

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛА С УЧЕТОМ ПОТОКОВ ВЫПУЧИВАНИЯ И РАССЕЯНИЯ

А. Е. СИМАКОВ, М. А. ТЫГЫШКИН

(Представлена научным семинаром кафедры автоматики и телемеханики)

Для преобразования углов отклонений в датчиках систем автоматического контроля используются бесконтактные трансформаторные преобразователи угла [1, 2, 3]. В следящих системах подобные преобразователи иногда называют «следящим трансформатором» [4].

Одним из этапов расчета таких преобразователей является расчет его магнитной цепи: определение магнитных сопротивлений стальных участков, проводимостей воздушных зазоров, определение требуемой намагничивающей силы. От точности расчета магнитной цепи зависит точность расчета статической характеристики преобразователя, его реактивных сил и моментов.

Расчет с учетом сопротивления стали может быть осуществлен исходя из представления сопротивления стали в комплексной форме [5, 6]. Для устранения влияния сопротивления стальных участков магнитной цепи на статические характеристики рассматриваемые преобразователи работают, как правило, в режиме малого насыщения, при этом основное сопротивление магнитному потоку оказывают только воздушные зазоры.

Трансформаторные преобразователи угла распространены главным образом как преобразователи двухстороннего действия с симметричной магнитной цепью. В таких преобразователях все четыре полюсных наконечника одинаковы [2]. Когда же требуется преобразовывать отклонения только одного знака, один полюсный наконечник может быть сделан короче трех других (рис. 1, а).

Необходимость в укороченном полюсном наконечнике, когда отношение длины нормального полюса к зазору велико, обусловлена в основном требованием устранения реактивного момента в нулевом положении якоря. При малых полюсных наконечниках и больших зазорах разница в длинах полюсных наконечников может привести, кроме того, к большой величине рассогласования в нулевом положении якоря. Влияние длины укороченного полюсного наконечника на реактивный момент и рассогласование рассмотрено в работе [7].

В данной статье приводится методика расчета магнитной цепи без учета сопротивления стали, в основу которой положены работы проф. Б. К. Буля по теории и расчету магнитных цепей [8, 9, 10].

Преобразователь рассматривается с обмоткой возбуждения на средней и сигнальными обмотками, включенными встречно — на крайних полюсах.

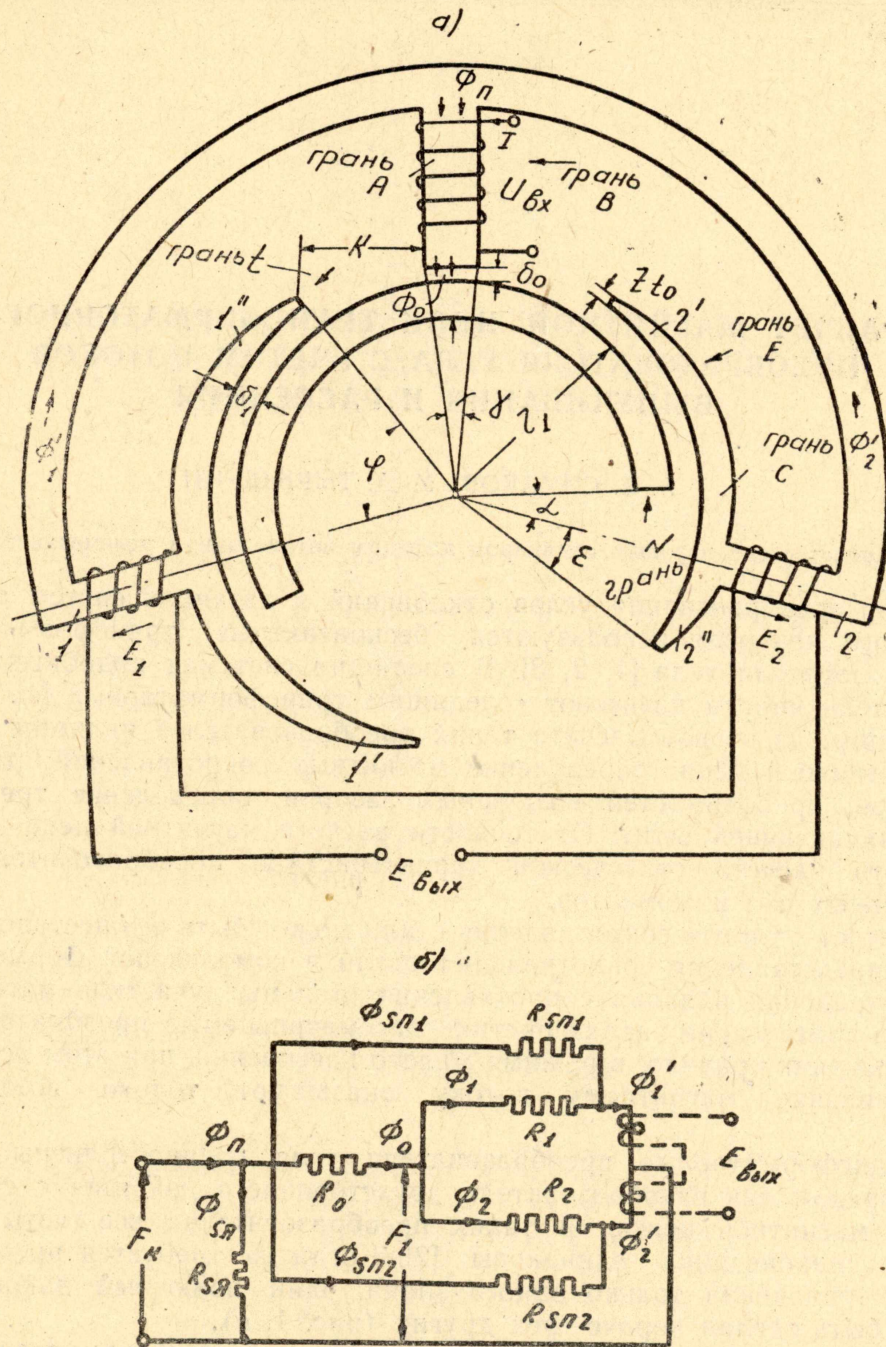


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и схема замещения магнитной цепи (б) трансформаторного преобразователя угла без учета сопротивления стали и разомкнутом выходе

Для токов эдс напряжений приняты действующие значения, для индукции и магнитного потока — максимальные.

С учетом активного сопротивления провода обмотки возбуждения число витков этой обмотки [10]

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{вх}}}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}}, \quad (1)$$

где

$U_{\text{вх}}$ — напряжение источника питания,

$$C_1 = \rho l_{\text{ср}} i_q, \quad C_2 = \frac{\omega \Phi_{\text{п}}}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Здесь ρ — удельное электрическое сопротивление обмоточного провода;

i_q — плотность тока в проводе катушки возбуждения,

ω — частота источника питания.

Магнитный поток в сердечнике полюса обмотки возбуждения

$$\Phi_{\text{п}} = B_m S, \quad (3)$$

где S — его сечение,

B_m — магнитная индукция в сердечнике.

Средняя длина витка (рис. 2а, б)

$$\begin{aligned} l_{\text{ср}} &= 2(a' + b') + \pi H, \\ a' &= a + 2\Delta_1, \\ b' &= b + 2\Delta_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения намагничивающей силы, обеспечивающей заданный магнитный поток $\Phi_{\text{п}}$, необходимо определить магнитные проводимости зазоров.

Рассчитать эти проводимости с учетом выпучивания можно аналитически или построением картины поля. Аналитически удельные проводимости выпучивания могут быть определены с помощью экспериментальных кривых проф. Б. К. Буля [9] при соответствующих соотношениях параметров магнитопровода [7]. Следует, однако, иметь в виду, что непосредственно использовать кривые Б. К. Буля, которые получены для случая «полюс — плоскость», без большой погрешности можно только для преобразователей с большими радиусами r_1 (рис. 1, а), когда кривизна якоря незначительна. При малых r_1 действительная удельная проводимость выпучивания будет меньше удельной проводимости, определенной из кривых Б. К. Буля.

В данной статье приводится методика определения проводимостей зазоров построением картин поля. Условимся ниже обозначать величины, относящиеся к левой половине преобразователя (полюс сигнальной обмотки 1): магнитные проводимости, магнитные потоки и т. п. — с индексом 1, а те же величины, относящиеся к правой половине (полюс сигнальной обмотки 2), — с индексом 2.

Для построения картины поля необходимо знать магнитный потенциал, под которым находится якорь. В соответствии со схемой замещения магнитной цепи (рис. 1, б, без учета сопротивления стальных участков) магнитный потенциал якоря

$$F_1 = \frac{G_0}{G_1 + G_2 + G_0} F_k, \quad (5)$$

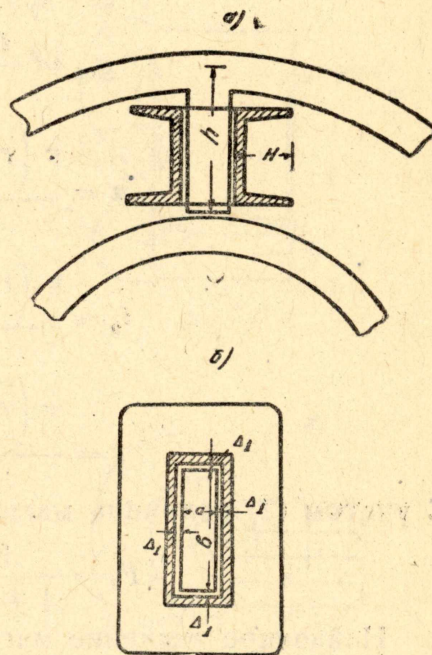


Рис. 2. К определению числа витков обмотки возбуждения.

$$G_0 = \frac{1}{R_0}, \quad G_1 = \frac{1}{R_1}, \quad G_2 = \frac{1}{R_2}.$$

Магнитные проводимости воздушных зазоров—полюса обмотки возбуждения G_0 и полюсов сигнальных обмоток G_1 и G_2 —здесь можно приближенно определить аналитически. Без учета выпучивания эти проводимости определяются только параметрами основных зазоров. При этом условии для F_1 можно записать:

$$F_1 \approx \frac{g_{00}}{g_{01} + g_{02} + g_{00}} F_{\kappa}, \quad (6)$$

где g_{00} , g_{01} , g_{02} —удельные проводимости основных зазоров, которые определяются (при $-\varepsilon \leq \alpha \leq \varphi$):

$$\begin{aligned} g_{00} &= \frac{a}{\delta_0}, \quad g_{01} = \frac{l_0 + x}{\delta_1}, \\ g_{02} &= \frac{l_0 - x}{\delta_1}; \\ a &= \frac{\pi \left(r_1 + \frac{\delta_0}{2} \right) \gamma}{180}, \\ l_0 &= \frac{\pi \left(r_1 + \frac{\delta_1}{2} \right) \varphi}{180}, \\ x &= \frac{\pi \left(r_1 + \frac{\delta_1}{2} \right) \alpha}{180}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом (7) величина магнитного потенциала якоря

$$F_1 = \frac{1}{1 + \kappa l_0} F_{\kappa}, \quad \kappa = 2 \frac{\delta_0}{\delta_1 a}. \quad (8)$$

Найденное значение магнитного потенциала F_1 будет несколько отличаться от действительного ввиду наличия выпучивания.

В соответствии с картинками поля, приведенными на рис. 3 а, б, в, определим проводимости рабочих воздушных зазоров, а также проводимости рассеяния. Область отклонения якоря ограничена при этом пределами: $-\varepsilon \leq \alpha \leq \varphi$.

Проводимость зазора полюса обмотки возбуждения

$$G_0 = \mu_0 \left[\frac{(a - 2a_1)}{\delta_0} (b - 2b_1) + 2b g_{вт} + 2a g_{ат} \right], \quad (9)$$

$$\mu_0 = 0,4 \pi 10^{-8} \frac{2H}{сМ},$$

где $g_{вт}$ и $g_{ат}$ —удельные проводимости выпучивания с торца полюса и его граней В и А (рис. 1, а). Величина $g_{вт}$ определяется из картины поля рис. 3, а, а $g_{ат}$ —из картины поля рис. 3, б:

$$g_{вт} = \left(\frac{1}{2} + \frac{4}{4} \right), \quad (10)$$

$$g_{ат} = \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{1}{8} \right).$$

Проводимости зазоров полюсов сигнальных обмоток

$$G_1 = \mu_0 \left\{ \frac{[(l_0 - l_1 - l_2) + x]}{\delta_1} (b - 2b_2) + b(g_{тп_1} + g_{т_1}) + 2(l_0 + x)g_{тс} \right\}, \quad (11)$$

$$G_2 = \mu_0 \left\{ \frac{[(l_0 - l_3 - l_4) - x]}{\delta_1} (b - 2b_2) + b(g_{тп_2} + g_{т_2}) + 2(l_0 - x)g_{тс} \right\},$$

где

$g_{тп_1}$ и $g_{тп_2}$ — удельные проводимости выпучивания с торцов полюсных наконечников граней N и внутренней грани F якоря;

$g_{т_1}$ и $g_{т_2}$ — удельные проводимости выпучивания с торцов полюсных наконечников и их граней t ;

$g_{тс}$ — удельная проводимость выпучивания с торцов полюсных наконечников, а также их граней C и E .

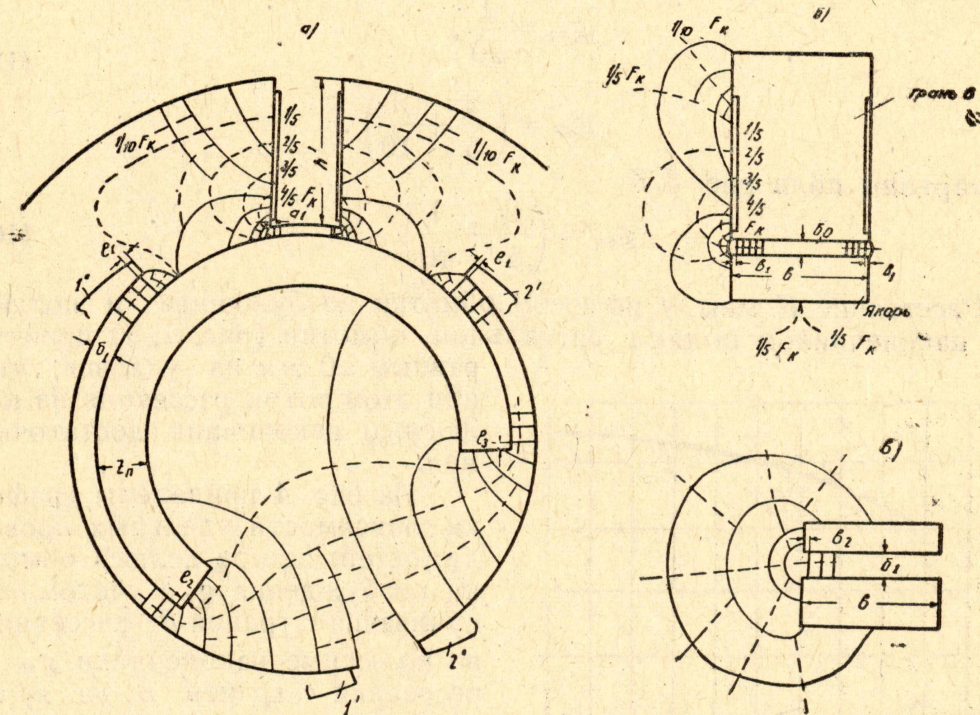


Рис. 3. Картины поля к определению магнитных проводимостей воздушных зазоров с учетом выпучивания и рассеяния. Параметры преобразователя: $\gamma = 18^\circ$, $\psi = 75^\circ$, $r_1 = 3$ мм, $\epsilon = 30^\circ$, $z_n = 7$ мм, $K = 2$ мм, $z_{10} = 2$ мм, $b = 2$ мм, $\delta_0 = 2$ мм, $\delta_1 = 4$ мм, $h^1 = 2$ мм, масштаб 2:1

Величину $g_{тс}$ можно приближенно считать постоянной вдоль скошенного наконечника [7].

В соответствии с картиной поля рис. 3, а

$$g_{тп_1} = \left(\frac{2}{2} + \frac{3}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} \right),$$

$$g_{тп_2} = \left(\frac{2}{2} + \frac{4}{4} + \frac{1}{16} \right), \quad (12)$$

$$g_{т_1} = g_{т_2} = \frac{1}{2}.$$

Из картины поля рис. 3, в

$$g_{тс} = \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{4} + \frac{1}{8} \right). \quad (13)$$

Проводимости рассеяния на ярмо и полюсные наконечники, соответственно

$$G_{ср} = \mu_0 (2g_{sb} b + 2g_{sa} a), \quad (14)$$

$$G_{сп} = 2\mu_0 g_{сп} b,$$

где

g_{sa} и g_{sb} — удельные проводимости рассеяния на ярмо, соответственно с граней B и A полюса обмотки возбуждения;

$g_{сп}$ — удельная проводимость рассеяния с грани B на полюсной наконечник.

Из картины поля рис. 3, а,

$$g_{сп} = \frac{1}{20}, \quad (15)$$

$$g_{sb} = \left(\frac{2}{5} + \frac{1}{10} \right).$$

Из картины поля рис. 3, б

$$g_{sa} = \left(\frac{2}{5} + \frac{1}{10} \right). \quad (16)$$

Расстояние K между полюсом обмотки возбуждения и полюсным наконечником полюса сигнальной обмотки (рис. 1, а) принято равным 20 мм из условия, что при этом поток рассеяния на полюсный наконечник достаточно мал.

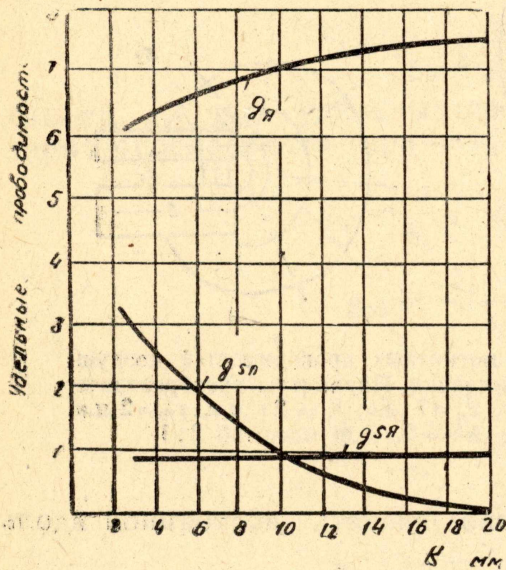


Рис. 4. Зависимости удельных проводимостей от расстояния между полюсом обмотки возбуждения и полюсным наконечником.

На рис. 4 приведены графики зависимости удельных проводимостей: зазора полюса обмотки возбуждения $g_{я}$ с учетом выпучивания с граней B , рассеяния на полюсные наконечники $g_{сп}$ и рассеяния с граней B на ярмо $g_{ср}$ от расстояния K . Эти зависимости построены на основе картин поля при различных K . Картина поля при $K = 20$ мм приведена на рис. 3, а.

Величины удельных проводимостей на графиках рис. 4 определены:

$$\begin{aligned} g'_{я} &= (a - 2a_1) + 2g_{bя}, \\ g'_{сп} &= 2g_{сп}, \\ g'_{ср} &= 2g_{sb}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для обеспечения заданной индукции в сердечнике обмотки возбуждения B_m необходимая величина намагничивающей силы

$$F_k = \frac{\Phi_{п}}{\sqrt{2} G_{экр}}, \quad (18)$$

где $G_{\text{экр}}$ — эквивалентная проводимость магнитной цепи, которая определяется:

$$G_{\text{экр}} = \frac{G_0(G_1 + G_2)}{G_0 + G_1 + G_2} \quad (19)$$

Магнитный поток в зазоре полюса обмотки возбуждения (в соответствии со схемой замещения, рис. 1, б):

$$\Phi_0 = \Phi_{\text{п}} - (\Phi_{\text{сп}} + \Phi_{\text{ся}}), \quad (20)$$

где $\Phi_{\text{сп}}$ и $\Phi_{\text{ся}}$ — потоки рассеяния на полюсные наконечники и ярмо. Эти потоки определяются:

$$\Phi_{\text{сп}} = \sqrt{2} F_{\text{к}} G_{\text{сп}}, \quad (21)$$

$$\Phi_{\text{ся}} = \sqrt{2} F_{\text{к}} F_{\text{ся}}.$$

Эдс., индуцируемые в сигнальных обмотках:

$$E_1 = \frac{\omega \omega_{\text{с}}}{\sqrt{2}} \Phi_1', \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{\omega \omega_{\text{с}}}{\sqrt{2}} \Phi_2',$$

где Φ_1' и Φ_2' — магнитные потоки в сердечниках сигнальных обмоток 1 и 2.

Величина этих потоков определяется:

$$\begin{aligned} \Phi_1' &= \frac{G_1}{G_1 + G_2} \Phi_0 + \Phi_{\text{сп}1}, \\ \Phi_2' &= \frac{G_2}{G_1 + G_2} \Phi_0 + \Phi_{\text{с}}, \\ \Phi_{\text{сп}1} &= \Phi_{\text{сп}2} = -\frac{\Phi_{\text{сп}}}{2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Эдс. на выходе преобразователя:

$$E_{\text{вых}} = E_1 - E_2 = \frac{\omega \omega_{\text{с}}}{\sqrt{2}} \Phi_0 \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2}. \quad (24)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета магнитной цепи, когда выпучивание и рассеяние не учитываются. Там же с целью сопоставления приведены результаты расчета с учетом выпучивания и рассеяния.

Таблица 1

Методика расчет	$G_0 \times 10^{-8}$	$G_1 \times 10^{-8}$	$G_2 \times 10^{-8}$	$G_{\text{экр}} \times 10^{-8}$	$F_{\text{к}}$	$E_{\text{вых}}$
	генри					
Без учета выпучивания и рассеяния	12,56	36,8	16,6	10,2	560	13,4
С учетом выпучивания и рассеяния	28,8	53	28	17,0	330	8,3

Индукция B_m в сердечнике полюса обмотки возбуждения была принята равной $0,4:10^{-4}$ вб/см², число витков сигнальной обмотки —

2000 витков, частота источника питания — 50 гц, положение якоря $\alpha = 28^\circ$. Параметры преобразователя приведены в подрисуночной подписи рис. 3.

Приведенная методика расчета была проверена на модели преобразователя угла, использованного в опытном образце датчика скорости потоков с чувствительным элементом — отклоняющейся заслонкой [3, 7], изготовленного на шахте им. Вахрушева в Кузбассе. Погрешность расчета при этом была порядка 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Агейкин, ред. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. Машгиз, 1959.
2. Н. Н. Чистяков. Электрические авиационные приборы. Оборонгиз, 1950.
3. М. А. Тырышкин. Датчики скорости вентиляционных потоков с чувствительным элементом — отклоняющейся заслонкой и трансформаторным преобразователем угла. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, № 12, 1963.
4. В. А. Бесекерский и др. Проектирование следящих систем. Судпромгиз, 1958.
5. Н. Н. Шумиловский. Комплексный метод расчета магнитных цепей. Автоматика и телемеханика, № 4, 1940.
6. Б. К. Буль. Расчет магнитных цепей с сосредоточенной намагничивающей силой. Автоматика и телемеханика, № 6, 1952.
7. М. А. Тырышкин. Датчики скорости шахтных вентиляционных потоков. Кандидатская диссертация, 1962.
8. Б. К. Буль. Графоаналитический метод расчета магнитных проводимостей электрических аппаратов. Электричество, № 3, 1961.
9. Б. К. Буль. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров для круглых и прямоугольных полюсов. Пособие по проектированию. Заочный энергетический институт, 1961.
10. Б. К. Буль. Метод расчета катушки со сталью на переменном токе. Электричество, № 8, 1954.