

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОАНИЗОТРОПНЫХ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

© 2010 А.Е. Дубинин, Р.Е. Капитуров, А.А. Дубинин

Самарский государственный университет путей сообщения

Поступила в редакцию 24.02.2010

Рассматриваются магнитоанизотропный ключевой элемент и его математическая модель в двумерном пространстве. При этом управляемый магнитопровод заменяется эквивалентной пластиной в электромагнитном поле при силовом воздействии на нее, математическая модель которой описывается системой дифференциальных уравнений теорий электромагнитного поля, ферромагнетизма и упругости. Для магнитной цепи ключа составляется схема замещения, которая описывается системой алгебраических уравнений. Решение систем дифференциальных и алгебраических уравнений позволяет определить электрические и магнитные параметры ключа, а также построить его выходную статическую характеристику.

Ключевые слова: информационно – измерительная система контроля, тяговый электродвигатель, щеточно – коллекторный узел, магнитоанизотропный ключевой элемент, магнитопровод, выходная статическая характеристика, напряженная магнитоанизотропная структура, математическая модель.

В настоящее время тяговые электродвигатели (ТЭД) играют ведущую роль в развитии современного электрического транспорта, надежность работы которых зависит от безотказности функционирования их щеточно-коллекторного узла (ЩКУ). Контроль качества работы этого узла является актуальной задачей. Для контроля параметров ЩКУ была разработана информационно – измерительная система (ИИС) которая осуществляет измерение следующих параметров: нажатие щетки на коллектор, профиль коллектора и его эксцентриситет, выступание пластин, в которой используются магнитоанизотропные ключевые элементы (МКЛ) [1,2,3].

На рис. 1 представлена конструкция магнитоанизотропного ключевого элемента на стандартных кольцевых элементах из магнитомягкого феррита. МКЛ содержит управляемые 8 и компенсационные 9 магнитопроводы с обмотками 14 соединенными последовательно – согласно, параллельно которым включены конденсаторы 13, 15, выходными обмотками 11, включенными попарно последовательно – встречно, образуя коммутационные каналы, и обмотками импульсного управления 12, 16 на управляемых магнитопроводах 8. При этом магнитопроводы соединены с регулирующим узлом через нажимной пластинчатый элемент, состоящим из регу-

лировочного винта 1, нажимных пластин 4, 5 и пружины 2. Нажимной элемент выполнен в виде набора сепараторов 7 с выступами, входящими в пазы 10 корпуса 3 для исключения продольного смещения, стальных шариков 6, которые помещены между магнитопроводами 8, 9.

Пластина 4 через пружину 2 связана с регулировочным винтом 1, устанавливающим её сжатие и определяющим величины усилия через шарики 6 на магнитопроводы 8, 9 и корпус 3. Под действием усилия в магнитопроводах возникают внутренние механические напряжения, которые фиксируют магнитные домены в определённом направлении и приводят магнитопроводы в начальное магнитное состояние, определяющее выключенное состояние ключа. При подаче напряжения на обмотку управления домены управляемых магнитопроводов меняют свое направление и остаются фиксированными с помощью

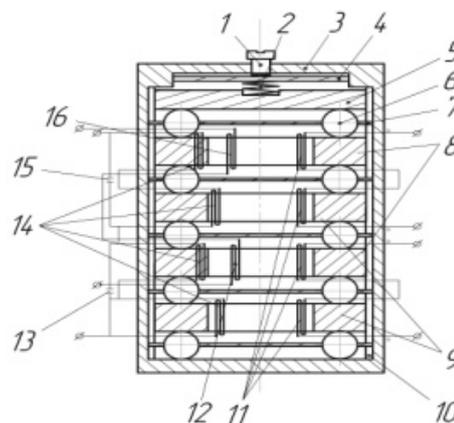


Рис. 1. Магнитоанизотропный ключевой элемент системы контроля ТЭД

Дубинин Александр Ефимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Электротехника".
Тел. (846) 995-54-13

Капитуров Роман Евгеньевич, аспирант.

E-mail: k.r.e_123@mail.ru.

Дубинин Александр Александрович, инженер.

Тел. (846) 995-54-13

усилий, определяя включенное состояние. Выключенное состояние определяется подачей обратного напряжения на обмотку управления или его снятием [3].

Математическая модель МКЛ описывается уравнениями теории электромагнитного поля, ферромагнетизма и упругости. Решение этой модели в трехмерном пространстве связано с непреодолимыми трудностями. Поэтому задача реализации модели была сведена к двумерной. При этом управляемый магнитопровод заменяется эквивалентной пластиной в электромагнитном поле при силовом воздействии на нее, и вводятся следующие допущения [1].

1. Магнитные индукции внешних электромагнитных полей, в которых находится пластина, изменяются по синусоидальному закону;

2. Магнитные поля возбуждения и управления равномерны и имеют только нормальную составляющую магнитной индукции $\underline{B}_z + \underline{B}_{z0}$;

3. Комплексная магнитная проницаемость $\underline{\mu}_\sigma$ напряженной магнитоанизотропной структуры (НМАС) пластины зависит от значений механических напряжений y силы P , $\underline{\mu}_\sigma = f(P)$;

4. Плотность токов $(\underline{\delta}_x + \underline{\delta}_{x0}), (\underline{\delta}_y + \underline{\delta}_{y0})$ по толщине s пластины не изменяется, что имеет место при $s/(2\Delta) \leq 0,5$, где Δ – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в пластину;

5. Тангенциальные составляющие напряженностей электрического поля $(\underline{E}_a + \underline{E}_{a0})$ и $(\underline{E}_b + \underline{E}_{b0})$ на гранях пластины постоянны;

6. Поля выпучивания, идущие в обход пластины, относятся к полям рассеивания;

7. Механическая сила P (напряжение y) направлена к магнитному полю $(\underline{B}_z + \underline{B}_{z0})$ в одной нормальной к пластине плоскости;

8. Среда пластины анизотропна.

Физическая модель на рис. 2, с учетом принятых допущений в двухмерном пространстве при одновременном воздействии силового поля и полей возбуждения и управления описывается

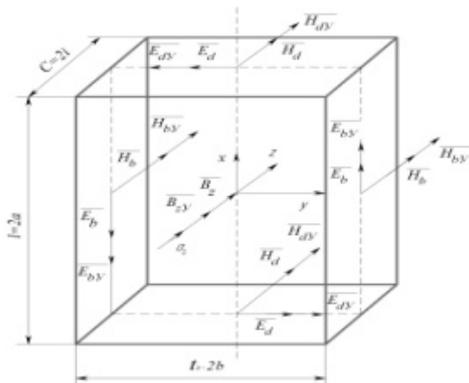


Рис. 2. Модель управляемого МКЛ при сжатии

ся следующими дифференциальными уравнениями в декартовых координатах [1, 2]:

$$\frac{\partial(H_z + H_{zy})}{\partial y} = \gamma_x (\underline{E}_x + \underline{E}_{xy}); \quad (1)$$

$$\frac{\partial(H_z + H_{zy})}{\partial x} = \gamma_y (\underline{E}_y + \underline{E}_{yx}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\underline{E}_y + \underline{E}_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(\underline{E}_x + \underline{E}_{xy})}{\partial y} = j(\omega \underline{\mu}_\alpha H_z + \omega \underline{\mu}_\alpha H_{zy}); \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \underline{B}_z}{\partial H_z} + \frac{\partial \underline{B}_{zy}}{\partial H_{zy}} \right) \frac{1}{(\underline{B}_z + \underline{B}_{zy})^2} \left(\frac{\partial \underline{B}_z}{\partial H_z} + \frac{\partial \underline{B}_{zy}}{\partial H_{zy}} \right) \left(\frac{\partial(H_z + H_{zy})}{\partial \sigma_z} \right) \sigma_z = \underline{\mu}_\sigma; \quad (4)$$

$$E \frac{\partial v}{\partial z} = \sigma_z, \quad (5)$$

где γ_x, γ_y – электрические проводимости НМАС по соответствующим координатам x, y ;

$\underline{E}_x, \underline{E}_y, \underline{E}_{xy}, \underline{E}_{yx}$ – напряженности электрических полей от обмоток возбуждения и управления соответственно по осям x, y ; H_z, H_{zy} – напряженности магнитных полей от обмоток возбуждения и управления соответственно по оси z ; B_z, B_{zy} – магнитные индукции обмоток от возбуждения и управления соответственно; $\omega = \omega_y$ – круговые частоты полей возбуждения и управления; σ_z – нормальные механические напряжения в НМАС; $\underline{\mu}_\sigma$ – магнитная проницаемость от механических напряжений σ ; v – перемещение точки структуры по оси z .

Граничные условия при этом имеют вид:

$$\underline{H}_z(x, y) = \begin{cases} \underline{H}_z(y) & \text{при } x \pm a; \\ \underline{H}_a & \text{при } x = \pm a; y = 0; \\ 0 & \text{при } y = \pm b; \end{cases}$$

$$\underline{H}_{zy}(x, y) = \begin{cases} \underline{H}_{zy}(y) & \text{при } x \pm a; \\ \underline{H}_a & \text{при } x = \pm a; y = 0; \\ 0 & \text{при } y = \pm b; \end{cases} \quad (6)$$

$$\underline{H}_z(y, x) = \begin{cases} \underline{H}_z(x) & \text{при } y = \pm b; \\ \underline{H}_b & \text{при } y = \pm b; x = 0; \\ 0 & \text{при } x = \pm a; \end{cases}$$

$$\underline{H}_{zy}(y, x) = \begin{cases} \underline{H}_{zy}(x) & \text{при } y = \pm b; \\ \underline{H}_b & \text{при } y = \pm b; x = 0; \\ 0 & \text{при } x = \pm a; \end{cases} \quad (7)$$

$$H_{zV}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_1; \\ H_{z\max} & \text{при } t_1 < t < t_2; \\ 0 & \text{при } t > t_2; \end{cases}$$

$$H_{zV}(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_1; \\ H_{z\max} & \text{при } t_1 < t < t_2; \\ 0 & \text{при } t > t_2; \end{cases} \quad (8)$$

где a и b – размеры пластины; t – время срабатывания магнитоанізотропного ключевого элемента; t_1, t_2 – время включения и выключения магнитоанізотропного ключевого элемента (рис. 4)

Решение уравнения ферромагнетизма (4) в литературе известно и его решение имеет вид [1, 2]:

$$\mu_k - \mu_V = \mu_n - \Delta\mu_\sigma + \Delta\mu_V - \mu_n + \Delta\mu_\sigma = \Delta\mu_\sigma, \quad (9)$$

где $\Delta\mu_\sigma = \frac{2,25 \lambda_s \alpha_s \mu_i^2 P}{\pi^2 B^2 t_k^2 l}$ – изменение магнит-

ной проницаемости НМАС, созданное механическим напряжением y усилия P ; $\Delta\mu_V$ – изменение магнитной проницаемости НМАС, созданное полем обмотки управления; $\mu_i = B/H$ и находится по зависимости: $B = f(H)$ – начальная магнитная проницаемость НМАС управляемого и компенсационного элементов от обмотки возбуждения; μ_V и μ_k – магнитные проницаемости НМАС управляемого и компенсационного элементов; λ_s – изотропная магнитоотрицательность; α_s – коэффициент намагниченности; B – магнитная индукция; t_k и l – ширина и толщина кольца (пластины).

Совместное решение (2) - (4) дает

$$\left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right) = \left(\frac{\partial^2 (\underline{H_z} + \underline{H_{zV}})}{\chi_x^2 \partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 (\underline{H_z} + \underline{H_{zV}})}{\chi_y^2 \partial y^2} \right) =$$

$$= \left(\underline{H_z}(x, y) + \underline{H_{zV}}(x, y) \right) + \left(\underline{H_z}(y, x) + \underline{H_{zV}}(y, x) \right) \quad (10)$$

где

$$\begin{cases} (\chi_x + \chi_{xV}) = \sqrt{j\omega\gamma_y(\mu_\sigma + \mu_V)} = \frac{1}{(\Delta_y + \Delta_{yV})} e^{j\psi} \\ (\chi_y + \chi_{yV}) = \sqrt{j\omega\gamma_x(\mu_\sigma + \mu_V)} = \frac{1}{(\Delta_x + \Delta_{xV})} e^{j\psi}; \end{cases}$$

$$(\Delta_x + \Delta_{xV}) = \frac{1}{\sqrt{j\omega\gamma_y(\mu_\sigma + \mu_V)}}$$

$$(\Delta_y + \Delta_{yV}) = \frac{1}{\sqrt{j\omega\gamma_x(\mu_\sigma + \mu_V)}}; \quad (11)$$

$\chi_x, \chi_y, \chi_{yV}, \chi_{xV}$ – постоянные распространения электромагнитной волны в материал НМАС от силового поля, обмотки возбуждения и обмотки управления; $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_{xV}, \Delta_{yV}$ – эквивалентные глубины проникновения электромагнитного поля в материал НМАС от силового поля, обмотки возбуждения и обмотки управления; $\psi = \pi/4 - \beta/2$ – фазовый угол между индуктированной ЭДС и вихревым током; β – угол магнитных потерь.

Поскольку постоянные (11) есть величины комплексные, то решение уравнения (10) ищется в комплексном виде через круговые и гиперболические функции [1]

$$\begin{cases} \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(x, y) = A \operatorname{ch}(\chi_x + \chi_{xV}) x \cos qy \\ \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(y, x) = B \operatorname{ch}(\chi_y + \chi_{yV}) y \cos px; \end{cases} \quad (12)$$

Из условий (7) - (9) определяются постоянные A и B , которые подставляются в выражения (1.12), преобразуя их к виду

$$\begin{cases} \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(x, y) = \left(\underline{H_a} + \underline{H_{aV}} \right) \frac{\operatorname{ch}(\chi_x + \chi_{xV}) x}{\operatorname{ch}(\chi_x + \chi_{xV}) a} \cos qy \\ \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(y, x) = \left(\underline{H_b} + \underline{H_{bV}} \right) \frac{\operatorname{ch}(\chi_y + \chi_{yV}) y}{\operatorname{ch}(\chi_y + \chi_{yV}) b} \cos px; \end{cases} \quad (13)$$

Третьи условия из (7) - (9) удовлетворяются при $qb = pa = pn/2$.

$$\begin{aligned} \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(a, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + b_{nV}) \cos \frac{\pi n}{2(b + b_V)} y \\ \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(b, x) &= \sum_{i=1}^{\infty} (a_n + a_{nV}) \cos \frac{\pi n}{2(a + a_V)} x; \end{aligned} \quad (14)$$

где a_n, a_{nV} и b_n, b_{nV} коэффициенты Фурье ($n=1, 3, 5...$), определяемые формулами [1]

$$\begin{aligned} (a_n + a_{nV}) &= \frac{2}{2(a + a_V)} \int_{-(a+a_V)}^{+(a+a_V)} \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(b, x) \cos \frac{\pi n x}{2(a + a_V)} = \\ &= \left(\frac{4(\underline{H_b} + \underline{H_{bV}})}{\pi} \right) \sin \frac{\pi n}{2} \\ (b_n + b_{nV}) &= \frac{2}{2(b + b_V)} \int_{-(b+b_V)}^{+(b+b_V)} \left(\underline{H_z} + \underline{H_{zV}} \right)(a, y) \cos \frac{\pi n y}{2(b + b_V)} =; \\ &= \left(\frac{4(\underline{H_a} + \underline{H_{aV}})}{\pi} \right) \sin \frac{\pi n}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

Из выражений (12) - (15) окончательно находят значения

$$\begin{aligned} (\underline{H}_z + \underline{H}_{zy})(x, y) &= (\underline{H}_a + \underline{H}_{ay}) \frac{ch(\chi_x + \chi_{xy})x}{ch(\chi_x + \chi_{xy})a} \varphi_n(y) \\ (\underline{H}_z + \underline{H}_{zy})(y, x) &= (\underline{H}_b + \underline{H}_{by}) \frac{ch(\chi_y + \chi_{yV})y}{ch(\chi_y + \chi_{yV})b} \varphi_n(x); \end{aligned} \quad (16)$$

и тогда уравнение (10) принимает вид

$$\begin{aligned} (\underline{H}_z + \underline{H}_{zy}) &= (\underline{H}_a + \underline{H}_{ay}) \frac{ch(\chi_x + \chi_{xy})x}{ch(\chi_x + \chi_{xy})a} \varphi_n(y) + \\ &+ (\underline{H}_b + \underline{H}_{by}) \frac{ch(\chi_y + \chi_{yV})y}{ch(\chi_y + \chi_{yV})b} \varphi_n(x) \end{aligned} \quad (17)$$

а уравнения (2), (3) принимают вид для плотностей токов $(\underline{\delta}_x + \underline{\delta}_{xV})$ и $(\underline{\delta}_y + \underline{\delta}_{yV})$:

$$\begin{aligned} (\underline{\delta}_x + \underline{\delta}_{xV}) &= \left(\frac{\partial (H(y, x)_z + H(y, x)_{zy})}{\partial y} \right) = \\ &= -\gamma_x (\underline{E}_b + \underline{E}_{bV}) \frac{sh(\chi_y + \chi_{yV})y}{sh(\chi_y + \chi_{yV})b} \varphi_n(x) \\ (\underline{\delta}_y + \underline{\delta}_{yV}) &= \left(\frac{\partial (H(x, y)_z + H(x, y)_{zy})}{\partial x} \right) =; \quad (18) \\ &= -\gamma_y (\underline{E}_a + \underline{E}_{aV}) \frac{sh(\chi_x + \chi_{xV})x}{sh(\chi_x + \chi_{xV})a} \varphi_n(y) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} (\underline{E}_a + \underline{E}_{aV}) &= -(\rho_y \chi_x (\underline{H}_a + \underline{H}_{ay}) h \chi_x a) = -j\omega (\underline{B}_a + \underline{B}_{aV}) a_B \\ (\underline{E}_b + \underline{E}_{bV}) &= -(\rho_x \chi_y (\underline{H}_b + \underline{H}_{by}) h \chi_y b) = -j\omega (\underline{B}_b + \underline{B}_{bV}) a_B; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varphi_n(x) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{\pi n}{2} \cos \frac{\pi n x}{2a} \\ \varphi_n(y) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{\pi n}{2} \cos \frac{\pi n y}{2b}; \end{aligned} \quad (20)$$

$\underline{B}_a, \underline{B}_b, \underline{B}_{aV}, \underline{B}_{bV}$ – комплексы действующих индукций в НМАС от обмотки возбуждения и от обмотки управления, равномерно распределенных на эквивалентных глубинах a_B и b_B , которые позволяют найти участки l_3 и t_3 эквивалентного контура L_3 вихревых токов.

В эквивалентном контуре НМАС действует ЭДС

$$\underline{\mathcal{E}} = \underline{\mathcal{E}}_z + \underline{\mathcal{E}}_y, \quad (21)$$

где $\underline{\mathcal{E}}_z = 2(\underline{E}_a t_3 + \underline{E}_{aV} l_3) = -j\omega \underline{\Phi}$ – ЭДС от обмотки возбуждения;

$\underline{\mathcal{E}}_y = 2(\underline{E}_{aV} t_3 + \underline{E}_{bV} l_3) = -j\omega \underline{\Phi}_y$ – ЭДС от обмотки управления.

Единичные функции (20), представляющие граничные условия, существенного влияния на результаты анализа не оказывают [2] и могут быть положены $\varphi_n(x) = \varphi_n(y) = 1$.

Вихревые токи в эквивалентном контуре $L_3 = 2(t_3 + l_3)$ НМАС находятся путем интегрирования выражений (18):

$$\begin{aligned} (\underline{I}_{tb} + \underline{I}_{tbV}) &= c \int_0^{(a+aV)} (\underline{\delta}_y + \underline{\delta}_{yV}) dx = \frac{c(\underline{E}_a + \underline{E}_{aV})}{\rho(\chi + \chi_V)} \frac{cha - 1}{sh(\chi + \chi_V)a} \\ (\underline{I}_{lb} + \underline{I}_{lbV}) &= c \int_0^{(b+bV)} (\underline{\delta}_x + \underline{\delta}_{xV}) dy = \frac{c(\underline{E}_b + \underline{E}_{bV})}{\rho(\chi + \chi_V)} \frac{chb - 1}{sh(\chi + \chi_V)b}; \end{aligned} \quad (22)$$

Сопротивления НМАС вихревым токам определяются с учетом выражений (19), (21), (22):

$$\begin{aligned} (\underline{Z}_{tB} + \underline{Z}_{tBV}) &= \underline{\mathcal{E}}_t / (\underline{I}_{tB} + \underline{I}_{tBV}) = \frac{t_3}{c(a_E + a_{EV})} \rho e^{j\psi_a} \\ (\underline{Z}_{lB} + \underline{Z}_{lBV}) &= \underline{\mathcal{E}}_l / (\underline{I}_{lB} + \underline{I}_{lBV}) = \frac{l_3}{c(b_E + b_{EV})} \rho e^{j\psi_b}; \end{aligned} \quad (23)$$

полное сопротивление вихревому току запишется как сумма выражений (23)

$$(\underline{Z}_B + \underline{Z}_{BV}) = 2\rho \left(\frac{t_3}{c(a_E + a_{EV})} e^{j\psi_a} + \frac{l_3}{c(b_E + b_{EV})} e^{j\psi_b} \right); \quad (24)$$

где c – удельное электрическое сопротивление НМАС МКЛ; t_3, l_3 – стороны эквивалентного контура вихревых токов; a_E, b_E, a_{EV}, b_{EV} – эквивалентные глубины проникновения электрического поля в НМАС от силового поля и обмоток возбуждения и управления, соответственно; c – средняя длина пути магнитного потока,

$\psi_a, \psi_b, \psi_{aV}, \psi_{bV}$ – углы сдвига между вихревым током и ЭДС по соответствующим направлениям эквивалентного контура НМАС от обмоток возбуждения и управления, соответственно.

Эквивалентные глубины проникновения электрического поля в НМАС определяются с учетом выражений (11)

$$(a_E + a_{EV}) = (b_E + b_{EV}) = \frac{n}{k} \sqrt{\frac{chK_1 - \cos K_2}{chK_1 + \cos K_2}}; \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} K &= a / \Delta = a \sqrt{\omega \gamma (\mu_\sigma + \mu_V)}; \\ K_1 &= K \cos(\pi / 4 - \beta / 2); \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} K_2 &= K \sin(\pi / 4 - \beta / 2); \\ \gamma &= 1 / \rho = \gamma \cos \psi - j \gamma \sin \psi; \end{aligned} \quad (27)$$

$\beta = \arcsin \frac{B_m H_c (\mu_i - \mu_\sigma)}{16 \pi B^2}$ – угол магнитных потерь [1; 2],

B_m – магнитная индукция; H_c – коэрцитивная сила.

Углы сдвига между вихревым током и ЭДС.

$$\begin{aligned}\cos \psi_a = \cos \psi_b &= \frac{K_1 sh K_1 + K_2 \sin K_2}{K \sqrt{sh^2 K_1 + \sin^2 K_2}} \\ \sin \psi_a = \sin \psi_b &= \frac{K_2 sh K_1 + K_1 \sin K_2}{k \sqrt{sh^2 k_1 + \sin^2 k_2}} ; (28)\end{aligned}$$

Сопротивления НМАС магнитопровода намагничивающему току от силового поля и обмоток возбуждения и управления $\underline{I}_\phi = c \underline{H}$ по соответствующим направлениям эквивалентного контура определяются с учетом выражений (19) и (21)

$$\begin{aligned}\left(\underline{Z}_{I\phi} + \underline{Z}_{I\phi\phi}\right) &= \frac{\omega t_3 a_B (\mu_\sigma + \mu_y) e^{j\alpha_a}}{c} \\ \left(\underline{Z}_{I\phi} + \underline{Z}_{I\phi\phi}\right) &= \frac{\omega t_3 b_B (\mu_\sigma + \mu_y) e^{j\alpha_b}}{c}, (29)\end{aligned}$$

а полное сопротивление НМАС магнитопровода намагничивающему току от силового поля, обмоток возбуждения и управления запишется как сумма выражений (29)

$$\left(\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{\phi y}\right) = 2 \frac{\alpha (\mu_\sigma + \mu_y)}{c} (t_3 (a_B + a_{BY}) e^{j\alpha_a} + l_3 (b_B + b_{BY}) e^{j\alpha_b}); (30)$$

где a_b, b_b, a_{by}, b_{by} – эквивалентные глубины проникновения магнитного поля в НМАС от обмотки возбуждения и обмотки управления; μ_y, μ_y – магнитные проницаемости пластины от механического усилия и поля управления; $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_{ay}, \alpha_{by}$ – углы сдвига между намагничивающим током и магнитным потоком по соответствующим направлениям эквивалентного контура от силового поля и обмоток возбуждения и управления соответственно.

Эквивалентные глубины проникновения магнитного поля определяются с учетом выражений (11)

$$(a_B + a_{BY}) = (b_B + b_{BY}) = \frac{n}{k} \sqrt{\frac{chK_1 - \cos K_2}{chK_1 + \cos K_2}} ; (31)$$

где K, K_1 и K_2 – определяются по (25) - (27)

$$(\underline{\mu}_\sigma + \underline{\mu}_y) = (\underline{\mu}_\sigma + \underline{\mu}_y) \cos \alpha - j(\underline{\mu}_\sigma + \underline{\mu}_y) \sin \alpha.$$

Углы сдвига между намагничивающим током и магнитным потоком

$$\begin{aligned}\cos \alpha_a = \cos \alpha_B &= \frac{K_1 sh 2K_1 + K_2 \sin 2K_2}{K \sqrt{sh^2 2K_1 + \sin^2 2K_2}} \\ \sin \alpha_a = \sin \alpha_B &= \frac{K_2 sh 2K_1 + K_1 \sin 2K_2}{k \sqrt{sh^2 2k_1 + \sin^2 2k_2}} ; (32)\end{aligned}$$

При отсутствии поверхностного эффекта, что имеет место при $K = a \sqrt{\omega(\mu_\sigma + \mu_y)\gamma} \leq 0,5$, эквивалентные глубины проникновения электрического и магнитного полей равны $(b_B + b_{BY}) = b$; $(a_B + a_{BY}) = a$, $(b_E + b_{EV}) = (a_E + a_{EV}) = 0,5(a_B + a_{BY})$, а магнитная индукция распределяется равномерно по сечению элемента $B_c = B(a_B + a_{BY})/a$ [1]. При этом можно пренебречь составляющими, пропорциональным круговым функциям в выражениях (1.28) (1.32). Тогда

$$\begin{aligned}\cos \psi &= \sin \alpha = K_2 / K = \sin(\pi/4 - \beta/2) \\ \cos \alpha &= \sin \psi = K_1 / K = \cos(\pi/2 - \psi) ; (33)\end{aligned}$$

С учетом изложенного, сопротивление вихревому току (25) НМАС магнитопровода, приведенное к виткам соответствующей обмотки, приобретает вид:

$$(Z_b + Z_{by}) = \rho \frac{L_3}{c(a_E + a_{EV})} k_n^2 e^{j\psi}; (34)$$

где $L_3 = t + l$ – длина эквивалентного контура вихревых токов; $t = 2b, l = 2a$ – ширина и толщина пластины; $k_n = \omega/\omega_y$ коэффициент приведения сопротивления управляемого элемента к соответствующей обмотке w .

Активная и индуктивная составляющие сопротивления вихревому току равны

$$\begin{aligned}(r_B + r_{BY}) &= (Z_B + Z_{BY}) \cos \psi \\ (x_B + x_{BY}) &= (Z_B + Z_{BY}) \sin \psi ; (35)\end{aligned}$$

$$\left(\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{\phi y}\right) = \frac{\omega(S_3 + S_{3y})}{c} (\mu_\sigma + \mu_y) k_n^2 e^{j\alpha}; (36)$$

где $(S_3 + S_{3y}) = (S + S_y) = L_3(a_B + a_{BY}) = tl$ при отсутствии поверхностного эффекта. Активная и индуктивная составляющая Z_ϕ .

$$\begin{aligned}(r_\phi + r_{\phi y}) &= (Z_\phi + Z_{\phi y}) \sin \alpha \\ (x_\phi + x_{\phi y}) &= (Z_\phi + Z_{\phi y}) \cos \alpha ; (37)\end{aligned}$$

ЭДС эквивалентного контура, приведенная к первичным виткам

$$\mathcal{E} = \omega B_c S_3 w_1 ; (38)$$

Так как сопротивления вихревым и намагничивающим токам расположены параллельно друг другу, то комплекс полного результирующего сопротивления НМАС магнитопровода определяется [1]:

$$\left(\underline{Z}_p + \underline{Z}_{py}\right) = \frac{(\underline{Z}_b + \underline{Z}_{by})(\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{\phi y})}{\left((\underline{Z}_b + \underline{Z}_{by}) + (\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{\phi y})\right)} ; (39)$$

По аналогии определяются активная и реактивная составляющие $(Z_p + Z_{py})$.

При отсутствии поверхностного эффекта ($K \leq 0,5$), что имеет место для НМАС из магнитомягкого феррита, глубины проникновения поля управляемого элемента и его сопротивление вихревому току от обмотки возбуждения и обмотки управления Z_b и Z_{by} практически не зависят от механических напряжений y силы P . Сопротивление же намагничивающему току Z_ϕ и $Z_{\phi y}$ изменяется при действии напряжений y и выражение (36), в зависимости от бокового сжатия НМАС кольцевого магнитопровода с учетом выражений (9) приобретает соответствующий вид [1, 2]:

$$(Z_\phi + Z_{\phi y}) = \frac{\omega(S_s + S_{sy})}{c} \left(\mu_n - \frac{2,25\lambda_s \alpha_s \mu_n^2 P}{\pi^2 B^2 t^2 l} + \mu_y \right) k_n^2 e^{j\alpha}; \quad (40)$$

По найденным значениям Z_p находится напряженность магнитного поля $H = \frac{U_1 w_1}{Z_p l}$ и далее по кривой намагничивания $B = f(H)$ находится B и начальная магнитная проницаемость $\mu_i = B/H$, где U_1 – напряжение питания преобразователя.

Для магнитной цепи конструкции МКЛ на рис. 2 составляется схема замещения, которая представлена на рис. 3.

Для схемы замещения по 2-му закону Кирхгофа составляется система уравнений [1]

$$\begin{cases} U_y + U_k - U_c = U_1 + U_y K_y \\ U_y - U_k - U_z = 0 \end{cases}, \quad (41)$$

где U_y, U_k, U_c, U_z – соответствующие напряжения на обмотках управляемого и компенсационного элемента, контурном конденсаторе C и нагрузке Z ; U_1 – напряжение питания преобразо-

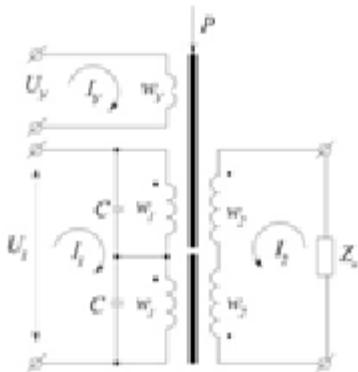


Рис. 3. Схема замещения магнитоанізотропного ключа

вателя; K_y – коэффициент трансформации обмотки управления.

После перехода к магнитным индукциям система уравнений (41) принимает вид:

$$\begin{cases} B_y + B_k - B_c = B_1 + B_y \\ B_y - B_k - B_z = 0 \end{cases}, \quad (42)$$

где B_y, B_k – магнитные индукции в сердечниках управляемого и компенсационного элемента; B_c – магнитная индукция в сердечниках элементов за счет напряжения на конденсаторе; B_1 – магнитная индукция в сердечниках элементов за счет напряжения питания U_1 ; B_z – магнитная индукция в сердечниках элементов за счет напряжения на нагрузке.

Выражения для магнитных индукций запишем в виде

$$\begin{aligned} B_y &= (H_1 + H_2) \mu_y; & B_k &= (H_1 - H_2) \mu_k \\ B_1 &= \frac{U_1}{\omega S w_1}; & B_c &= \frac{2 H_1 c}{\omega^2 S C w_1^2}; & B_y &= \frac{U_y K_y}{\omega S w_1}, \end{aligned} \quad (43)$$

где \dot{I}_1 – напряженность магнитного поля, создаваемая в сердечниках управляемого и компенсационного элемента за счет протекания тока в первичной цепи преобразователя; \dot{I}_2 – напряженность магнитного поля, создаваемая в сердечниках элементов за счет протекания тока во вторичной (измерительной) цепи преобразователя; H_y – напряженность магнитного поля,

создаваемая обмоткой управления; μ_y и μ_k – комплексные магнитные проницаемости управляемого и компенсационного элемента [1]; w_1 и w_2 – число витков обмоток возбуждения и измерительной; S – сечение магнитопроводов силоизмерительных элементов; K_y – коэффициент трансформации обмоток w_1 и w_2 .

После подстановки (43) в систему уравнений (42) она преобразуется к виду:

$$\begin{cases} (H_1 + H_y) \left(\mu_y + \Delta\mu_y + \mu_k - \frac{2c}{\omega^2 S C w_1^2} \right) + \\ + (H_2 + H_y) (\mu_y + \Delta\mu_y - \mu_k) = \frac{U_1}{\omega S w_1} + \frac{U_y K_y}{\omega S w_1} \\ (H_1 + H_y) (\mu_y + \Delta\mu_y - \mu_k) + \\ + (H_2 + H_y) \left(\mu_y + \Delta\mu_y + \mu_k - \frac{c Z_n}{\omega S w_2^2} \right) = 0 \end{cases}; \quad (44)$$

Решением системы уравнений (42) находится напряженность магнитного поля H_2 :

$$H_2 = \frac{(U_1 + U_y K_y)(\mu_y + \Delta\mu_y - \mu_k)\omega C w_1^2 K_T}{2c^2}; \quad (45)$$

где $K_T = \frac{w_2}{w_1}$ – коэффициент трансформации

обмоток w_2 и w_1 .

Выходное напряжение, снимаемое с Z_n , записывается выражением

$$U_i = I_2 Z_i = \frac{H_2 c}{w_2} Z_i, \quad (46)$$

которое после подстановки в него выражения (1.45) приобретает вид:

$$U_n = \frac{(U_1 + U_y K_y)(\mu_y + \Delta\mu_y - \mu_k)\omega C w_1}{2c} Z_n; \quad (47)$$

На выходе обмоток 11 появляется максимальный сигнал, который на Z_n определяется выражением (47) с учетом выражений (9) и имеет вид:

$$U_n = \frac{1,125(U_1 + U_y K_y)\lambda_s \alpha_s \mu_n \omega w_1 P}{\pi^2 B^2 t^2 l c} Z_n, \quad (48)$$

Из выражения (47) видно, что для перевода ключевого элемента во включенное состояние необходимо, чтобы $\Delta\mu_y \geq \Delta\mu$. Это условие позволяет определить величину напряжения, приложенного к обмотке управления:

$$U_y = K_3 \Delta\mu_y H_2 \omega_y S w_y, \quad (49)$$

где ω_y – круговая частота управляющего напряжения; w_y – число витков обмотки управления; $K_3 = 1,3$ – коэффициент запаса, обеспечивающий надежное срабатывание ключа.

При выключении МКЛ $U_y = 0$ все вышеприведенные выражения упрощаются и параметры связанные с этой обмоткой становятся равными нулю, фиксируя выключенное состояние.

Изменение магнитного поля ΔH под действием напряжения на обмотке управления U_y находится из выражения (49), которое после подстановки в него выражения (9) принимает вид:

$$V = \frac{2J_s \Delta H_2}{\beta'} = \frac{0,89 \pi^2 B^2 t^2 I U_y}{\lambda_y C \beta \alpha_s^2 \mu_n^2 P K_3 \omega_y S w_y}. \quad (50)$$

Скорость смещения доменных границ определяется с учетом (1.50) выражением [1]

$$t_{cp} = \frac{\Delta c}{V} = \frac{\lambda_s C \alpha_s^2 \mu_n^2 P K_3 \omega_y S w_y}{0,89 \pi^2 B^2 t^2 I U_y}; \quad (51)$$

где $\beta' = 2\pi\mu_0\lambda_p\gamma / 2v^2 A$ – коэффициент затухания движения границ доменов [1]; λ_p – релаксационная частота; γ – плотность граничной энергии; v – магнитомеханическое отношение; A – обменный параметр; μ_0 – магнитная постоянная.

Время срабатывания ключа определяется временем установки доменов под действием магнитного поля ΔH_2 , т.е. временем удлинения магнитопровода ключа Δc под действием ΔH_2 и определяется с учетом (51) выражением:

$$t_{cp} = \frac{\Delta c}{V} = \frac{\lambda_s C \alpha_s^2 \mu_n^2 P K_3 \omega_y S w_y}{0,89 \pi^2 B^2 t^2 I U_y}; \quad (52)$$

Исходя из равенства потерь в магнитопроводе и обмотках ключа можно приближенно определить максимальную коммутируемую мощность:

$$Q_{k,max} = \frac{f B_s Q_a S^2 10^{12}}{1,5 \delta G}; \quad (53)$$

где f – частота; B_s – индукция насыщения магнитопровода; Q_a – потери в магнитопроводе; S – сечение магнитопровода; G – вес магнитопровода; δ – плотность тока в обмотке.

Разработанная методика была использована для расчета МКЛ на ферритовых кольцах 10□6□4,5 мм марки 2000 НМ1 при следующих исходных данных: $U_1 = 4,5$ В; $f = f_y = 40$ кГц; $U_y = 0,8$ В; $P_{max} = 50$ Вт; $w_1 = w_y = 50$; $w_2 = 100$; $C = 50$ пФ.

В результате расчета получено: $\mu_n = 39,4 \cdot 10^4$ Гн/м; $\Delta\mu_y = \Delta\mu = 15,4 \cdot 10^4$ Гн/м; $Z_b = 2,88 \cdot 10^6$ Ом; $Z_\phi = 882$ Ом; $Z_p = 882$ Ом; $Q_{k,max} = 1,1$ Вт; $t_{cp} = 1,75 \cdot 10^{-9}$ с.

Используя выражение (48) для данного МКЛ построена расчетная выходная статическая характеристика $U_n = f(U_y)$, которая представлена на рис. 4 совместно с экспериментальной зависимостью.

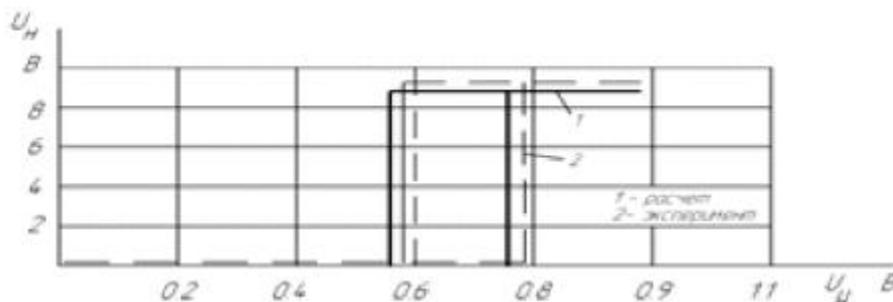


Рис. 4. Выходная статическая характеристика МКЛ $U = f(U_y)$

Параметры включения и выключения на рис. 4 отличаются друг от друга вследствие внутренней вязкости феррита, т. е. наличия гистерезиса.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что сходимость выходных характеристик не превышает 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубинин А. Е., Кислицын А. Л.* Магнитоанізотропные устройства автоматизированных систем. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 372 с.
2. *Дубинин А. Е.* Магнитоанізотропные преобразователи силы. М.: Энергоатомиздат, 1991. 112 с.
3. Патент на полезную модель № 81861 Российская Федерация МПК Н03К 17/00. Ключевой элемент / *Дубинин А. Е., Капитуров Р. Е., Бородин А. В.*; 2009. № 9.

THE STUDY OF MAGNETIC-ANISOTROPIC KEY ELEMENTS FOR THE TRACTION MOTOR CONTROL SYSTEM

© 2010 A.Ye. Dubinin, R.Ye. Kapiturov, A.A. Dubinin

Samara State University of Railway Transport

The magneto-anisotropic key element and its mathematical model are studied in the two-dimensional space. The magnetic conductor under control is replaced with an equivalent wafer in the electromagnetic field affected by force action; the wafer's mathematical model is described as the system of differential equations according to the electromagnetic field theory, ferromagnetism, and the elasticity theory. For the key magnetic circuit there is an equivalent circuit which is represented by the system of algebraic equations. The solution of differential and algebraic equations enables us to identify electric and magnetic parameters of the key and to build its output static characteristic.

Key words: information and measurement control system, traction motor, brush-manifold unit, magnetic-anisotropic key element, magnetic conductor, output static characteristic, strained magnetic-anisotropic structure, mathematical model.