

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ АКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Амиров Султан Файзулаевич

*д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжения», Ташкентский
государственный транспортный университет, г. Ташкент*

e-mail: amirovsf@bk.ru

Мамадалиев Улугбек Шухратович

*докторант кафедры «Электроснабжения», Ташкентский государственный
транспортный университет, г. Ташкент e-mail: mamadaliyev.u.sh@mail.ru*

Аннотация. В статье разработаны математические модели трансформаторного преобразователя угловых перемещений с переменной активной площадью серпообразного незамкнутого кольца из электроизоляционного немагнитного и магнитного материалов, на котором намотана катушки возбуждения, в которой ширина катушки возбуждения является функцией углового перемещения преобразователя. При этом магнитная цепь преобразователя расчленена на участка характерных участках(до подвижного ферромагнитного сердечника, ферромагнитного сердечника и после ферромагнитного сердечника) участков, рассматривается как магнитная цепь с распределенными параметрами. Установлено, что при неучете магнитного сопротивления стальной части магнитной цепи рабочий магнитный поток является линейной функцией углового перемещения подвижного ферромагнитного сердечника преобразователя. Полученные математические модели магнитной цепи трансформаторного преобразователя угловых перемещений в виде аналитических выражений магнитного потока в длинных ферромагнитных стержнях и магнитного напряжения между ними для трех

характерных участков позволяет учитывать распределенность параметров магнитного сопротивления длинных ферромагнитных стержней и магнитной емкости воздушного зазора между ними, а также магнитной емкости воздушного зазора между стержнями и подвижным ферромагнитным сердечником.

Ключевые слова: дифференциальный трансформаторный преобразователь, угловое перемещение, серпообразное незамкнутое кольцо, магнитная цепь, распределенный параметр, погонное магнитное сопротивление, погонная магнитная емкость, магнитный поток, магнитное напряжение, линейность потокораспределения, коэффициент распространения магнитного потока, характерные участки магнитной цепи.

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 имеют высокую надежность и стабильные метрологические характеристики в экстремальных условиях эксплуатации [3,4]. Вместе с тем они имеют сравнительно низкую чувствительность и нелинейную статическую характеристику [5].

На кафедре «Электроснабжение» Ташкентского государственного транспортного университета разработаны трансформаторные преобразователи угловых перемещений (ТПУП) [6], конструктивная схема одного из них приведена на рис.1.

ТПУП содержит неподвижную катушку возбуждения 1, намотанную на серпообразное незамкнутое кольцо 2. Кольцо 2 размещено в зазоре О-образного магнитопровода 3, в основаниях которого сосредоточенно намотаны одинаковые секции измерительной обмотки 4 и 5, соединенные между собой последовательно

и согласно. Торцевые части одного из оснований магнитопровода 3 механически жестко соединены с двумя полуосями 6 и 7.

ТПУП работает следующим образом. При питании обмотку возбуждения от источника синусоидального тока, синусоидальный магнитный поток, образованный этим током, замыкается по магнитопроводу, замыкаясь через его основания, где намотаны последовательно и согласно включенные между собой секции измерительной обмотки, индуцируя в них, согласно закону электромагнитной индукции, электродвижущие силы (ЭДС) $\dot{E}_{\text{ВЫХ.}}$. ЭДС

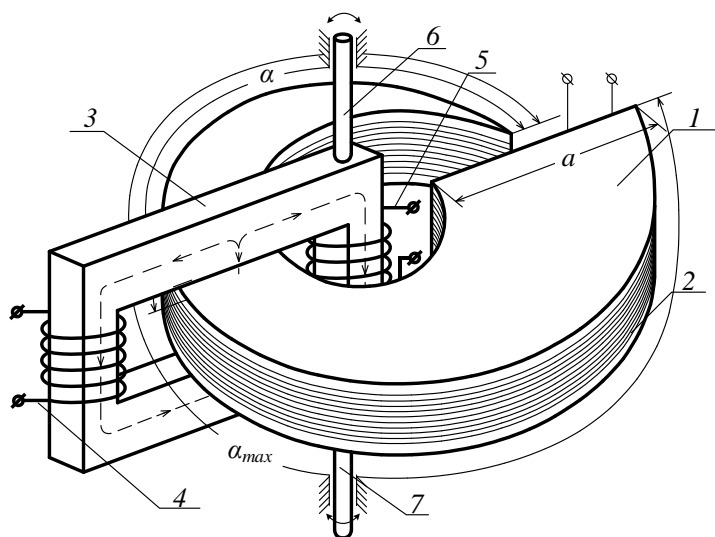


Рис.1. Конструктивная схема ТПУП: 1 – неподвижная катушка возбуждения; 2 – серпообразное незамкнутое кольцо; 3 – подвижный O-образный магнитопровод; 4,5 – последовательно и согласно соединенные секции измерительной обмотки; 6,7 – механически жестко связанные с контролируемым объектом полуоси.

пропорциональна току ($\dot{I}_{\text{ЭВ}}$) источника питания и угловую частоту (ω) его изменения, количеству витков ($w_{\text{В.}}$) обмотки возбуждения и ее активной площади ($S_{\mu\delta}(\alpha)$), а также количеству витков ($w_{\text{ВЫХ.}}$) измерительной обмотки, т.е.:

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.}} = j\omega w_{\text{ВЫХ.}} \dot{B} = j\omega w_{\text{ВЫХ.}} \dot{Q}_{\mu} S_{\mu\delta}(\alpha) = j\omega w_{\text{ВЫХ.}} \dot{I}_{\text{ЭВ}} w_{\text{В.}} \mu_0 \frac{ba}{\delta\pi} \alpha, \quad (1)$$

здесь \dot{B} , \dot{Q}_μ – соответственно магнитная индукция и магнитный поток в активной площади катушки обмотки возбуждения; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H \cdot m^{-1}]$ – магнитная постоянная; $S_{\mu\delta}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}\alpha$ – активная площадь сектора неподвижного серпообразного незамкнутого кольца 1, перекрываемая длинными стержнями подвижного О-образного магнитопровода; b – ширина длинных стержней; a – максимальная ширина серпообразного незамкнутого кольца, равная удвоенному значению шага архимедовой спирали; α , α_m – угловое перемещение подвижного магнитопровода и ее максимальное значение.

Диапазон преобразуемых угловых перемещений в предлагаемом преобразователе составляет примерно 350° .

При выводе выражении (1) не учтена распределенность параметров магнитной цепи исследуемого преобразователя. Это обстоятельство в некоторой степени снижает точность определения аналитического уравнения статической характеристики рассматриваемого ТПУП.

В этой статье исследуем магнитную цепь рассматриваемого ТПУП с учетом распределенности параметров магнитного сопротивления длинных стержней О-образного магнитопровода и магнитной ёмкости между ними для следующих два случая: 1) катушка намотана на серпообразного незамкнутого кольца из электроизоляционного и немагнитного материала; 2) катушка намотана на серпообразного незамкнутого кольца из ферромагнитного материала.

Во всех случаях анализа магнитных цепей пренебрегается нелинейностью характеристик магнитного сопротивления стальной части магнитной цепи, потоками выпучивания на боковых концах цепи и в области катушки возбуждения. Эти допущения, как показано в [3], не вносят ощутимых неточностей, однако значительно упрощают анализ исследуемой магнитной цепи.

Конструктивная схема исследуемой линейной магнитной цепи приведена на рис.2. В расчетах магнитная цепь представляется в виде О-образного

магнитопровода, между параллельно расположенными длинными стержнями свободно с некоторыми зазорами δ_p размещена катушка возбуждения, активная площадь которой изменяется за счет линейного изменения ее ширины по длине длинных стержней в зависимости от значения угла поворота О-образного магнитопровода, т.е. $2x = \frac{a}{\pi} \alpha$ (при изменении угла поворота α О-образного магнитопровода от 0 до α_m координата x изменяется в пределах: $0 \leq x \leq X_M$).

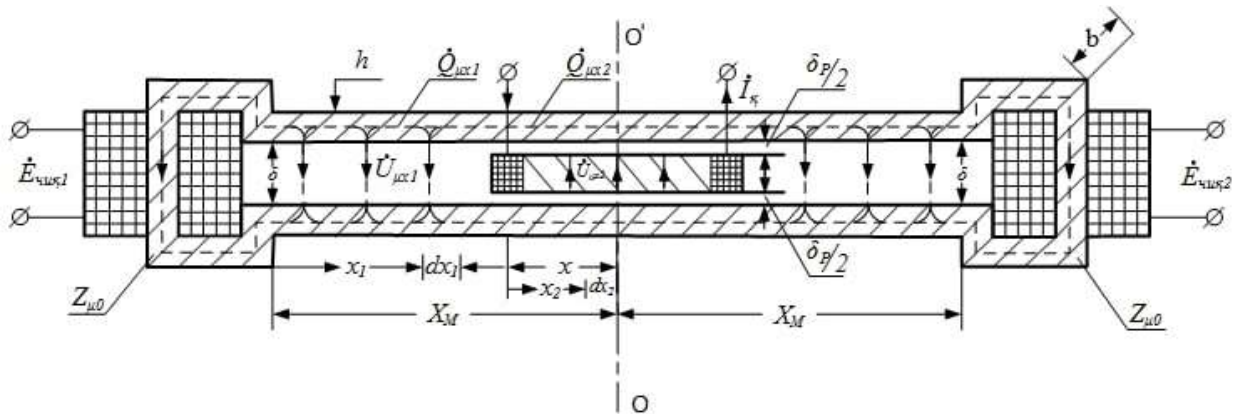


Рис.2. Конструктивная схема исследуемой линейной магнитной цепи

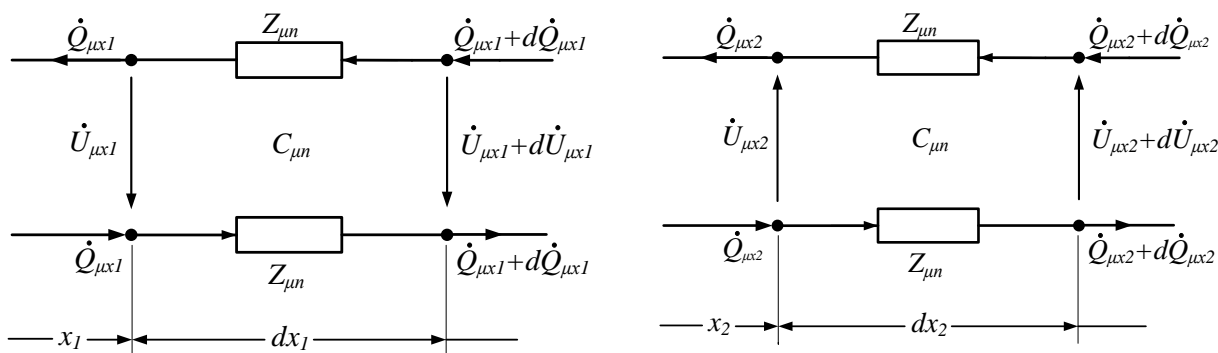
Учитывая, что рассматриваемая магнитная цепь симметрична относительно вертикальной оси $O - O'$, достаточно рассмотрение лишь одной, например, ее левой от этой части.

Составим для первого случая следующие уравнения на основе законов Кирхгофа для соответствующих элементарных участков магнитной цепи длинами соответственно dx_1 и dx_2 (рис.3) [3]:

$$Q'_{\mu x_1} = U_{\mu x_1} C_{\mu \Pi}, \quad (2) \quad U'_{\mu x_1} = 2Z_{\mu \Pi} Q_{\mu x_1}, \quad (3)$$

$$Q'_{\mu x_2} = -U_{\mu x_2} C_{\mu \Pi}, \quad (4) \quad U'_{\mu x_2} = -2Z_{\mu \Pi} Q_{\mu x_2}, \quad (5)$$

где $Q_{\mu x_1}$, $Q'_{\mu x_2}$, [Wb]; $U_{\mu x_1}$, $U'_{\mu x_2}$, [A] – соответственно магнитные потоки в параллельно расположенных длинных стержнях и магнитные напряжения между ними для соответствующих участков; $Z_{\mu \Pi} = \frac{1}{\mu \mu_0 b h}$, [$H^{-1} \cdot m^{-1}$],



а)

б)

Рис.3. Схемы замещения элементарных участков исследуемой линейной магнитной цепи с координатами x_1 (а) и x_2 (б)

$C_{\mu n} = \mu_0 \frac{b}{\delta}, [H \cdot m^{-1}]$ – погонные значения соответственно магнитного сопротивления длинных стержней и магнитной емкости воздушного зазора δ между ними, приходящиеся на единицу длины стержней; $\mu = const$ – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода; x, X_m – ширина активной площади катушки возбуждения по длине длинных стержней О-образного магнитопровода и ее максимальное значение, $[m]$. Геометрические размеры показаны на рис. 2.

Продифференцировав уравнение (2) и (4) и подставив в них соответственно (3) и (4), получим следующие однородные дифференциальные уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$Q''_{\mu x_1} = 2Z_{\mu n} C_{\mu n} Q_{\mu x_1}. \quad (6) \quad Q''_{\mu x_2} = 2Z_{\mu n} C_{\mu n} Q_{\mu x_2}. \quad (7)$$

Общее решение дифференциальных уравнений (6) и (7), как известно [8], имеет следующий вид:

$$Q_{\mu x_1} = A_1 e^{\gamma x_1} + A_2 e^{-\gamma x_1}, \quad (8)$$

$$Q_{\mu x_2} = A_3 e^{\gamma x_2} + A_4 e^{-\gamma x_2}, \quad (9)$$

где $A_1 \div A_4$ – постоянные интегрирования, $[Wb]$; $\gamma = \sqrt{2Z_{\mu n} C_{\mu n}}, [m^{-1}]$ – скорость распространения магнитного поля в магнитной цепи.

Из уравнений (2) и (4) с учетом (8) и (9) для магнитных напряжений получим следующие уравнения:

$$U_{\mu x_1} = \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_1 e^{\gamma x_1} - \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_2 e^{-\gamma x_1}, \quad (10)$$

$$U_{\mu x_2} = -\frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_3 e^{\gamma x_2} + \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_4 e^{-\gamma x_2}. \quad (11)$$

Значения $A_1 \div A_4$ находятся исходя из следующих граничных условий [9]:

$$U_{\mu x_1=0} = -Q_{\mu x_1=0} Z_{\mu 0}, \quad (12) \quad Q_{\mu x_1=X_M-x} = -Q_{\mu x_2=0}, \quad (13)$$

$$U_{\mu x_1=X_M-x} = F_B - U_{\mu x_2=0}, \quad (14) \quad Q_{\mu x_2=x} = 0, \quad (15)$$

где $F_B, [A]$ – магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения; $Z_{\mu 0} = \frac{\delta}{\mu\mu_0 b h}$ – магнитное сопротивление основанию О-образного магнитопровода, $[H^{-1}]$.

Подставляя граничные значения $Q_{\mu x_1}, Q_{\mu x_2}$ и $U_{\mu x_1}, U_{\mu x_2}$ в соответствующие уравнения (12)-(15) получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} - Z_{\mu 0} \right) A_1 - \left(\frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} + Z_{\mu 0} \right) A_2 = 0, \\ A_1 e^{\gamma(X_M-x)} + A_2 e^{-\gamma(X_M-x)} - A_3 - A_4 = 0, \\ \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_1 e^{\gamma(X_M-x)} - \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_2 e^{-\gamma(X_M-x)} - \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_3 + \frac{\gamma}{C_{\mu\pi}} A_4 = \dot{F}_B, \\ A_3 e^{\gamma x} + A_4 e^{-\gamma x} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решая полученную систему алгебраических уравнений (16) относительно неизвестных $A_1 \div A_4$, находим их следующие значения:

$$A_1 = \frac{2F_K(Z_{\mu 0} C_{\mu\pi} + \gamma) sh(\gamma x)}{\Delta_1}, \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{2F_K(\gamma - Z_{\mu 0} C_{\mu\pi}) sh(\gamma x)}{\Delta_1}, \quad (18)$$

$$A_3 = -\frac{2F_K[ch(\gamma x) - sh(\gamma x)](Z_{\mu 0} C_{\mu\pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)])}{\Delta_1}, \quad (19)$$

$$A_4 = \frac{2F_K[ch(\gamma x) + sh(\gamma x)](Z_{\mu 0} C_{\mu\pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)])}{\Delta_1}, \quad (20)$$

здесь $\Delta_1 = -\frac{4\gamma}{C_{\mu\pi}} [Z_{\mu 0} C_{\mu\pi} sh(\gamma X_M) + \gamma ch(\gamma X_M)]$, $[H^{-1} \cdot m^{-1}]$.

Подставляя найденные значения $A_1 \div A_4$ в уравнения (9)-(11), получим следующее:

$$Q_{\mu x_1} = \frac{4F_B sh(\gamma x)}{\Delta_1} [Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh(\gamma x_1) + \gamma ch(\gamma x_1)], \quad (21)$$

$$U_{\mu x_1} = \frac{4\gamma F_B sh(\gamma x)}{C_{\mu \Pi} \Delta_1} [Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} ch(\gamma x_1) + \gamma sh(\gamma x_1)], \quad (22)$$

$$Q_{\mu x_2} = \frac{4F_B}{\Delta_1} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} sh[(\gamma(x - x_2))], \quad (23)$$

$$U_{\mu x_2} = \frac{4\gamma F_B}{C_{\mu \Pi} \Delta_1} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} ch[(\gamma(x - x_2))]. \quad (24)$$

Выражения магнитных потоков и магнитных напряжений для правой части магнитной цепи можно получить по вышеприведенной методике. Они отличаются от соответствующих выражений (21)-(24) лишь координатами x_3 и x_4 вместо x_1 и x_2 , т.е.:

$$Q_{\mu x_3} = \frac{4F_B sh(\gamma x)}{\Delta_1} [Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh(\gamma x_3) + \gamma ch(\gamma x_3)], \quad (25)$$

$$U_{\mu x_3} = \frac{4\gamma F_B sh(\gamma x)}{C_{\mu \Pi} \Delta_1} [Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} ch(\gamma x_3) + \gamma sh(\gamma x_3)], \quad (26)$$

$$Q_{\mu x_4} = \frac{4F_B}{\Delta_1} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} sh[(\gamma(x - x_4))], \quad (27)$$

$$U_{\mu x_4} = \frac{4\gamma F_B}{C_{\mu \Pi} \Delta_1} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} ch[(\gamma(x - x_4))]. \quad (28)$$

Значения рабочих магнитных потоков, участвующих в создании выходной ЭДС, находятся как:

$$Q_{\mu x.p1} = Q_{\mu x_1=0} = Q_{\mu x_3=0} = \frac{4F_B \gamma sh(\gamma x)}{\Delta_1}. \quad (29)$$

Выходной ЭДС рассматриваемого ТПУП, снимаемого с выходных зажимов последовательно и согласно соединенных секции обмотки возбуждения, определяется как:

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.1}} = j\omega w_{\text{ВЫХ}} (\dot{Q}_{\mu x_1=0} + \dot{Q}_{\mu x_3=0}) = j4\omega w_{\text{ВЫХ}} \dot{I}_{\text{ЭВ}} w_{\text{В}} \frac{\gamma sh(\gamma x)}{\Delta_1}. \quad (30)$$

Если учесть, что $x = \frac{a}{2\pi} \alpha$, выражение (30) имеет следующий вид:

$$\dot{E}_{\text{ВЫХ.1}} = j4\omega W_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ЭВ}} W_{\text{В}} \frac{\gamma sh\left(\frac{\gamma a}{2\pi} \alpha\right)}{\Delta_1}. \quad (31)$$

Выражения (21)-(29) являются математическими моделями магнитной цепи, а выражение (30) и (31) - математическими моделями рассматриваемого ТПУП с учетом распределенности параметров магнитного сопротивления длинных стержней О-образного магнитопровода и магнитной ёмкости между ними для случая изготовления серпообразного незамкнутого кольца, на которой намотана обмотка возбуждения, из электроизоляционного и немагнитного материала.

Теперь исследуем магнитную цепь рассматриваемого ТПУП для случая изготовления серпообразного незамкнутого кольца с целью повышения чувствительности преобразователя из ферромагнитного материала.

Для этого случая дифференциальные уравнения и их решения для участков с соответствующими координатами x_1 и x_2 имеют следующий вид:

$$Q''_{\mu x_1} = 2Z_{\mu\text{п}} C_{\mu\text{п}} Q_{\mu x_1}, \quad (6) \quad Q''_{\mu x_2} = 2Z_{\mu\text{рп}} C_{\mu\text{рп}} Q_{\mu x_2}. \quad (32)$$

$$Q_{\mu x_1} = A_1 e^{\gamma x_1} + A_2 e^{-\gamma x_1}, \quad (33)$$

$$Q_{\mu x_2} = A_3 e^{\gamma_p x_2} + A_4 e^{-\gamma_p x_2}, \quad (34)$$

$$U_{\mu x_1} = \frac{\gamma}{C_{\mu\text{п}}} A_1 e^{\gamma x_1} - \frac{\gamma}{C_{\mu\text{п}}} A_2 e^{-\gamma x_1}, \quad (35)$$

$$U_{\mu x_2} = -\frac{\gamma_p}{C_{\mu\text{рп}}} A_3 e^{\gamma_p x_2} + \frac{\gamma_p}{C_{\mu\text{рп}}} A_4 e^{-\gamma_p x_2}. \quad (36)$$

здесь $Z_{\mu\text{рп}} = \frac{1}{\mu\mu_0 b h_p}$, $[H^{-1} \cdot m^{-1}]$, $C_{\mu\text{рп}} = \mu_0 \frac{b}{\delta_p}$, $[H \cdot m^{-1}]$ – погонные значения соответственно магнитного сопротивления длинных стержней и магнитной емкости воздушного зазора δ_p между ними, приходящиеся на единицу длины стержней; $h_p = 0,5(h + h_c)$ и h_c – соответственно толщина магнитопровода на участке магнитной цепи координатой x_2 и серпообразного незамкнутого кольца из ферромагнитного материала; δ_p – суммарный воздушный зазор между стержнями О-образного магнитопровода и серпообразного ферромагнитного

незамкнутого кольца (рис.2); $\gamma_p = \sqrt{2Z_{\mu p} C_{\mu p}}, [m^{-1}]$. Граничные условия для определения постоянных интегрирования $A_1 \div A_4$ не меняются. Подставляя граничные значения $Q_{\mu x_1}, Q_{\mu x_2}$ и $U_{\mu x_1}, U_{\mu x_2}$ в соответствующие уравнения (12)-(15) получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{\gamma}{C_{\mu p}} - Z_{\mu 0} \right) A_1 - \left(\frac{\gamma}{C_{\mu p}} + Z_{\mu 0} \right) A_2 = 0, \\ A_1 e^{\gamma(X_M - x)} + A_2 e^{-\gamma(X_M - x)} - A_3 - A_4 = 0, \\ \frac{\gamma}{C_{\mu p}} A_1 e^{\gamma(X_M - x)} - \frac{\gamma}{C_{\mu p}} A_2 e^{-\gamma(X_M - x)} - \frac{\gamma_p}{C_{\mu p}} A_3 + \frac{\gamma_p}{C_{\mu p}} A_4 = \dot{F}_B, \\ A_3 e^{\gamma_p x} + A_4 e^{-\gamma_p x} = 0. \end{cases} \quad (37)$$

Решая полученную систему алгебраических уравнений (37) относительно неизвестных $A_1 \div A_4$, находим следующие их значения:

$$A_1 = \frac{2F_K(\gamma + Z_{\mu 0} C_{\mu p})sh(\gamma_p x)}{\Delta_2}, \quad (38)$$

$$A_2 = \frac{2F_K(\gamma - Z_{\mu 0} C_{\mu p})sh(\gamma_p x)}{\Delta_2}, \quad (39)$$

$$A_3 = -\frac{2F_K[ch(\gamma_p x) - sh(\gamma_p x)]\{Z_{\mu 0} C_{\mu p} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\}}{\Delta_2}, \quad (40)$$

$$A_4 = \frac{2F_K[ch(\gamma_p x) + sh(\gamma_p x)]\{Z_{\mu 0} C_{\mu p} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\}}{\Delta_2}, \quad (41)$$

здесь $\Delta_2 = -\frac{4}{C_{\mu p} C_{\mu p}} \{ \gamma \gamma_p C_{\mu p} ch(\gamma_p x) ch[\gamma(X_M - x)] + \gamma^2 C_{\mu p} sh(\gamma_p x) sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma_p Z_{\mu 0} C_{\mu p}^2 ch(\gamma_p x) sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma Z_{\mu 0} C_{\mu p} C_{\mu p} sh(\gamma_p x) ch[\gamma(X_M - x)] \}$.

Подставляя найденные значения $A_1 \div A_4$ в уравнения (33)-(36), получим следующее:

$$Q_{\mu x_1} = \frac{4F_K sh(\gamma_p x)}{\Delta_2} [Z_{\mu 0} C_{\mu p} sh(\gamma x_1) + \gamma ch(\gamma x_1)], \quad (42)$$

$$U_{\mu x_1} = \frac{4\gamma F_K sh(\gamma_p x)}{C_{\mu p} \Delta_2} [Z_{\mu 0} C_{\mu p} ch(\gamma x_1) + \gamma sh(\gamma x_1)], \quad (43)$$

$$Q_{\mu x_2} = \frac{4F_K}{\Delta_2} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} sh[\gamma_p(x - x_2)], \quad (44)$$

$$U_{\mu x_2} = \frac{4\gamma_p F_K}{C_{\mu \Pi} \Delta_2} \{Z_{\mu 0} C_{\mu \Pi} sh[\gamma(X_M - x)] + \gamma ch[\gamma(X_M - x)]\} ch[\gamma_p(x - x_2)]. \quad (45)$$

Следует отметить, что при $\gamma_p = \gamma$ и $C_{\mu p\Pi} = C_{\mu \Pi}$, т.е. при равенстве значение относительной магнитной проницаемости серпообразного незамкнутого кольца, на котором намотана обмотка возбуждения, значению относительной магнитной проницаемости воздуха, уравнения (42)-(45) переходит к соответствующим уравнениям (21)-(24), что показывает правильность полученных выражений.

Выражения магнитных потоков и магнитных напряжений для правой части магнитной цепи можно получить из соответствующих выражений (42)-(45) заменой координат x_1 и x_2 на x_3 и x_4 .

Значения рабочих магнитных потоков, участвующих в создании выходной ЭДС, находятся как:

$$Q_{\mu x.p2} = Q_{\mu x_1=0} = Q_{\mu x_3=0} = \frac{4F_B \gamma sh(\gamma_p x)}{\Delta_2}. \quad (46)$$

Выходной ЭДС рассматриваемого ТПУП, снимаемого с выходных зажимов последовательно и согласно соединенных секции обмотки возбуждения, определяется как:

$$\dot{E}_{\text{вых.2}} = j\omega w_{\text{вых}} (\dot{Q}_{\mu x_1=0} + \dot{Q}_{\mu x_3=0}) = j4\omega w_{\text{вых}} \dot{I}_{\text{эв}} w_B \frac{\gamma sh(\frac{\gamma_p a}{2\pi} \alpha)}{\Delta_2}. \quad (47)$$

Выражения (42)-(46) являются математическими моделями магнитной цепи, а выражение (47) - математической моделью рассматриваемого ТПУП с учетом распределенности параметров магнитного сопротивления длинных стержней О-образного магнитопровода и магнитной ёмкости между ними для случая изготовления серпообразного незамкнутого кольца, на котором намотана обмотка возбуждения, из ферромагнитного материала.

Для построения кривых зависимости рабочих магнитных потоков от координаты подвижной части α на основе аналитических выражений (29) и (46) переходим к их относительным единицам:

$$Q_{\mu p1}^* = \frac{Q_{\mu x.p1}}{Q_{\mu x.p1.max}} = \frac{Q_{\mu x.p1}}{F_B C_{\mu\Pi} X_M} = \frac{sh(\beta x^*)}{\Delta_1^*}, \quad (48)$$

$$Q_{\mu p2}^* = \frac{Q_{\mu x.p2}}{Q_{\mu x.p2.max}} = \frac{Q_{\mu x.p2}}{F_B C_{\mu\Pi} X_M} = \frac{sh(\beta_p x^*)}{\Delta_2^*}, \quad (49)$$

здесь $\Delta_1^* = Z_{\mu 0} C_{\mu\Pi} X_M sh\beta + \beta ch\beta, [-]; \Delta_2^* = \beta_p ch(\beta_p x^*) ch[\beta(1 - x^*)] +$
 $+ \beta \frac{C_{\mu p\Pi}}{C_{\mu\Pi}} sh(\beta_p x^*) sh[\beta(1 - x^*)] + \frac{\beta_p}{\beta} Z_{\mu 0} C_{\mu\Pi} X_M ch(\beta_p x^*) sh[\beta(1 - x^*)] +$
 $+ Z_{\mu 0} C_{\mu p\Pi} X_M sh(\beta_p x^*) ch[\beta(1 - x^*)], [-]; Q_{\mu x.p1.max} = F_B C_{\mu\Pi} X_M; Q_{\mu x.p2.max} =$
 $F_B C_{\mu p\Pi} X_M$ – максимально возможные значения рабочих магнитных потоков для рассматриваемых случаев; $\beta = \gamma X_M, [-]; \beta_p = \gamma_p X_M, [-]; x^* = x/X_M$. Поскольку $x = \frac{a}{2\pi} \alpha$, то $x^* = \frac{a\alpha_M}{2\pi X_M} \alpha^*$.

Кривые зависимости $Q_{\mu p1}^* = f(\alpha^*)$ и $Q_{\mu p2}^* = f(\alpha^*)$ в соответствии с (48) и (49) построены для следующих конструктивных и магнитных параметров исследуемых магнитных цепей: $X_M = 0,1 \text{ m}; \alpha_M = 355^0; a \approx X_M = 0,1 \text{ m}; b = 0,02 \text{ m}; h = 0,01 \text{ m}; \delta = 0,01 \text{ m}; \delta_{p.1} = 10^{-3} \text{ m}; \delta_{p.2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}; \delta_{p.3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}; \mu = 10^3$.

Анализ кривых $Q_{\mu p1}^* = f(\alpha^*)$ и $Q_{\mu p2}^* = f(\alpha^*)$ (рис.4) показывает, что

Оценим степень линейности зависимости рабочего магнитного потока от перемещения подвижной части ТПУП. Для этого пользуемся наиболее удобным на практике методом определения степени нелинейности характеристик измерительных преобразователей, предложенным проф. Зариповым М.Ф [3].

В случае, если характеристика исследуется в одном (в первом) квадранте, то значение степени нелинейности определяется по этому следующем выражением:

$$\varepsilon = \frac{f(x_k) - \frac{f(X_M)}{X_M} x_k}{f(X_M)} \cdot 100 \%, \quad (50)$$

здесь x_k находится как корни уравнения $\frac{d[f(x)]}{dx} = \frac{f(X_M)}{X_M}$. Для функции (29) получим следующее значение x_k :

$$x_k = \gamma^{-1} \text{Arch}(sh\beta) \beta^{-1}. \quad (51)$$

Подставляя (51) в (50), получим следующее значение степени нелинейности зависимости $Q_{\mu x.p1} = f(x)$ для случая, когда серпообразное незамкнутое кольцо, на котором намотана обмотка возбуждения, изготовлено из электроизоляционного немагнитного материала:

$$\varepsilon_1 = \{sh[\text{Arch}(sh\beta)\beta^{-1}](sh\beta)^{-1} - \beta^{-1}[\text{Arch}(sh\beta)\beta^{-1}]\} \cdot 100 \%. \quad (52)$$

Для определения значение степени нелинейности зависимости $Q_{\mu x.p2} = f(x)$ для случая, когда серпообразное незамкнутое кольцо, на котором намотана обмотка возбуждения, изготовлено из электроизоляционного ферромагнитного материала. Учитывая $\beta_p \gg \beta$ будем считать, что $\Delta_2 = const$. Тогда для этого случая выражение (52) примет следующий вид:

$$\varepsilon_2 = \{sh[\text{Arch}(sh\beta_p)\beta_p^{-1}](sh\beta_p)^{-1} - \beta_p^{-1}[\text{Arch}(sh\beta_p)\beta_p^{-1}]\} \cdot 100 \%. \quad (52)$$

При $\beta = \varepsilon_1 = \%$, а при $\beta_p = \varepsilon_2 = \%$.

Таким образом, в статье магнитная цепь трансформаторного преобразователя угловых перемещений рассмотрена как магнитная цепь с распределенными параметрами, в которой ширина катушки возбуждения является функцией углового перемещения контролируемого объекта. Исследованиями установлено, что при неучете магнитного сопротивления стальной части магнитной цепи рабочий магнитный поток является линейной функцией, а при учете распределенного характера магнитного сопротивления стальной части магнитной цепи и магнитной емкости воздушных зазоров – нелинейной функцией углового перемещения преобразователя и степень этой нелинейности тем больше, чем

больше коэффициент затухания магнитного поля в магнитной цепи с распределенными параметрами.

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 автоматики 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. 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 г.

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

8. 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.

9. Зарипов М.Ф., Ураксеев М.А. Электромеханические счетно-решающие преобразователи. Учебное пособие, Уфа, УАИ, 1974. — 202 с.