

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано в устройствах, требующих постоянства тягового усилия, в частности, в приводах пишущих устройств графопостроителей для достижения постоянного усилия нажатия пишущего элемента на носитель информации при неровностях и перекосах поверхности носителя информации.

Известна поляризованная электромагнитная система, использованная в электромагнитном клапане [1], включающем в себя электромагнит с магнитопроводом и двумя катушками, между которыми установлен постоянный магнит, подпружиненный якорь, имеющий два крайних фиксированных положения. Принцип действия этой системы основан на создании суммарного тягового усилия, воздействующего на якорь, складывающегося из электромагнитного усилия, созданного магнитным потоком от тока в катушках, протекающим через воздушные зазоры между якорем и магнитопроводом, механического усилия пружины и усилия, создаваемого магнитным потоком постоянного магнита, который распределяется пропорционально магнитным сопротивлениям воздушных зазоров.

Недостатком данного способа формирования тягового усилия в этой поляризованной системе является отсутствие постоянства суммарного тягового усилия на рабочем участке хода якоря, т.е. присуща нелинейная зависимость суммарного тягового усилия от положения якоря. При максимальном воздушном зазоре между нижним торцевым концом якоря и магнитопроводом возникающее суммарное тяговое усилие мало и наоборот, оно резко возрастает при уменьшении указанного воздушного зазора в процессе перемещения якоря.

Частично данный недостаток был устранен скосом нижней торцевой поверхности якоря и соответствующей поверхности магнитопровода в способе формирования тягового усилия в поляризованной электромагнитной системе [2], в которой втяжной якорь находится под суммарным воздействием потока постоянного магнита и возвратной пружины, причем величину угла скоса конического стопа втяжного якоря определяют в зависимости от заданного тягового усилия.

В данном случае улучшается плавность изменения суммарного тягового усилия в процессе перемещения якоря, однако не устраняется нелинейность тяговой характеристики, т.е. не достигается постоянства тягового усилия. Отсутствие постоянства тягового усилия приводит к некачественному выполнению технологической операции, выполняемой рабочим инструментом, жестко закрепленным к подвижному якорю, в частности, пишущего элемента, усилие нажатия которого на носитель информации определяет ширину вычерчиваемой линии и четкость по всей поверхности листа при его перекосе и неровности поверхности.

Отсутствие способа определения величины угла скоса приводит к тому, что его пытаются определить методом подбора. Такой подход является продолжительным и не точным. Обладает достаточно большим разбросом относительно требуемой зависимости тягового усилия от положения хода якоря.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствования способа формирования тягового усилия в поляризованной электромагнитной системе, в котором путем определения действительной величины угла скоса втяжного якоря в заданных точках его перемещения из исходного положения в рабочее обеспечивается постоянство суммарного усилия на всем рабочем участке перемещения, благодаря чему исключается влияние внешних воздействий на формирование тягового усилия.

Поставленная задача решается тем, что в способе формирования тягового усилия в поляризованной электромагнитной системе с втяжным якорем с коническим стопом, в которой втяжной якорь находится под суммарным воздействием потока постоянного магнита и возвратной пружины, причем величину угла скоса конического стопа втяжного якоря определяют в зависимости от заданного тягового усилия, согласно изобретению при постоянном тяговом усилии, втяжной якорь перемещают из исходного положения в рабочее и определяют предварительную величину угла скоса в каждой из заранее заданных точек перемещения, при этом указанную величину предварительного угла скоса определяют по формуле

$$\gamma_n = \arccos \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4ac}}{-2a}},$$

где  $\gamma_n$  - величина предварительного угла скоса якоря;

a, b, c - коэффициенты биквадратного уравнения

$$-a \cdot \cos^4 \gamma + B \cdot \cos^2 \gamma - c = 0,$$

$$a = \Phi_0^2 \cdot \delta_1^2 \cdot K_\delta^2 + 2 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta \cdot \delta_2^2 \times \\ \times K_\delta^2 \cdot (K \cdot \delta_1 + F_{const}),$$

$$b = \Phi_0^2 \cdot \delta_1^2 \cdot K_\delta^2 + 2 \cdot \Phi_0 \cdot I \cdot W \times \\ \times K_\delta \cdot \mu_0 \cdot S_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2) - 4 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta \cdot K_\delta^2 \times \\ \times \delta_1 \cdot \delta_2 (K \cdot \delta_1 + F_{const}) + \mu_0^2 \cdot S_\delta^2 \cdot (I \cdot W)^2 \\ c = \mu_0 \cdot S_\delta \cdot [\mu_0 \cdot S_\delta \cdot (I \cdot W)^2 + \\ + \delta_1 \cdot 2 \cdot K_\delta^2 \cdot (K \delta_1 + F_{const})],$$

$\delta_1, \delta_2$  - величины смещения концов якоря относительно концов магнитопровода;

$K_\delta$  - коэффициент рассеяния магнитной цепи для потока катушек;

I - ток, протекающий в последовательно соединенных катушках;

W - суммарное число витков обеих катушек;

$S_0$  - площадь поперечного сечения верхнего воздушного зазора, образованного прямыми торцевыми поверхностями якоря и магнитопровода;

$\mu_0$  - магнитная постоянная;  
 $\Phi_0$  - магнитный поток постоянного магнита;  
 $K$  - коэффициент жесткости упругого элемента;  
 $F_{const}$  - постоянное заданное тяговое усилие.

и находят величину действительного угла скоса тяжного якоря по среднеарифметическому значению суммы величин предварительных углов скоса.

Предложенное техническое решение поясняется чертежом, где на фиг. 1 изображен общий вид поляризованной электромагнитной системы, на фиг. 2 - прохождение магнитных потоков в системе и силы, действующие на подвижную часть; на фиг. 3 - расположение якоря в системе; на фиг. 4 - схема замещения магнитной цепи поляризованной электромагнитной системы; на фиг. 5 - графическое определение суммарного тягового усилия системы в зависимости от величины смещения углового скоса якоря от соответствующего конца магнитопровода; на фиг. 6 - зависимость суммарного тягового усилия системы от величины смещения якоря в рабочем диапазоне перемещения.

Поляризованная магнитная система поясняется конструкцией на фиг. 1, содержащей корпус 1, на котором закреплены неподвижно магнитопровод 2 с катушками 3, между которыми установлен постоянный магнит 4. Подвижный якорь 5 размещен между концами 6 и 7 магнитопровода 2. Один конец якоря 5 выполнен с угловым скосом 8, как и соответствующий ему конец 7 магнитопровода 2. Якорь жестко прикреплен к подвижному элементу 9 (на котором

может закрепляться рабочий орган, в частности пирующий стержень), который через упругие элементы 10 (пластичная пружина) крепится к корпусу 1. Воздушные зазоры между якорем и магнитопроводом и величины смещения концов якоря от концов магнитопровода указаны на фиг. 3 через  $\delta_B$ ,  $\delta_H$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , соответственно. Усилия, действующие на якорь, указаны на фиг. 2 через  $F_{\Sigma}$ ,  $F_{np}$ ,  $F_T$ ,  $F_{эл.м.}$ , а магнитные потоки, создаваемые током, протекающим в катушках, и постоянным магнитом, указаны на фиг. 2 через  $\Phi_{обм.}$ ,  $\Phi_0$ ,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ . Магнитные сопротивления постоянного магнита, верхнего и нижнего воздушных зазоров, а также м.д.с. постоянного магнита и обеих катушек указаны на фиг. 4 через  $R_M$ ,  $R_{\delta_B}$ ,  $R_{\delta_H}$ ,  $F_m$  и  $F_{обм.}$  соответственно.

Реализация способа происходит следующим образом. Магнитная система должна быть ненасыщена. Учитывая, что между якорем 5 и постоянным магнитом 4 воздушный зазор ( $\delta_3$  на фиг. 3) достаточно мал, то пренебрегаем его магнитным сопротивлением. Учитывая, что массы подвижного элемента 9 (с пиющим стержнем), а также закрепленного на нем якоря 5 - малы, то пренебрегаем силой  $F_T = m \cdot g$  (см, фиг. 2), где  $g$  - ускорение свободного падения. Верхний воздушный зазор  $\delta_B$  в процессе перемещения якоря 5 всегда равен величине смещения  $\delta_1$  верхнего конца якоря относительно верхней части

6 магнитопровода 2, в нижний воздушный зазор  $\delta_H$  образуется при смещении нижнего конца 8 якоря 5 относительно нижней части 7 магнитопровода 2. Учитывая, что конец якоря 8, как и соответствующий ему конец 7 магнитопровода 2, выполнены со скосом на угол  $\gamma$  к горизонтали, то величина воздушного зазора  $\delta_H$  определяется произведением величины смещения  $\delta_2$  нижнего конца 8 якоря относительно нижней части 7 магнитопровода 2 на  $\cos \gamma$ , т.е.  $\delta_H = \delta_2 \cos \gamma$ .

Расстояние  $d$  между верхним концом 6 магнитопровода 2 и верхней поверхностью постоянного магнита 4 должно быть больше или равно сумме величин смещений  $\delta_1 + \delta_2$ , т.е.  $d \geq \delta_1 + \delta_2$ , а расстояние  $l$  между концом 7 магнитопровода 2 и нижней поверхностью постоянного магнита 4 не должно превышать расстояния  $d$ , т.е.  $l < d$ . Размер боковой поверхности якоря, обращенной к постоянному магниту 4, определяется по формуле  $h_{я} \geq h_m + d$ , где  $h_m$  - размер магнита 4 по вертикали.

Плоские пружины 10, с которыми соединен подвижный элемент 9 с якорем 5, подбирают так, чтобы полностью компенсировать усилие притяжения якоря к постоянному магниту 4, что предотвратит прилипание якоря 5 к торцевой поверхности постоянного магнита 4.

Общий вид выражения для сил, под действием которых осуществляется перемещение якоря, определяется по формуле

$$F_{\Sigma} = F_{эл.м.} - F_{np.}, \quad (1)$$

где  $F_{\Sigma}$  - суммарное тяговое усилие, действующее на якорь;

$F_{эл.м.}$  - тяговое усилие, созданное магнитными потоками катушек 3 и постоянного магнита 4;

$F_{np} = K \cdot \delta_1$  - усилие сопротивления упругих элементов 10 (плоских пружин), усилию  $F_{эл.м.}$ , где  $K$  - коэффициент жесткости. Тяговое усилие  $F_{эл.м.}$  определяют как разность тяговых усилий в нижнем  $\delta_H$  и верхнем  $\delta_B$  воздушных зазорах

$$F_{эл.м.} = F_H - F_B, \quad (2)$$

где  $F_B$ ,  $F_H$  - тяговые усилия в верхнем  $\delta_H$  и нижнем  $\delta_B$  воздушных зазорах, соответственно.

Определим составляющие тягового усилия в выражении (2)  $F_B$  и  $F_H$ .

В соответствии со схемой прохождения магнитных потоков (см. фиг. 2) и схемой замещения проведенной на фиг. 4 при обесточенных катушках, т.е.  $I = 0$ , а следовательно, и  $F_{обм.} = 0$ , так как  $F_{обм.} = I \cdot W$ , где  $I$  - ток, протекающий в последовательно соединенных катушках 3 фиг. 1,  $W$  - суммарное число витков обеих катушек

$$\frac{R_{\delta_B}}{R_{\delta_H}} = \frac{\delta_1}{\delta_2 \cos^2 \gamma}$$

3 фиг. 1. и соотношений находим поток постоянного магнита

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (3)$$

$$\Phi_1 = \Phi_0 \cdot \frac{\delta_2 \cdot \cos^2 \gamma}{\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma}$$

где  $\Phi_0$  - поток в зазоре  $\delta_B$  от постоянного магнита;

$$\Phi_2 = \Phi_0 \cdot \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma}$$

- поток в зазоре  $\delta_H$  от постоянного магнита.

Резльтирующее значение потоков в воздушных зазорах  $\delta_B$  и  $\delta_H$ , создаваемых постоянным магнитом 4 и катушками 3 при движении якоря 5 в направлении рабочего перемещения из верхнего крайнего положения в нижнее:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_1 - \Phi_{обм.} = \\ &= \Phi_0 \cdot \frac{\delta_2 \cdot \cos^2 \gamma}{\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma} - \\ &\quad - \frac{I \cdot W \cdot \mu_0 \cdot S\delta}{K_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \Phi_2 + \Phi_{обм.} = \Phi_0 \cdot \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma} + \\ &\quad + \frac{I \cdot W \cdot \mu_0 \cdot S\delta}{K_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Phi_{обм.} = \frac{I \cdot W \cdot \mu_0 \cdot S\delta}{K_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)},$$

где  $\Phi_{обм.}$  - магнитный поток, созданный катушками 3;

$K_\delta$  - коэффициент рассеяния магнитной цепи для потока катушек 3;

$\mu_0$  - магнитная постоянная;

$S_\delta$  - площадь поперечного сечения верхнего воздушного зазора  $\delta_B$ .

Тяговые усилия в воздушных зазорах  $\delta_B$  и  $\delta_H$

$$F_B = \frac{\Phi_1^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta}; \quad (6)$$

$$F_H = \frac{\Phi_2^2 \cdot \cos^2 \gamma}{2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta} \quad (7)$$

Из формул (2), (4), (5), (6) и (7) определяет тяговое усилие  $F_{эл.м.}$ :

$$\begin{aligned} F_{эл.м.} &= F_H - F_B = \frac{\Phi_2^2 \cdot \cos^2 \gamma - \Phi_1^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta} = \\ &= \frac{\Phi_0^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot (\delta_1^2 - \delta_2^2 \cdot \cos^2 \gamma)}{(\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2 \cdot 2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta} + \\ &\quad + \frac{\Phi_0 \cdot \cos^2 \gamma \cdot I \cdot W \cdot (\delta_1 + \delta_2)}{K_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2} + \\ &\quad + \frac{(I \cdot W)^2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta(\cos^2 \gamma - 1)}{2 \cdot K_\delta^2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив (8) в (1) получим выражение суммарного тягового усилия, действующего на якорь:

$$\begin{aligned} F_\Sigma &= \frac{\Phi_0^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot (\delta_1^2 - \delta_2^2 \cdot \cos^2 \gamma)}{(\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2 \cdot 2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta} + \\ &\quad + \frac{\Phi_0 \cdot \cos^2 \gamma \cdot I \cdot W \cdot (\delta_1 + \delta_2)}{K_\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2} + \\ &\quad + \frac{(I \cdot W)^2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta(\cos^2 \gamma - 1)}{2 \cdot K_\delta^2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 \cdot \cos^2 \gamma)^2} - \\ &\quad - K \cdot \delta_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Для перемещения якоря 5 из рабочего положения в исходное верхнее крайнее положение необходимо изменить направление протекания тока в катушках 3, в результате чего усилие  $F_{эл.м.}$  изменит знак на противоположный, т.е. теперь направление его действия совпадает с направлением действия усилия плоских пружин 10, и под действием этих двух усилий якорь переместится в верхнее нерабочее положение.

Преобразовав полученное уравнение (9) с неизвестной величиной  $\cos \gamma$ , находим выражение для определения промежуточных величин угла  $\gamma$  скоса якоря 5 для каждой расчетной точки в рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря 5 по параметрам магнитной системы ( $\Phi_0, \delta_1, \delta_2, I, W, S_\delta, K_\delta$ )

известной характеристике плоских пружин ( $F_{пр.} = K \cdot \delta_1$  и заданному постоянному тяговому усилию  $F_{пос.т.}$ ,

которое принимаем равным  $F_{\Sigma}$  в каждой расчетной точке.

$$\begin{aligned} & [-\Phi_0^2 \cdot \delta_2^2 \cdot K_{\delta}^2 - 2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta \cdot \delta_2^2 \times \\ & \times [K_{\sigma} \cdot (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост}})] \cdot \cos^4 \gamma + \\ & + [\Phi_0^2 \cdot \delta_1^2 \cdot K_{\sigma}^2 + 2 \cdot \Phi_0 \cdot l \cdot W \cdot \mu_0 \times \\ & \times S\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2) - \\ & - 4 \cdot \mu_0 \cdot S\delta \cdot K_{\delta}^2 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \times \\ & \times (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост.}}) + \mu_0^2 \cdot S\delta^2 \cdot (l \cdot W)^2] \times \\ & \times \cos^2 \gamma - \mu_0 \cdot S\delta \cdot [\mu_0 \cdot S\delta \cdot (l \cdot W)^2 + \\ & + \delta_1^2 \cdot 2 \cdot K_{\delta}^2 \cdot (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост.}})] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Обозначая коэффициенты, стоящие перед неизвестной величиной  $\cos \gamma$ ,  $\cos^2 \gamma$ , а также свободный член, как

$$\begin{aligned} a &= \Phi_0^2 \cdot \delta_2^2 \cdot K_{\delta}^2 + 2 \cdot \mu_0 \cdot S\delta \times \\ & \times \delta_2^2 \cdot K_{\delta}^2 \cdot (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост.}}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} b &= \Phi_0^2 \cdot \delta_1^2 \cdot K_{\delta}^2 + 2 \cdot \Phi_0 \cdot l \cdot W \times \\ & \times K_{\delta} \cdot \mu_0 \cdot S\delta \cdot (\delta_1 + \delta_2) - \\ & - 4 \cdot \mu_0 \cdot S\delta \cdot K_{\delta}^2 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \times \\ & \times (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост.}}) + \mu_0^2 \cdot S\delta^2 \cdot (l \cdot W)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} c &= \mu_0 \cdot S\delta \cdot [\mu_0 \cdot S\delta \cdot (l \cdot W)^2 + \\ & + \delta_1^2 \cdot 2 \cdot K_{\delta}^2 \cdot (K \cdot \delta_1 + F_{\text{пост.}})] \end{aligned} \quad (13)$$

приводим полученное биквадратное уравнение (10) к виду:

$$-a \cdot \cos^4 \gamma + b \cdot \cos^2 \gamma - c = 0 \quad (14)$$

решая которое определяем промежуточные углы  $\gamma$  в рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря:

$$\gamma_{1,n} =$$

$$= \arccos \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{-2 \cdot a}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{2,n} &= \\ &= \arccos \sqrt{\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{-2 \cdot a}} \end{aligned} \quad (16)$$

где 1, 2 - порядковый номер найденного значения угла  $\gamma$ ;

$n$  - номер расчетной точки в рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря.

Из всех найденных углов  $\gamma_{1,n}$  и  $\gamma_{2,n}$  отбираются углы, величина которых меньше  $90^\circ$ .

Искомый угол скоса одного из концов 8 якоря 5 и соответствующей ему части 7 магнитопровода 2 определяем как среднеарифметическое значение найденных углов скоса  $\gamma_{1n}$  или  $\gamma_{2n}$  если углы  $\gamma_{1,n}$  и  $\gamma_{2,n}$  определены во всех расчетных точках в рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря 5.

$$\gamma_1 = \gamma_{\text{ср1}} = \frac{\gamma_{1,1} + \gamma_{1,2} + \dots + \gamma_{1,n}}{m} \quad (17)$$

$$\gamma_2 = \gamma_{\text{ср2}} = \frac{\gamma_{2,1} + \gamma_{2,2} + \dots + \gamma_{2,n}}{m} \quad (18)$$

где  $m$  - количество расчетных точек на рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря 5.

Как видно из решения, в качестве искомого угла  $\gamma$  скоса якоря 5 может выбрать любой из найденных углов  $\gamma_1$  или  $\gamma_2$ . Однако, если хоть один из углов  $\gamma_{1,n}$  или  $\gamma_{2,n}$  хоть в одной точке рабочего диапазона  $L$  перемещения якоря определить невозможно, то тогда будет существовать только один угол скоса якоря 5  $\gamma_1$  или  $\gamma_2$ . Пусть например, невозможно определить угол  $\gamma_{2,1}$ . Т.е. нет решения выражения (16), то считаем, что среднеарифметическое значение  $\gamma_{\text{ср1}}$  не определено, и будет найден только один искомый угол  $\gamma_2$  скоса якоря 5.

Углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  будут иметь оптимальное значение, так как суммарное тяговое усилие в процессе перемещения якоря 5 в рабочем диапазоне  $L$  будет принимать величины, наиболее близкие к заданной величине постоянного тягового усилия  $F_{\text{пост.}}$ . Погрешности отклонения суммарного тягового усилия от заданного постоянного определяются по формулам

$$\Delta_1 = \frac{F_{\max} - F_{\text{пост}}}{F_{\text{пост}}} \cdot 100\% \quad (19)$$

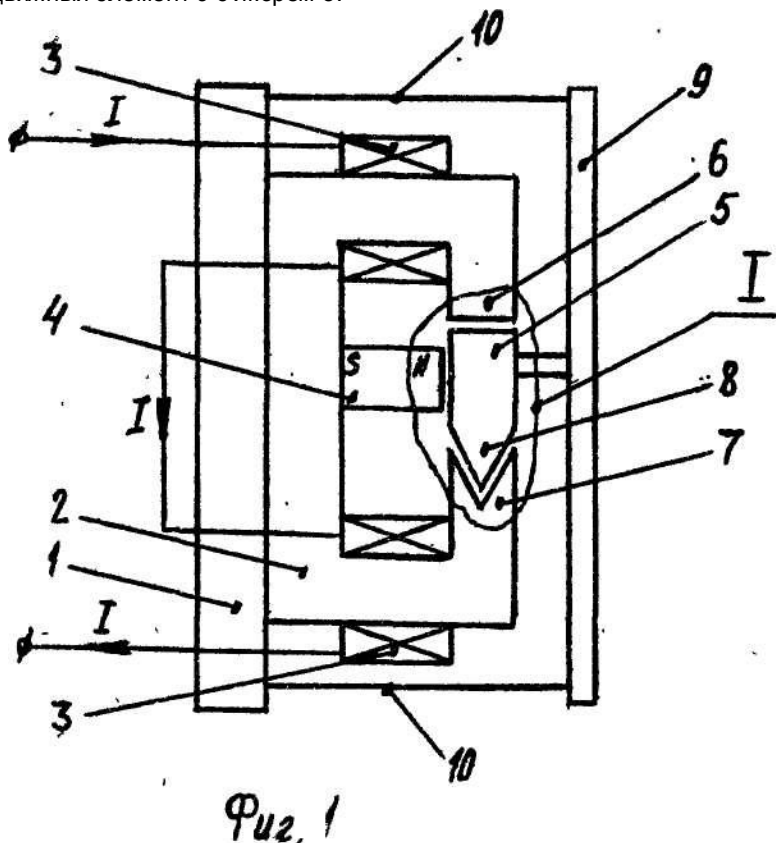
$$\Delta_2 = \frac{F_{\min} - F_{\text{пост}}}{F_{\text{пост}}} \cdot 100\%, \quad (20)$$

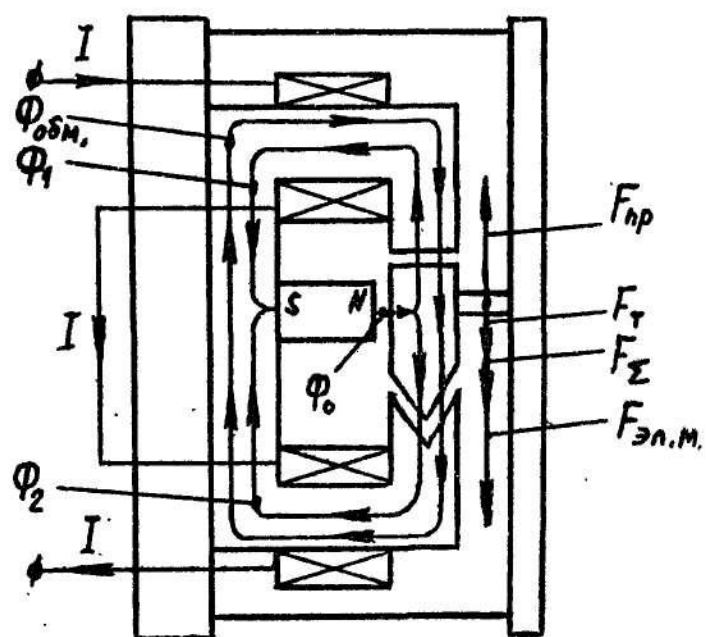
где  $F_{\min}$ ,  $F_{\max}$  - соответственно, минимальная и максимальная величины суммарного тягового усилия в рабочем диапазоне  $L$  перемещения якоря.

При отклонении угла скоса  $\gamma$  якоря 5 (принятого равным  $\gamma_1$  или  $\gamma_2$ ) от оптимального значения, одна из погрешностей  $\Delta_1$  или  $\Delta_2$  будет уменьшаться, а вторая возрастать, что приведет к большему отклонению суммарного тягового усилия от заданного постоянного тягового усилия.

Величины  $F_{\max}$  и  $F_{\min}$  можно определить, графически построив зависимости усилий  $F_{\text{эл.м}}$  и  $F_{\text{пр.}}$  от перемещения якоря 5, из которых находят суммарное тяговое усилие  $F_{\Sigma}$  как  $F_{\text{эл.м}} - F_{\text{пр.}}$ , и построив зависимость  $F_{\Sigma}$  от перемещения якоря  $\delta_2$ , определяют искомые величины  $F_{\max}$  и  $F_{\min}$  в пределах рабочего диапазона  $L$  перемещения якоря 5 (фиг. 5, 6).

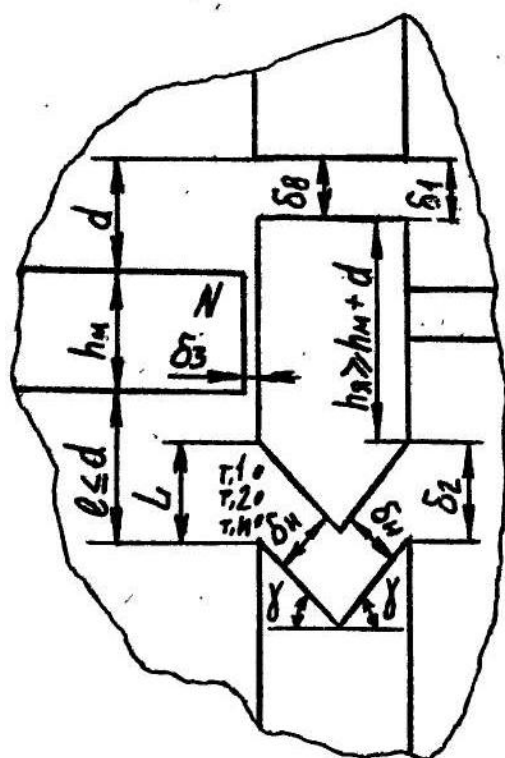
Для более точного определения угла скоса якоря 5 и соответствующей ему части 7 магнитопровода 2 необходимо учитывать магнитное сопротивление воздушного зазора  $\delta_3$  и силу  $F_T$ , действующую на подвижный элемент 9 с якорем 5.



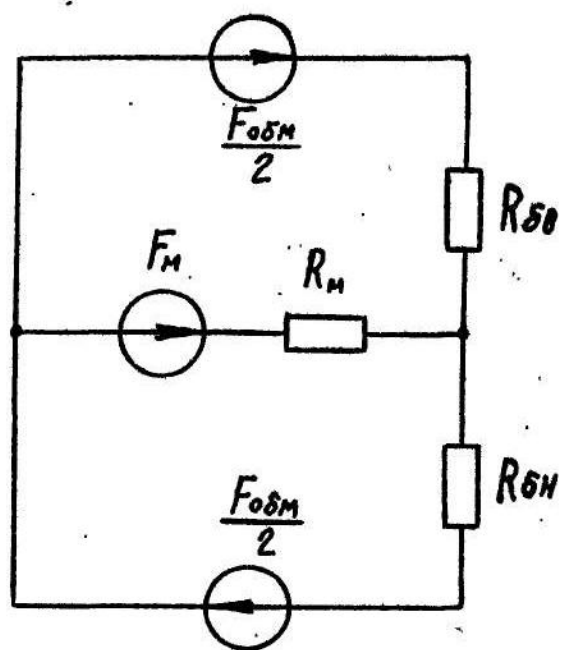


$\Phi_{u2, 2}$

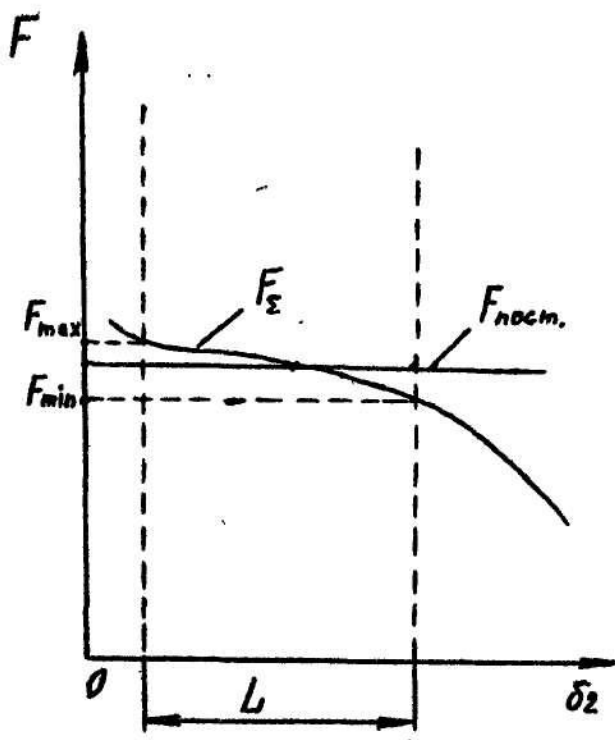
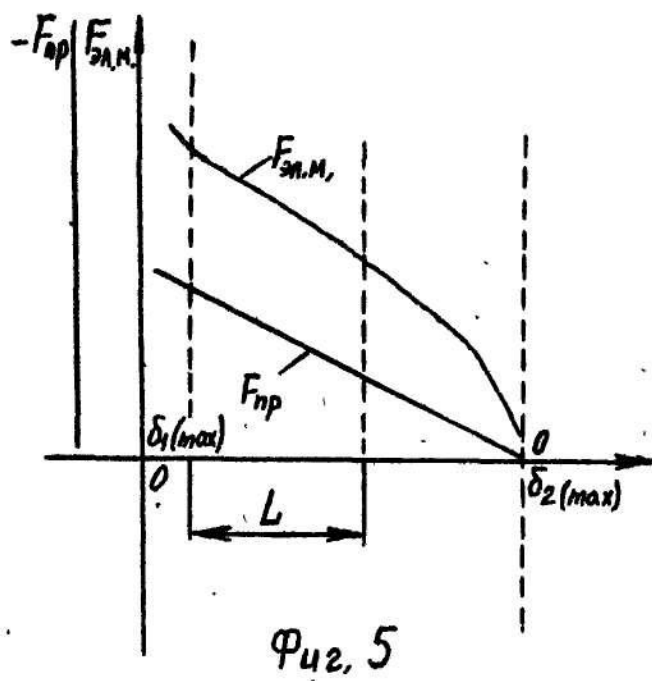
$I$



$\Phi_{u2, 3}$



$\Phi_{u2, 4}$



$$F_\Sigma = F_{3n.M} - F_{np.}$$

$\Phi_{42, 6}$