

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АППАРАТА

Целью расчета является построение тяговой характеристики и ее согласование с механической; проектирование катушки намагничивания и проектирование короткозамкнутого (КЗ) экрана для устранения вибрации аппарата при его работе.

1. **Расчет тяговой характеристики.** Расчет тяговой характеристики производится без учета потерь в стали и экране. Характеристика $F_{\text{Э}}=f(\delta)$, строится для диапазона всего хода якоря сердечника от δ_{max} до δ_{min} .

1.1. **Расчет магнитной цепи без учета потерь в стали и экране – прямая задача.** Расчет приводится для начального зазора (δ_{max}).

1.1.1. **Расчет магнитных проводимостей и их производных.**

Расчет проводимостей воздушного зазора производится методом суммирования простых объемных фигур поля, предложенный Ротерсом.

Расчет для Ш-образного электромагнита:

Суммарная проводимость центрального зазора, как арифметическая сумма параллельных проводимостей участков

$$G_{\delta 1} = \mu_0 \left(\frac{ab}{\delta} + 0,52 \cdot \left[\frac{a+b}{\delta} \right] + 0,307 \cdot \delta + \frac{2 \left[\frac{a+b}{\delta} \right]}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{\delta + 2 \cdot m}{\delta} \right) + m \right); \text{ [Г]}.$$

где m – размер выпучивания

$$m = \frac{c - \delta}{\pi}; \text{ [см]}.$$

Проводимость бокового зазора

$$G_x = \mu_0 \left(\frac{xb}{\delta} + 0,52 \cdot \left[\frac{x+b}{\delta} \right] + 0,307 \cdot \delta + \frac{2 \left[\frac{x+b}{\delta} \right]}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{\delta + 2 \cdot m'}{\delta} \right) + m' \right); \text{ [Г]}.$$

где m' – размер выпучивания для крайних кернов

$$m' = H_1 + a1; \text{ [см]}.$$

$$x = 2 \cdot a1 - a; \text{ [см]};$$

Полная магнитная проводимость двух крайних зазоров

$$G_{\delta 2} = G_{\delta 1} + G_x; [\Gamma/\text{см}].$$

Первая производная по величине воздушного зазора

Для центрального зазора

$$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} = -\mu_0 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{\delta^2} + \frac{2 \cdot (a+b)}{\pi \cdot \delta \left(\frac{\pi \cdot \delta}{5,5 \cdot c} + 1 \right)} \right); [\Gamma/\text{м}].$$

Для боковых зазоров

$$\frac{dG_x}{d\delta} = -\mu_0 \cdot \left(\frac{x \cdot b}{\delta^2} + \frac{2 \cdot (x+b)}{\pi \cdot \delta \left(\frac{\pi \cdot \delta}{5,5 \cdot m'} + 1 \right)} \right); [\Gamma/\text{м}].$$

$$\left| \frac{dG_{\delta 2}}{d\delta} \right| = \left| \frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} + \frac{dG_x}{d\delta} \right|; [\Gamma/\text{м}].$$

Удельная проводимость рассеяния между внедряющейся частью якоря и ярмом определяем по методу Ротерса [6, стр. 6]

$$g = \mu_0 \left(\frac{2 \cdot b}{c} + 4 \cdot 0,26 + \frac{b}{\pi \left(\frac{2c}{a} + 1 \right)} \right); [\Gamma/\text{см}].$$

Проводимости рассеяния по [6, стр. 6]

$$G_{\sigma 1} = \frac{g \cdot H_1}{2}; [\Gamma\text{н}],$$

$$G_{\sigma 2} = \frac{g \cdot H_2}{2}; [\Gamma\text{н}].$$

Результирующая проводимость

$$G_{1P} = G_{\delta 1} + G_{\sigma 1}; [\Gamma\text{н}],$$

$$G_{2P} = G_{\delta 2} + G_{\sigma 2}; [\Gamma\text{н}].$$

Коэффициенты рассеяния у зазоров [6, стр. 6]

$$\sigma_1 = 1 + \frac{G_{\sigma 1}}{G_{\delta 1}}; [\text{o.e.}], \quad \sigma_2 = 1 + \frac{G_{\sigma 2}}{G_{\delta 2}}; [\text{o.e.}].$$

1.1.2. Магнитный поток в зазоре [2, стр. 343, формула 13-1].

1.1.3. Средний магнитный поток срабатывания [2, стр. 343].

1.1.4. Тяговое усилие при начальном зазоре без учета усилия от магнитных потоков рассеяния (заниженное значение) [6, стр. 6]

$$F_{\text{Э}} = \Phi_{\delta}^2 \cdot C_F; [H].$$

$$\text{где } C_F = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{1}{G_{\delta 1}} \right)^2 \cdot \frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} + \left(\frac{1}{G_{\delta 2}} \right)^2 \cdot \frac{dG_{\delta 2}}{d\delta} \right]; \quad \frac{H}{B\delta^2} \therefore$$

1.2. Расчет характеристики $F_{\text{Э}}=f(\delta)$, для других значений δ_{max} до δ_{min} , осуществляется по вышеприведенному расчету, которые сводятся в таблицу. Величина минимального зазора теоретически должна быть равной 0, однако в реальном устройстве обеспечение такого зазора не имеется возможным по технологическим причинам. В связи с этим δ_{min} принимается равным 0,02 мм.

δ	m	$G_{\delta 1}$	G_x	$G_{\delta 2}$	$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta}$	$\frac{dG_x}{d\delta}$	$\frac{dG_{\delta 2}}{d\delta}$	C_F	$F_{\text{Э}}$
см	см	10^{-8} Г/см	10^{-8} Г/см	10^{-8} Г/см	10^{-6} Г/м	10^{-6} Г/м	10^{-6} Г/м	$10^8 \cdot H / B\delta^2$	Н
δ_{max}									
....									
δ_{min}									

1.3. Построение механической и тяговой характеристик и их согласование.

1.4. Выводы.

2. Расчет катушки намагничивания. Расчет катушки производится методом последовательного приближения.

2.1. Число витков катушки исходя из условия удержания [2, стр. 371, формула 14-11], где E – электродвижущая сила катушки, в первом приближении принимается $E=U$; Φ_m – поток при притянтом ягоре,

$\Phi_m = B_m \cdot S_{CT}$; B_m – допустимая индукция в стали, для выбранной стали согласно [1, стр. 235, рис. 4.45] для рассчитанного сечения магнитопровода.

2.2. Намагничивающая сила катушки $Iw = \frac{\Phi_m}{G_m}$,

где G_m – суммарная проводимость магнитной цепи

$$G_m = \frac{G_{1P} \cdot G_{2P}}{G_{1P} + G_{2P}}; [\Gamma].$$

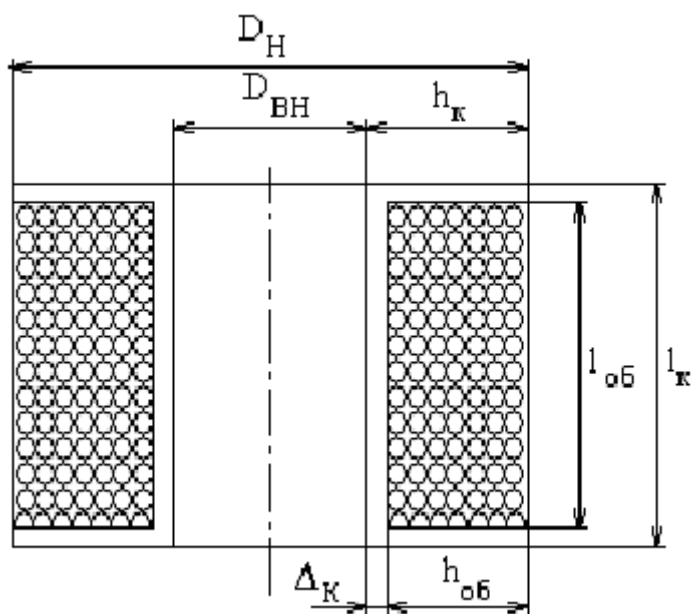
2.3. Так как величина E ока неизвестна, то, начиная со значения $E=U$, рассчитываются параметры катушки в первом приближении, а затем уточнив величину E , производится уточнение числа витков катушки пока не будет выполнено условие

$$\left| \frac{w^{(k)} - w^{(k+1)}}{w^{(k)}} \right| \leq \varepsilon_{доп},$$

где $\varepsilon_{доп}$ – допустимая относительная погрешность расчета, (0,03÷0,05).

2.4. Геометрические размеры катушки. Для каркасного исполнения катушки.

зазор $\Delta = (1 \div 2)$ мм.



длина намотки

$$l_H = l - 2\Delta - 2\Delta_K,$$

где Δ_K – толщина каркаса, принимается конструктивно в пределах (1÷5) мм,

длина катушки

$$l_K = l - 2\Delta.$$

высота катушки

$$h_K = c - 2 \cdot \Delta.$$

высота намотки

$$h_H = h_K - \Delta - \Delta_K.$$

Предварительно коэффициент заполнения обмотки $K_m=0,5$, коэффициент укладки при рядовой намотке $K_y=0,9\div 0,95$.

средняя длина витка

$$l_{CP} = 4 \cdot K + \pi \cdot h_H,$$

где $K = a + 2\Delta + 2\Delta_K$.

2.5. Число витков в первом приближении

$$w' = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m}.$$

2.6. Диаметр изолированного провода без учета прокладки между рядами

$$d'_{ИЗ} = \sqrt{\frac{h_H \cdot l_H \cdot K_y}{w'}},$$

диаметр изолированного проводника

$$d_{ИЗ} = d'_{ИЗ} - \frac{\Delta_{ПР}}{2},$$

где $\Delta_{ПР}$ – толщина прокладки.

Принимается из стандартного ряда изолированных проводов [2, стр. 362, табл. 14-2].

2.7. Сечение выбранного провода

$$g = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

2.8. Сопротивление обмотки при установившейся температуре

$$r = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{CP} \cdot w'}{g},$$

где ρ_{Cu} – удельное электрическое сопротивление меди при 75°C .

2.9. Ток в обмотке

$$I = \frac{w}{\sqrt{2} \cdot w'}$$

2.10. Электродвижущая сила обмотки

$$E = \sqrt{U^2 - (I \cdot r)^2}$$

2.11. По величине E определяется число витков (второе приближение) и расчет повторяется, результаты расчета сводятся в таблицу. Расчет методом последовательного приближения проводится до выполнения условия

$$\frac{w^k - w^{k+1}}{w^k} \leq 0,03 \div 0,05$$

№	W	$d'_{из}$	$d_{из}$	$d_{из}$	d	$g \cdot 10^{-2}$	r	I	E	ε
1										
....										

2.12. Коэффициент заполнения обмотки и максимальное число витков [6, стр. 11].

2.13. Магнитный поток в рабочем зазоре при притянutom якорe [2, стр. 343 формула 13-2].

3. Проектирование электромагнитного экрана

3.1. Назначение и необходимость применения электромагнитного экрана в аппаратах переменного тока.

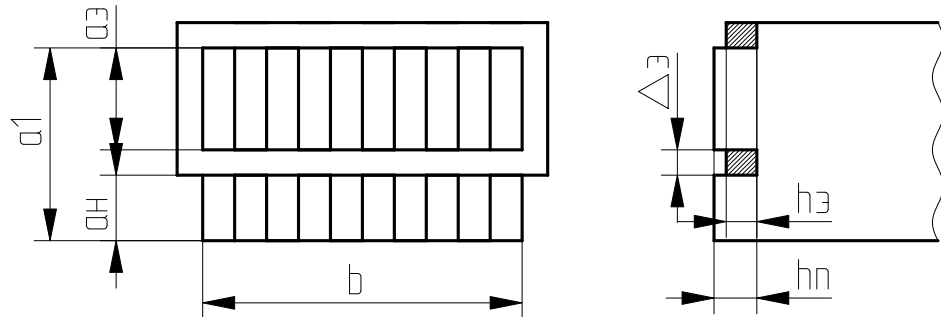
3.2. Расчет экрана производится по отношению допустимой минимальной электромагнитной силы к среднему значению силы при отсутствии экрана (метод А.В. Шорыгина – Г.В. Могилевского). Расчет для одного экранирующего витка.

3.2.1. Магнитный поток в рабочем зазоре с учетом конструкции магнитопровода [2, стр. 343].

3.2.2. Минимально допустимая сила притяжения на один зазор по [5, стр. 132, формула 2-91].

3.2.3. Предварительный выбор размеров короткозамкнутого витка: ширина Δ_3 , [см], высота $h_3 = (5 \div 2) \Delta_3$, [см]. Высоту паза принимается больше высоты витка, с учетом нагрева витка h_n , [см].

3.2.4. Эскиз электромагнитного экрана.



3.2.5. Геометрия экранированной части магнитопровода:

$$a_H + a_3 = a_1 - \Delta_3, \text{ [см].}$$

Суммарная площадь в зазоре без учета площади экрана

$$S_{H+3}, \text{ [см}^2\text{].}$$

Отношение неэкранированной и экранированной частей торца полюса из рекомендуемых пределов $\alpha = (0,05 \div 0,6)$. $\alpha = a_H / a_3 = (0,05 \div 0,6)$.

Площадь неэкранированной части сечения

$$S_H = a_H \cdot b, \text{ [см}^2\text{].}$$

Площадь экранированной части сечения ядра

$$S_3 = a_3 \cdot b, \text{ [см}^2\text{].}$$

Длина короткозамкнутого витка по средней линии

$$l_{cp.3} = \frac{P_H + P_{BH}}{2}, \text{ [см],}$$

где P_H – наружный периметр витка

$$P_H = 2 \cdot (a_1 + 2 \cdot \Delta_3) + (a_3 + 2 \cdot \Delta_3), \text{ [см];}$$

P_{BH} – внутренний периметр короткозамкнутого витка

$$P_{BH} = 2 \cdot (a_1 - a_3), \text{ [см].}$$

3.2.6. Выбор материала короткозамкнутых витков.

3.2.7. Удельное сопротивление нагретого КЗ витка [2, стр.382, формула 15-3].

3.2.8. Активное электрическое сопротивление экрана

$$r_{\text{э}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{ср.э}}}{g_{\text{э}}}.$$

3.2.9. Индуктивное магнитное сопротивление экранированной части

$$X_M = \frac{2\pi \cdot f}{r_{\text{э}}}.$$

3.2.10. Фазный угол сопротивления экрана [2, стр. 348, формула 13-7]

3.2.11. Поток, проходящий через экранированную и неэкранированную площадь полюса [2, стр. 348, формула 13-8].

3.2.12. Электромагнитная сила в экранированной и неэкранированной частях полюса, амплитудное, среднее и минимальное значение силы по формулам [2, стр. 348, формулы 13-10 – 13-12].

3.2.1.3. Выводы.

4. Расчет магнитной цепи с учетом влияния стали и короткозамкнутого витка

4.1. Схема замещения электромагнита с учетом КЗ витка.

4.2. Расчет магнитной цепи Ш-образного электромагнита по методике предложенной [6].

4.2.1. Магнитное сопротивление центрального зазора

$$R_{\delta 1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 \cdot a \cdot b}.$$

4.2.2. Магнитное сопротивление неэкранированной части рабочего зазора

$$R'_{\delta H} = \frac{\delta_{\text{ПР}}}{\mu_0 \cdot a_H \cdot b}.$$

4.2.3. Магнитное сопротивление экранированной части рабочего зазора

$$R'_{\delta \text{э}} = \frac{\delta_{\text{ПР}}}{\mu_0 \cdot a_{\text{э}} \cdot b}.$$

4.2.4. Сопротивление с учетом двух сторон магнитной цепи

$$R_{\delta H} = \frac{1}{2} \cdot R'_{\delta H}, \quad R_{\delta \partial} = \frac{1}{2} \cdot R'_{\delta \partial}.$$

4.2.5. Индуктивное сопротивление витка с учетом двух сторон магнитной цепи

$$X_{\partial} = \frac{1}{2} \cdot X_M.$$

4.2.6. Амплитудное значение магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w}.$$

4.2.7. Максимальная индукция равна

$$B_m = \frac{\Phi_m}{a \cdot b \cdot k_{CT}}.$$

4.2.8. Величина напряженности H_m по кривой намагничивания [6, стр. 10, табл. 3] для выбранной марки материала сердечника.

4.2.9. Магнитные сопротивления стальных участков.

Полное удельное магнитное сопротивление

$$\rho_Z = \frac{H_m}{B_m},$$

Индуктивное удельное магнитное сопротивление

$$\rho_X = \frac{2 \cdot P_{yD} \cdot \delta}{\omega \cdot B_m^2},$$

где P_{yD} – удельные потери в стали по [6, стр. 9, табл. 2]. Используются удельные потери при ближайшем значении индукции

$$P_{yD} = P_{yD1} \left(\frac{B_m}{B_{m1}} \right)^2.$$

Активное удельное магнитное сопротивление

$$\rho_r = \sqrt{\rho_Z^2 - \rho_X^2}.$$

Средняя длина пути магнитного потока

$$l_{CP} = 2 \cdot \left(\frac{H}{c} \right) \pi \cdot \frac{a}{2}.$$

Активное магнитное сопротивление стали

$$R_{\mu CT} = \rho_r \cdot \frac{l_{CP}}{S_{CT}}.$$

Индуктивное магнитное сопротивление стали

$$X_{\mu CT} = \rho_X \cdot \frac{l_{CP}}{S_{CT}}.$$

Полное магнитное сопротивление бокового зазора с экраном

$$Z_{\delta 2} = \frac{R_{\delta H} \cdot (R_{\delta \varepsilon} + jX_{\varepsilon})}{R_{\delta H} + R_{\delta \varepsilon} + jX_{\varepsilon}}.$$

Полное магнитное сопротивление цепи

$$Z_{\varepsilon} = R_{\delta 1} + Z_{\delta 2} + R_{\mu CT} + jX_{\mu CT}.$$

4.3. Потoki в экранированной и неэкранированной части бокового зазора

$$\Phi_{mH} = \Phi_m \cdot \frac{Z_{\delta 2}}{R_{\delta H}},$$

$$\Phi_{m\varepsilon} = \Phi_m \cdot \frac{Z_{\delta 2}}{R_{\delta \varepsilon} + jX_{\mu \varepsilon}}.$$

4.4. Сдвиг фаз между потоками

$$\psi = \psi_1 + \psi_2.$$

4.5. Магнитодвижущая сила при конечном зазоре

$$\mathcal{W}_m = \Phi_{\delta} \cdot Z_{\varepsilon}.$$

4.6. Ток в катушке

$$I = \frac{(Iw)_m}{\sqrt{2} \cdot w}.$$

4.7. Мощность, выделяемая в катушке [6, стр. 13].

4.8. Поверхность охлаждения катушки [6, стр. 13].

4.9. Превышение температуры катушки над температурой окружающей среды [6, стр. 13].

4.10. Потери в стали [6, стр. 13].

4.11. Потери в короткозамкнутом витке [6, стр. 14].

4.13. Выводы.