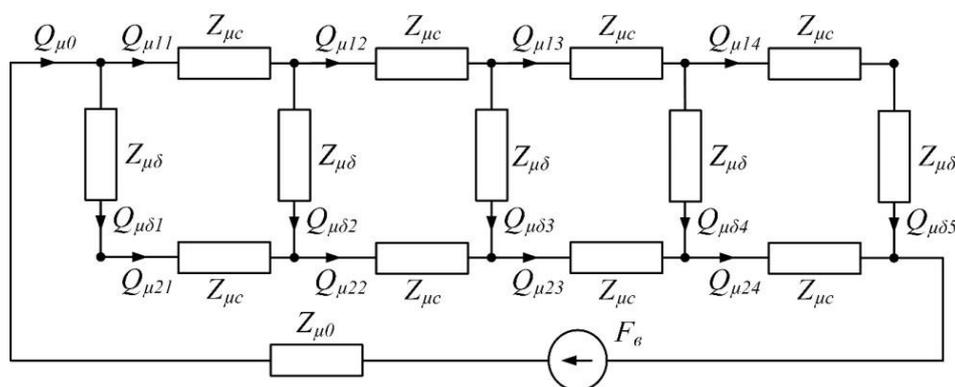


Рис.3. Упрощенная схема замещения рассматриваемой магнитной цепи.

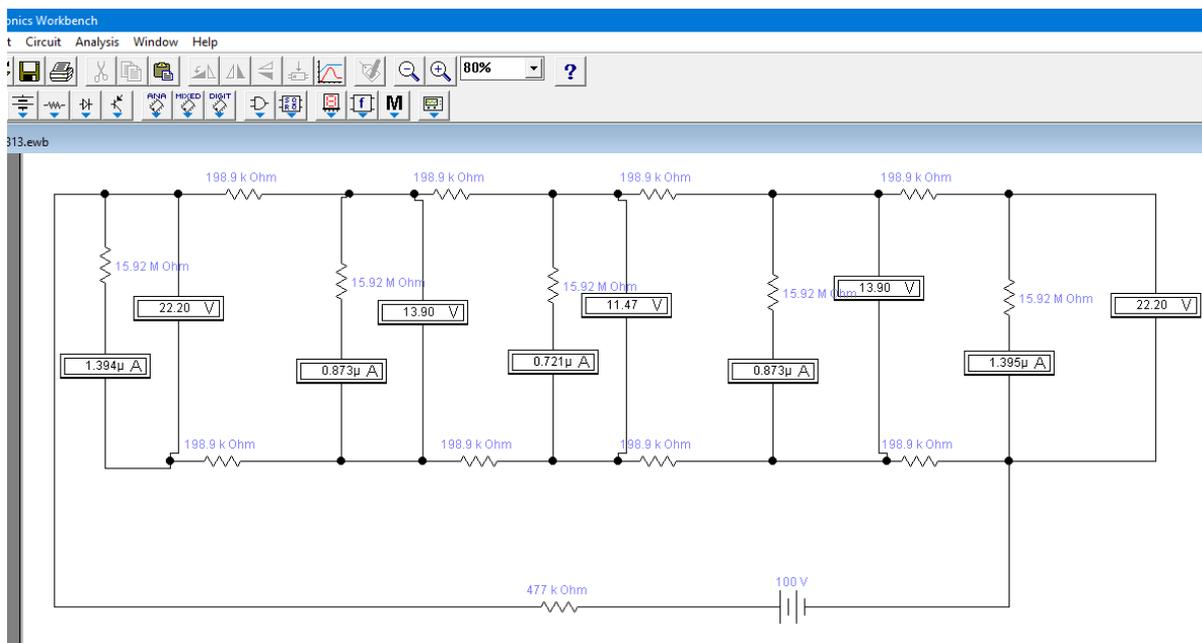


Рис.4. Упрощенная схема замещения рассматриваемой магнитной цепи, составленная на основе программы «Electronics Workbench».

Таким образом, хотя в конструкции известного преобразователя

(прототипа) создаются одинаковые условия для прохождения силовых линий магнитного поля по стали на протяжении всей длины рабочего зазора, из-за распределенного характера магнитных параметров сопротивления колец магнитопровода и магнитной проводимости воздушного зазора между ними имеет место нелинейность распределения рабочего магнитного потока и, следовательно, нелинейность статической характеристики преобразователя, и степень их нелинейности тем больше, чем больше величина коэффициента затухания магнитного поля в магнитной цепи (β).

На кафедре «Электроснабжение» Ташкентского государственного транспортного университета разработан новый дифференциальный трансформаторный преобразователь угловых перемещений (ДТПУП) с переменной активной площадью подвижного сердечника [13,14].

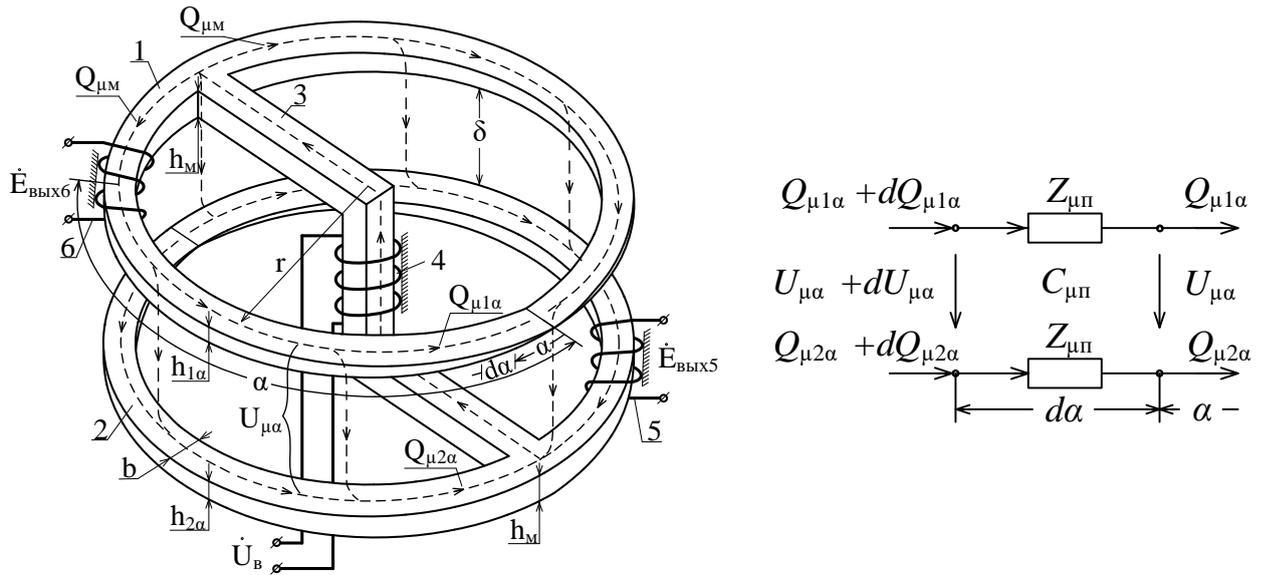
Конструктивная схема магнитной цепи предлагаемого ТПУП с соответствующими обозначениями приведена на рис.5.

Для того, чтобы в ТПУП, подвижный магнитопровод которого выполнен в виде двух соосных замкнутых колец, относительно которых перемещаются измерительные обмотки, обладали линейную статическую характеристику, требуется линейное распределение рабочего магнитного потока в диапазоне перемещения этой измерительной обмотки.

В предлагаемом преобразователе это достигнуто подбором закона изменения толщину колец по угловой координате. Чтобы определить требуемого закона составим и решим дифференциальные уравнения для элементарного участка $d\alpha$ магнитной цепи, считая при этом погонное значение магнитного сопротивления колец по угловой координате α переменное, т.е. $Z_{\mu\alpha} = var$.

Конструктивная схема предлагаемого ТПУП с соответствующими обозначениями и схема замещения элементарного участка $d\alpha$ его магнитной цепи приведена на рис.5, а и б.

Здесь принимаются те же допущения, что при расчете магнитной цепи прототипа.



а) б)

Рис.5. Конструктивная схема магнитной цепи (а) и схема замещения ее элементарного участка da (б) ее одной половины предлагаемого трансформаторного датчика больших линейных перемещений.

Изменения магнитного потока и магнитного напряжения на элементарном участке магнитной цепи dx (рис.6, б), создаваемой одной секцией обмотки возбуждения, находятся составлением следующих дифференциальных уравнений на основании законов Кирхгофа [15,16]:

$$Q'_{\mu 1\alpha} = U_{\mu\alpha} C_{\mu\pi}, \quad (24)$$

$$Q'_{\mu 2\alpha} = -U_{\mu\alpha} C_{\mu\pi}, \quad (25)$$

$$U'_{\mu\alpha} = (Z_{\mu 1\pi\alpha} Q_{\mu 1\alpha} - Z_{\mu 2\pi\alpha} Q_{\mu 2\alpha}). \quad (26)$$

Условием линейности распределения рабочего магнитного потока $Q_{\mu 1\alpha} = k\alpha + b$ по координате α является равенство нулю второй производной от этой функции по α , т.е. $Q''_{\mu 1\alpha} = 0$, (27).

Дифференцируя уравнение (24) и подставляя в нее (26) с учетом (4) и (27), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$Q''_{\mu 1\alpha} = [Z_{\mu 1\pi\alpha} + Z_{\mu 2\pi\alpha}] C_{\mu\pi} Q_{\mu 1\alpha} - Z_{\mu 2\pi\alpha} C_{\mu\pi} Q_{\mu\pi} = 0. \quad (28)$$

Оттуда:

$$Q_{\mu 1\alpha} = \frac{Z_{\mu 2\pi\alpha}}{Z_{\mu 1\pi\alpha} + Z_{\mu 2\pi\alpha}} \cdot Q_{\mu\pi}. \quad (29)$$

Если учесть, что $Z_{\mu 1\pi\alpha} = \frac{1}{\mu\mu_0 b h_{1\alpha}}$ и $Z_{\mu 2\pi\alpha} = \frac{1}{\mu\mu_0 b h_{2\alpha}}$, уравнение (29)

принимает следующий вид:

$$Q_{\mu 1\alpha} = \frac{h_{1\alpha}}{h_{1\alpha} + h_{2\alpha}} \cdot Q_{\mu M}. \quad (30)$$

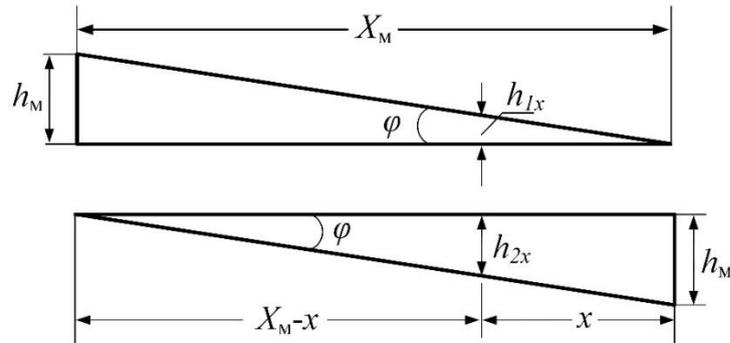


Рис.6. Чертеж для определения значений $h_{1\alpha}$ и $h_{2\alpha}$.

Анализ (30), показывает, что для обеспечения линейного распределения магнитного потока $Q_{\mu 1\alpha}$ по координате α требуется линейное изменение толщины колец по следующим законам:

$$h_{1\alpha} = k\alpha \text{ ва } h_{2\alpha} = k\alpha + b. \quad (31)$$

Для определения значения коэффициентов k и b обращаемся к рис.6. Из этих чертежей имеем следующее:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{h_{2\alpha}}{x} = \frac{h_M}{X_M}, \text{ отсюда } h_{2\alpha} = \frac{h_M}{X_M} x = \frac{h_M}{\alpha_M} \alpha, \quad (32)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{h_{1\alpha}}{X_M - x} = \frac{h_M}{X_M}, \text{ отсюда } h_{1\alpha} = h_M \left(1 - \frac{x}{X_M}\right) = h_M \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_M}\right), \quad (33)$$

здесь x , X_M – соответственно значение линейной координаты по окружности кольца и ее максимальное значение, соответствующие значениям угловой координате α и ее максимальному значению α_M .

Подставляя значения $h_{1\alpha}$ и $h_{2\alpha}$ из (32) и (33) в (30), получим следующее выражение для магнитного потока $Q_{\mu 1\alpha}$:

$$Q_{\mu 1\alpha} = \frac{Q_{\mu M}}{\alpha_M} \alpha. \quad (34)$$

Значение для магнитного потока $Q_{\mu 2\alpha}$ находится из (4) с учетом (34) как:

$$Q_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu M} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_M}\right). \quad (35)$$

Значения магнитных индукций в кольцах ($B_{\mu 1\alpha}$, $B_{\mu 2\alpha}$) и в воздушном

зазоре между кольцами ($B_{\mu\delta}$) определяются как:

$$B_{\mu1\alpha} = \frac{Q_{\mu1\alpha}}{S_{\mu1\alpha}} = \frac{Q_{\mu1\alpha}}{bh_{1\alpha}} = \frac{Q_{\mu M} \frac{Q_{\mu M}}{\alpha_M} \alpha}{bh_M \frac{Q_{\mu M}}{\alpha_M}} = \frac{Q_{\mu M}}{bh_M} = const. \quad (36)$$

$$B_{\mu2\alpha} = \frac{Q_{\mu2\alpha}}{S_{\mu2\alpha}} = \frac{Q_{\mu2\alpha}}{bh_{2\alpha}} = \frac{Q_{\mu M} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_M}\right)}{bh_M \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_M}\right)} = \frac{Q_{\mu M}}{bh_M} = const. \quad (37)$$

$$B_{\mu\delta} = \mu_0 \frac{U_{\mu\alpha}}{\delta} = \mu_0 \frac{Q'_{\mu1\alpha}}{C_{\mu\pi}\delta} = \frac{Q_{\mu M}}{bX_M} = const. \quad (38)$$

Как видно из полученных выражений (34)-(38), при изменении толщины колец магнитопровода в соответствии с (32) и (33) рабочие магнитные потоки $Q_{\mu1\alpha}$ и $Q_{\mu2\alpha}$ изменяются по координате α строго по линейному закону, а магнитные индукции в сечениях колец и в воздушном зазоре между ними постоянна по координате α . Следует отметить, что постоянством индукции в сечениях колец по координате α достигается независимость магнитных сопротивлений колец от индукции.

Если начало отсчета для каждого кольца производить от точки соединения перемычки к кольцу, то рабочий магнитный поток и толщина колец определяются как:

$$Q_{\mu\alpha} = Q_{\mu1\alpha} = Q_{\mu2\alpha} = Q_{\mu M} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_M}\right), \quad (39)$$

$$h_{1\alpha} = h_{1\alpha} = h_{2\alpha} = h_M \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_M}\right). \quad (40)$$

ЭДС, наводимые в соответствующих секциях измерительной обмотки и общая ЭДС на выходных зажимах измерительной обмотки при повороте на подвижного магнитопровода угол α , определяются как:

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.5}} = -j\omega W_{\text{ИЗМ.}} \dot{Q}_{\mu1\alpha} = -j\omega W_{\text{ИЗМ.}} \dot{Q}_{\mu M} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_M}\right), \quad (41)$$

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.6}} = -j\omega W_{\text{ИЗМ.}} \dot{Q}_{\mu2\alpha} = -j\omega W_{\text{ИЗМ.}} \dot{Q}_{\mu M} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_M}\right), \quad (42)$$

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.}} = \dot{E}_{\text{ВЫХ.5}} + \dot{E}_{\text{ВЫХ.6}} = j\omega W_{\text{ВЫХ.}} \dot{Q}_{\mu M} \frac{2\alpha_1}{\alpha_M}, \quad (43)$$

здесь $W_{\text{ИЗМ.}}$ – количество витков в одной секции измерительной обмотки; α – координата перемещения секции 6 и 7 измерительной обмотки относительно нейтрального положения подвижного магнитопровода,
www.pedagoglar.org 8-to'plam 1-son iyun 2024

отсчитываемого для каждого кольца от их точки соединения с перемычкой;
 ω – частота тока возбуждения.

Заключение. Таким образом, выявлено, рабочие магнитные потоки в известном преобразователе угловых перемещений распределены по координате подвижной части по нелинейному закону, магнитная индукция в зазоре между кольцами по угловой координате неравномерна: в начале и конце магнитной цепи значение индукции максимальное, а в середине цепи минимальное. Кроме того, магнитные индукции в сечениях колец также являются функциями угловой координаты.

Это означает, что с изменением индукции в сечениях колец изменяется магнитное сопротивление колец. Это обстоятельство также влияет на распределение рабочих магнитных потоков по координате α . что с изменением индукции в сечениях колец изменяется магнитное сопротивление колец.

Это обстоятельство также влияет на распределение рабочих магнитных потоков. С увеличением значения коэффициент затухания магнитного поля в магнитной цепи степень нелинейности распределения рабочих магнитных потоков в соответствующих кольцах и степень неравномерности магнитной индукции в зазоре между кольцами возрастает.

Благодаря выполнению толщины обеих колец уменьшающиеся начиная от их точек, соединенных с перемычкой, до диаметрально противоположной точке кольца по вышеприведенному линейному закону, в кольцах создаются магнитные потоки, распределенные по углу этих колец строго по линейному закону, вследствие чего достигается линейность статической характеристики предлагаемого преобразователя угловых перемещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования: справочные материалы / 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение, 1965. — 928 с.

2. Юсупбеков Н.Р., Игамбердиев Х.З., Маликов А.В. Основы автоматизации технологических процессов: Учебное пособие для высшего и среднего специального образования. В 2-х ч. – Ташкент: ТГТУ, 2007. ч.1, 2. – 152 с., 173 с.

3. Зарипов М.Ф. Преобразователи с распределенными параметрами для ав-томатики и информационно-измерительной техники. Москва, Энергия, 1969, 177с.

4. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: монография /. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 176 с.

5. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. – Москва: Машиностроение, 1987. – 256 с.

6. Патент РУз (UZ) № IAP 06642. Трансформаторный преобразователь угловых перемещений / Амиров С.Ф., Юлдашев Н.Р., Файзуллаев Ж.С., Жумабоев С.Х. // Расмий ахборотнома, 2021. - №12.

7. Патент РУз (UZ) № IAP 06911. Трансформаторный преобразователь угловых перемещений / Амиров С.Ф., Юлдашев Н.Р., Жумабоев С.Х., Файзуллаев Ж.С. // Расмий ахборотнома, 2022. - №5.

8. Патент РУз (UZ) № IAP 07234. Трансформаторный датчик больших линейных перемещений повышенной чувствительности / Амиров С.Ф., Шарипов Ш.А., Суллийев А.Х., Болтаев О.Т., Каримов И А.//Расмий ахборотнома – 2022. .–№6.

9. С.Ф. Амиров, У.Ш. Мамадалиев, И.А. Каримов., Математические модели магнитной цепи нового преобразователя угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // Химическая технология. Контроль и управление. – 2023, №2(110). – 29-38 с.

10. А.с. № 872943. Преобразователь угловых перемещений /О.В. Тарханов G 01 B 7/00, 1981, бюллетень изобретений №38.

11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд.,13–е, исправленное – Москва: Наука. Гл.

ред. Физ.–мат. лит., 1986. – 544 с.

12. Новгородцев А.Б. Расчет электрических цепей в MATLAB: Учебный курс. – Санкт-Петербург: Питер, 2004. – 250 с.

13. Заявка на патент РУз (UZ) № IAP 20230193. Преобразователь угловых перемещений /Амиров С.Ф., Суллийев А.Х., Файзуллаев Ж.С., Шарапов Ш.А., Мамадалиев У.Ш., Юлдашев Н.Р.// Дата подачи заявки: 27.03.2023.

14. Заявка на патент РУз (UZ) № IAP 20220111. Трансформаторный преобразователь угловых перемещений / Амиров С.Ф., Каримов И.А., Юлдашев Н.Р., Мамадалиев У.Ш., Шоимкулов А.А.// Дата подачи заявки: 11.03.2022.

15. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие. 7-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.

16. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. - Москва: Техносфера, 2007. -384 с.