

Задание на контрольную работу по дисциплине
«Теоретические основы автоматики и телемеханики»
с методическими указаниями

Контрольная работа выполняется в виде одной пояснительной записки, разделённой по темам (задачам).

Контрольная работа состоит из трех задач. В качестве методических рекомендаций условия задач дополнены типовыми примерами решений аналогичных задач. Решения каждой задачи должны быть подробными, с корректной записью промежуточных и окончательных результатов. Для каждой задачи в соответствии с вариантом необходимо записать условие и при необходимости изобразить поясняющий рисунок. Решение каждой задачи следует начинать с новой страницы.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В современных устройствах ж. д. автоматики широкое распространение нашли электромагнитные реле. Реле предназначено для выполнения логических операций и непосредственного управления силовыми нагрузками небольшой мощности, устанавливаются в низковольтных устройствах управления техническими объектами.

Общий вид реле приведен на рис. 1. Контактная система реле состоит из неподвижных контактов 2, зафиксированных в пластмассовом основании 1, и подвижных контактов на плоских пружинах 3, закрепленных в пластмассовом основании 1 и связанных с якорем электромагнита. Электромагнит содержит магнитопровод 9, сердечник 7, катушку 8 и якорь 4.

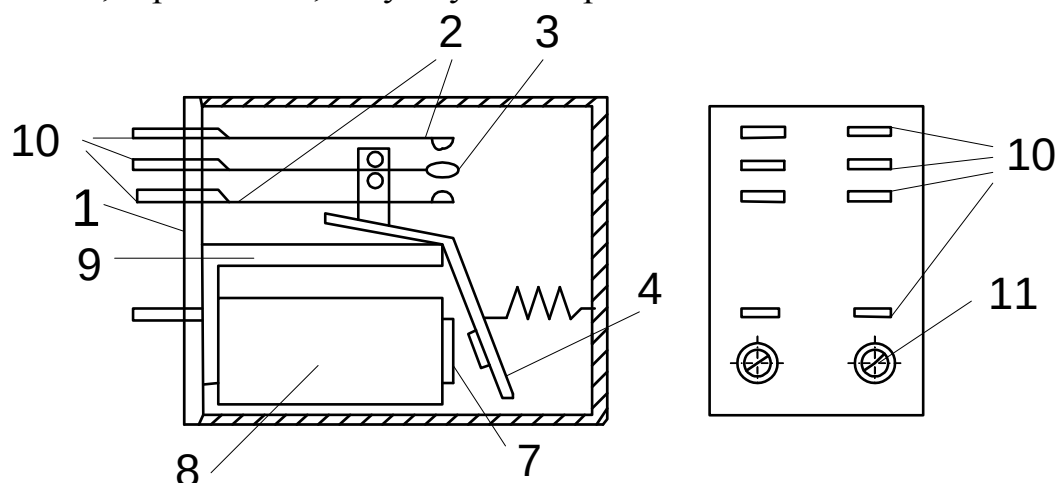


Рис. 1. Общий вид электромагнитного реле

Магнитопровод крепится к пластмассовому основанию с помощью винтов 11. Подключение реле к внешним электрическим цепям осуществляется выводами 10.

При подаче на катушку напряжения якорь реле притягивается к сердечнику, осуществляя изменение коммутационного состояния контактов. При отключении напряжения в цепи катушки якорь под действием пружины и

собственным весом, а также плоских пружин замыкающих контактов возвращается в исходное состояние, а контакты принимают начальное положение.

Для рабочего воздушного зазора находящегося между цилиндрическим сердечником и поворотным якорем прямоугольной формы, расположенным под углом в [4,5,6] приведены расчетные формулы. Магнитная проводимость вычисляется по выражению [4]:

$$\Lambda_P = \mu_o \left(\frac{\pi * d^2}{4 * \delta} K + \frac{\pi * d}{0,69 * \delta / c + 0,63} + 0,96 * d \right), \quad (1)$$

где Λ_P — магнитная проводимость, Гн; d — диаметр полюсного наконечника сердечника, м; δ — величина рабочего зазора, м; c — толщина полюсного наконечника; K — коэффициент, учитывающий неравномерность магнитного поля, равный:

$$K = 2 * \rho (\rho - \sqrt{\rho^2 - 1}); \rho = 2 * R_o / d, \quad (2)$$

где R_o — расстояние от оси вращения якоря до оси симметрии сердечника магнитной системы.

Магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора:

$$R_P = 1 / \Lambda_P, \quad (3)$$

Производная магнитной проводимости выражения (1) в соответствии с [4]:

$$\frac{d\Lambda_P}{d\delta} = -\mu_o \left(\frac{\pi * d^2}{4 * \delta^2} K + \frac{\pi * d}{c * (\delta / c + 0,63)^2} \right), \quad (4)$$

Эскиз рабочего воздушного зазора имеет вид, представленный на рис. 2.

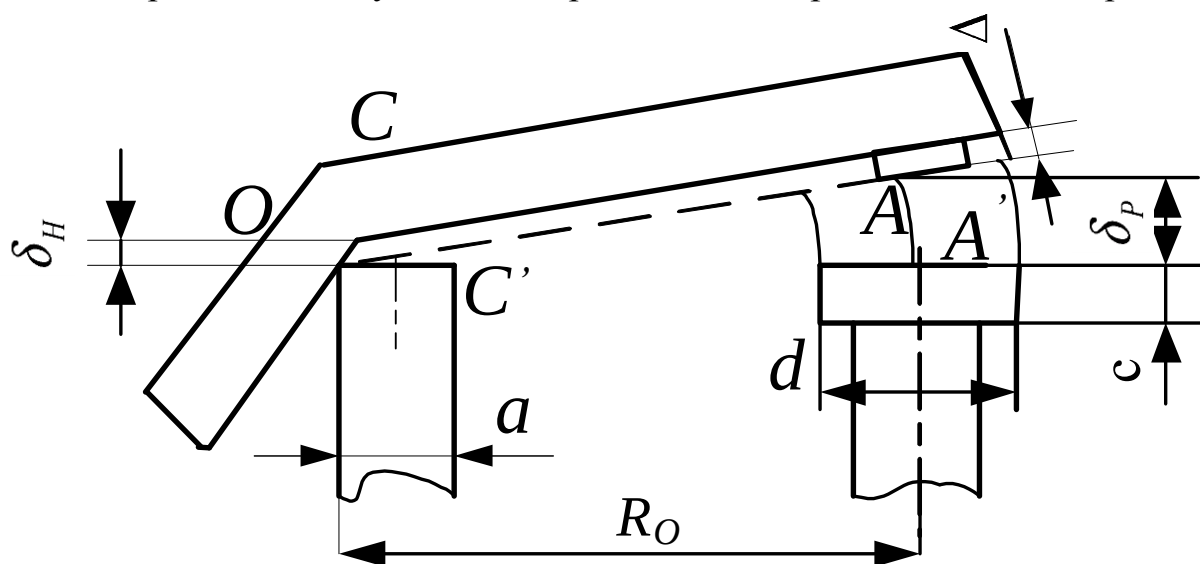


Рис. 2. Эскиз воздушных зазоров

Δ — толщина антимагнитного штифта; δ_H — нерабочий воздушный зазор;

δ_p — рабочий воздушный зазор.

При расчете магнитной проводимости нерабочего воздушного зазора, который находится между прямоугольным якорем, расположенным под углом и ярмом прямоугольной формы. принимаются следующие допущения:

- 1) зазор образован двумя параллельными плоскостями;
- 2) краевые потоки равны нулю и магнитная проводимость определяется по упрощенной формуле;

$$\Lambda_H = \mu_0 * S_H / \delta_H, \quad (5)$$

где Λ_H — магнитная проводимость нерабочего зазора, Гн; S_H — площадь нерабочего зазора, м²; δ_H — величина нерабочего зазора, м;

- 3) значение нерабочего зазора определяется посередине скобы магнитной системы.

Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора

$$R_H = 1 / \Lambda_H,$$

Нерабочий зазор состоит из изменяющейся части, зависящей от величины рабочего зазора и постоянной части, обусловленной антимагнитным штифтом:

$$\delta_H = \delta'_H + \Delta, \quad (6)$$

где δ'_H — изменяющаяся часть нерабочего зазора, м.

Связь между величиной рабочего воздушного зазора и изменяющейся частью нерабочего воздушного зазора определяется из подобия треугольников $\triangle COC'$ и $\triangle AOA'$ (рис.3). Для них можно записать:

$$\delta_p / \delta'_H = R_0 / 0,5a$$

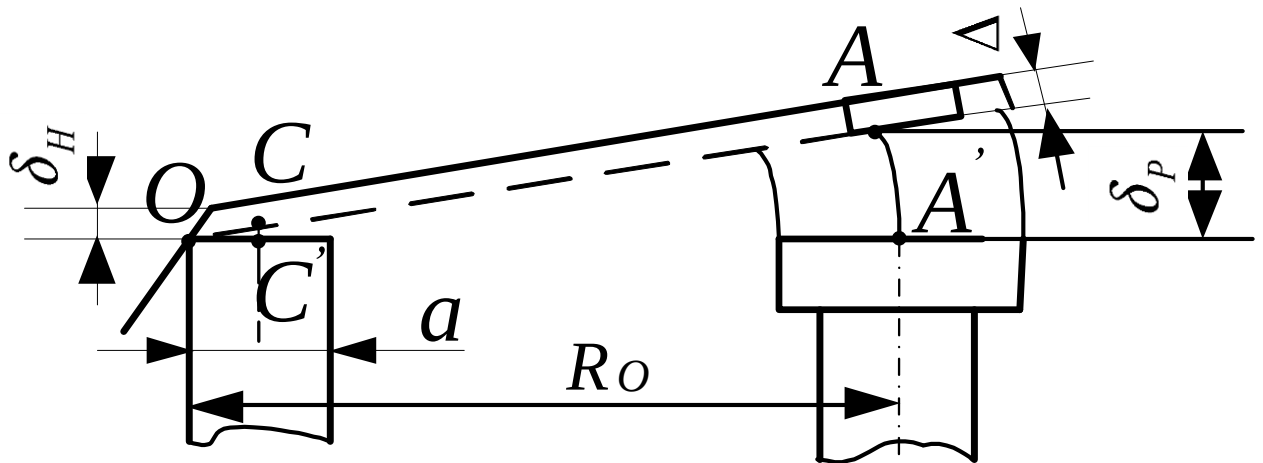


Рис.3. Эскиз нерабочего и рабочего воздушных зазоров

Магнитная проводимость нерабочего воздушного зазора между ярмом прямоугольной формы и основанием цилиндрического сердечника (зазор обусловлен наличием немагнитного покрытия этих деталей и не плотностью их прилегания) рассчитывается без учета краевых потоков по выражению (5):

$$\Lambda_{H1} = \mu_0 * \pi * d_C^2 / 4\delta_{H1}$$

Магнитное сопротивление этого зазора:

$$R_{H1} = 1/\Lambda_{H1},$$

Проводимость зазора утечки, образованного параллельными цилиндрическим сердечником и ярмом прямоугольной формы (рис. 4) рассчитывается следующим образом. Магнитный поток утечки (рассеяния) замыкается помимо рабочего воздушного зазора. Потоки рассеяния являются распределенными и замыкаются внутри контура магнитопровода и вне его. При расчете будем учитывать только магнитные потоки замыкающиеся внутри контура магнитопровода. Примем высоту зоны рассеяния равной высоте катушки электромагнита. Приведенную магнитную проводимость воздушного зазора для потока рассеивания определим в соответствии с [5]:

$$\Lambda_{yII} = \Lambda_y/2, \quad (7)$$

где Λ_{yII} — приведенная магнитная проводимость зазора утечки, Гн; Λ_y — полная магнитная проводимость зазора утечки, Гн..

Удельная магнитная проводимость зазора утечки в соответствии с [6]:

$$\lambda = K * \mu_0 \frac{2 * \pi}{\ln(2 * n + \sqrt{4 * n^2 - 1})}, \quad (8)$$

где $K = 0,87$ — коэффициент, зависящий от соотношения b и h ; $n = h/d_c$.

Полная проводимость зазора утечки:

$$\Lambda_y = \lambda * H \quad (9)$$

Расчет параметров магнитной цепи может быть выполнен с использованием схем замещения электромагнита [1]. Упрощенная схема замещения магнитной цепи электромагнита без учета магнитного сопротивления стальных участков приведена на рис. 5. Для данной схемы замещения можно записать:

$$\begin{aligned} \Phi_y &= F/(R_{yII} + R_{H1}) \\ \Phi_p &= F/(R_p + R_{H1} + R_H) \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 + \Phi_y / \Phi_p \quad (11)$$

Подставляя (10) в (11), получим:

$$\sigma = 1 + (R_p + R_H + R_{H1}) / (R_{yII} + R_{H1}) \quad (12)$$

Значение коэффициента рассеяния зависит от величины рабочего воздушного зазора.

Для расчета параметров реле большое значение имеет расчет и построение кривых намагничивания. Кривые намагничивания позволяют определить связь между магнитным потоком и МДС катушки электромагнита. При срабатывании реле изменяется рабочий воздушный зазор и его магнитная проводимость. Каждому значению рабочего воздушного зазора соответствует

своя кривая намагничивания.

Полная схема замещения электромагнита приведена на рис. 7. Участки с магнитными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 обтекаются магнитным потоком рабочего воздушного зазора Φ_p , а с R_4 и R_5 — полным магнитным потоком $\Phi = \sigma * \Phi_p$.

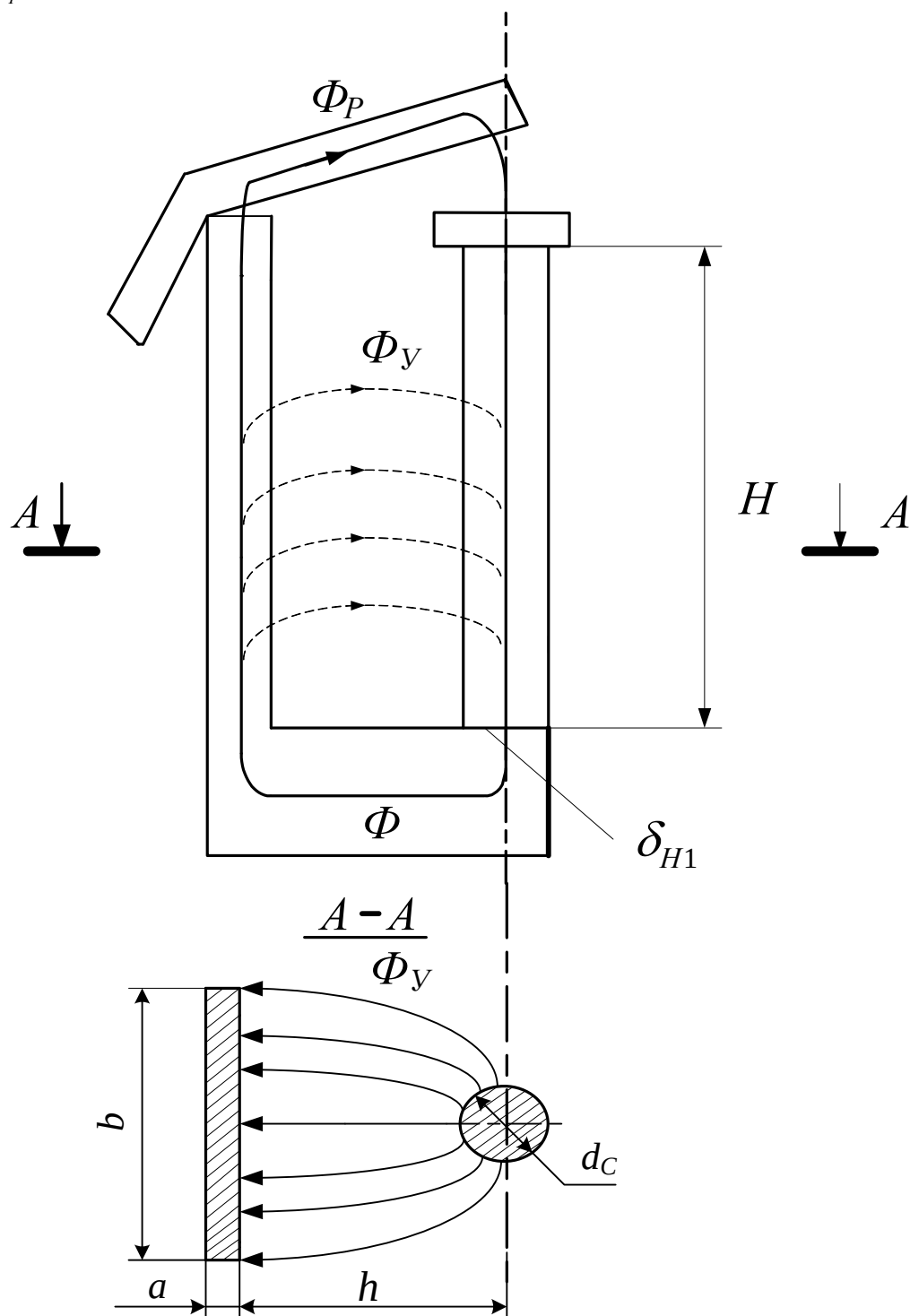


Рис. 4. Упрощенная картина магнитного поля для расчета магнитной проводимости зазора утечки.

Φ — полный магнитный поток; Φ_p — магнитный поток в рабочем воздушном зазоре; Φ_y — магнитный поток утечки; H — высота катушки.

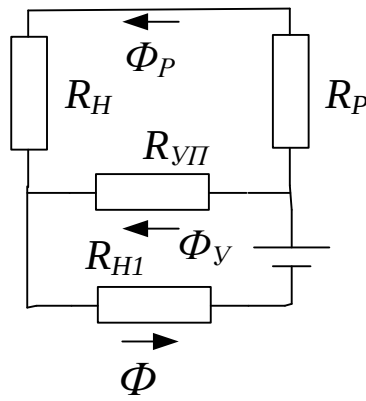


Рис. 5. Упрощенная схема замещения магнитной цепи электромагнита

При расчете кривых намагничивания решается обратная задача расчета магнитной цепи, т. е, определяется электромагнитная сила по известной МДС катушки. Магнитное сопротивление стали и падение магнитного напряжения на стальных участках зависят от величины магнитного потока.

Поставленная задача может быть решена методом последовательных приближений, либо графоаналитически. В обоих случаях решение сводится к решению ряда прямых задач, т. е. определению МДС катушки по известному магнитному потоку в рабочем воздушном зазоре. Ниже приведена последовательность расчета координат точек для построения кривых намагничивания магнитной системы графоаналитическим методом.

При выполнении расчета необходимо задаться произвольным значением магнитного потока в рабочем зазоре. Индукция в стали на участках магнитной системы определяется из выражения:

$$B_i = \Phi_i / S_i \quad (13)$$

где B_i - индукция, Тл; Φ_i — магнитный поток, Вб; S_i — площадь поперечного сечения участка, м².

По кривой намагничивания материала магнитопровода (приложение 1) определяем напряженность магнитного поля, соответствующую полученной индукции, Падение магнитного напряжения на стальных участках по закону полного тока:

$$F_i = H_i * l_i \quad (14)$$

где F_i — падение магнитного напряжения на участке, А; H_i — напряженность магнитного поля, А/м; l_i — длина средней силовой линии на участке, м.

Расчет падения магнитного напряжения в воздушных зазорах по закону Ома для магнитной цепи может быть выполнен по следующему выражению:

$$F_{\sigma i} = \Phi_i * R_{\sigma i} \quad (15)$$

где $R_{\sigma i}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора, Гн⁻¹

МДС катушки, необходимая для создания принятого значения магнитного потока в рабочем зазоре, находится суммированием рассчитанных

падений магнитного напряжения на каждом участке по замкнутому контуру согласно второму закону Кирхгофа для магнитной цепи:

$$F_K = F_1 + F_2 + F_3 + F_P + F_H + F_4 + F_5 + F_{H1} \quad (16)$$

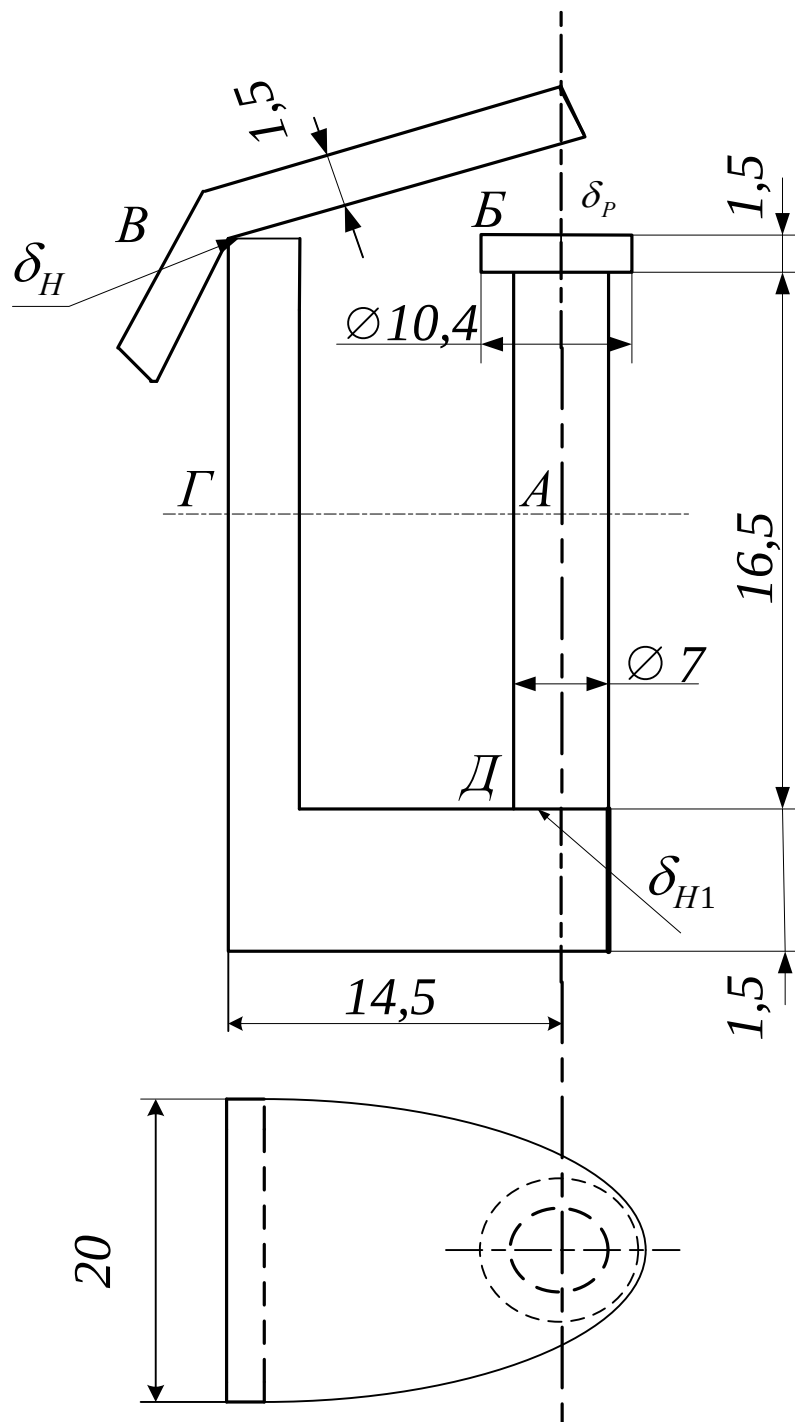


Рис. 6. Эскиз магнитной системы

Для построения кривой намагничивания достаточно иметь несколько точек, т. е. нужно задаться новым значением магнитного потока и вновь выполнить вышеприведенные действия. Магнитным потоком следует задаваться так, чтобы сумма падений магнитного напряжения, рассчитываемая по выражению (16), находилась в интервале от нуля до номинальной МДС катушки, а индукция в стали не превышала индукцию насыщения (примерно 2

Тл).

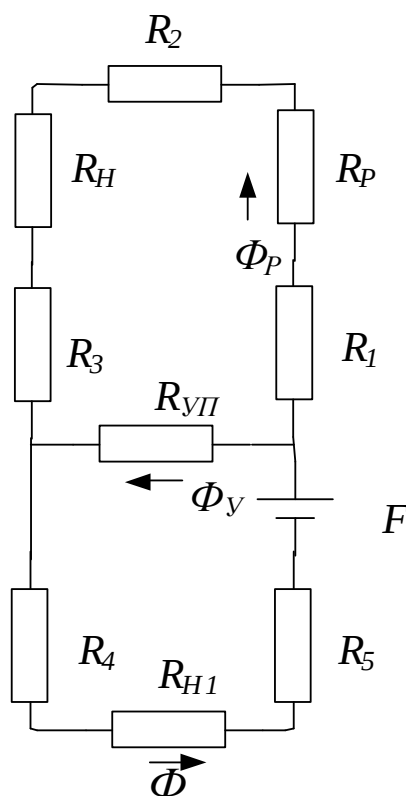


Рис. 7. Полная схема замещения электромагнита

ЗАДАЧА 1

Расчет магнитной проводимости рабочего воздушного зазора

Для исследования выбрано электромагнитное реле (см. рис.1).

Выполнить расчет магнитной проводимости рабочего воздушного зазора электромагнитное реле, построить графическую зависимость магнитной проводимости рабочего воздушного зазора от его величины. Значения рабочего воздушного зазора $\delta_p = (0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,1) \cdot 10^{-3}$, м. Значение магнитной постоянной $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-7}$. Исходные данные для решения задания приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Предпо- сл едняя цифра шифра	После- дняя цифра шифр а	диаметр полюсного наконечника сердечника, $d = \dots \cdot 10^{-3}$ м	толщина полюсного наконечника, $c = \dots \cdot 10^{-3}$ м	расстояние от оси вращения якоря до оси симметрии $R_0 = \dots \cdot 10^{-3}$ м
четная или 0	0	9	2	14,5
	1	9,8	6	14
	2	11	4	14,8
	3	13	3	15
	4	12	5	15,2
	5	11,5	7	15,4

	6	10,2	2,6	14,2
	7	14	2,8	16
	8	12,8	3,6	13
	9	13,2	3,8	16
нечетная	0	10,8	3,4	14,6
	1	9,5	4,2	14,1
	2	9,4	4,6	13,2
	3	11,7	2,2	13,8
	4	12,4	5,8	14,3
	5	10,8	5,4	13,8
	6	11,3	6,6	14,6
	7	12,6	6,2	14
	8	10,2	6,3	15
	9	10,5	5,2	14,5

Типовой пример.

Исходные данные:

- 1) эскиз рабочего воздушного зазора (см. рис. 2);
- 2) диаметр полюсного наконечника сердечника $d = 10,4 \cdot 10^{-3}$ м;
- 3) толщина полюсного наконечника $c = 2 \cdot 10^{-3}$ м;
- 4) расстояние от оси вращения якоря до оси симметрии $R_0 = 14,5 \cdot 10^{-3}$ м;
- 5) μ_o - магнитная постоянная, $\mu_o = 1,257 \cdot 10^{-7}$;
- 5) рабочий воздушный зазор $\delta_p = (0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1) \cdot 10^{-3}$, м

Вычисление магнитной проводимости, магнитного сопротивления и производной магнитной проводимости рабочего воздушного зазора выполняется для восьми значений рабочего воздушного зазора по выражению (1-4).

При $\delta_p = 0,05 \cdot 10^{-3}$, м

$$\Lambda_p = 1,257 \cdot 10^{-7} \left(\frac{3,1416 \cdot 1,08 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-5}} 1,034 + \frac{3,1416 \cdot 0,0104}{0,69 \cdot 5 \cdot 10^{-5} / 0,002 + 0,63} + 0,96 \cdot 0,0104 \right) =$$

$$= 2,28 \cdot 10^{-6},$$

$$K = 2 \cdot \rho (\rho - \sqrt{\rho^2 - 1}) = 2 \cdot 2,78846 \cdot (2,78846 - \sqrt{(2,78846)^2 - 1}) =$$

$$= 1,034;$$

$$\rho = 2 \cdot R_0 / d = 2 \cdot 14,5 \cdot 10^{-3} / 0,0104;$$

$$R_p = 1 / \Lambda_p = 1 / 2,28 \cdot 10^{-6} = 4,377475 \cdot 10^5,$$

$$\frac{d\Lambda_p}{d\delta} = -1,257 \cdot 10^{-7} \left(\frac{3,1416 \cdot 1,08 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-5})^2} 1,034 + \frac{3,1416 \cdot 0,0104}{0,02 \cdot (5 \cdot 10^{-5} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -4,8871 \cdot 10^{-5},$$

$$\text{При } \delta_P = 0,1 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_P = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 1 * 10^{-4}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 1 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 1,179 * 10^{-6},$$

$$R_P = 1 / 1,179 * 10^{-6} = 848497,2;$$

$$\frac{d\Lambda_P}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (1 * 10^{-4})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (1 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -4,5417 * 10^{-5},$$

$$\text{При } \delta_P = 0,2 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_P = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 2 * 10^{-4}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 2 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 6,2339 * 10^{-7},$$

$$R_P = 1 / 6,2339 * 10^{-7} = 1604121,$$

$$\frac{d\Lambda_P}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (2 * 10^{-4})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (2 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -3,9544 * 10^{-5},$$

$$\text{При } \delta_P = 0,4 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_P = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 4 * 10^{-4}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 4 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 3,4206 * 10^{-7},$$

$$R_P = 1 / 3,4206 * 10^{-7} = 2923448,$$

$$\frac{d\Lambda_P}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (4 * 10^{-4})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (4 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -3,082 * 10^{-5},$$

$$\text{При } \delta_P = 0,6 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_P = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 6 * 10^{-4}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 6 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 2,4564 * 10^{-7},$$

$$R_P = 1 / 2,4564 * 10^{-7} = 4071212,$$

$$\frac{d\Lambda_P}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (6 * 10^{-4})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (6 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -2,47563 * 10^{-5},$$

При $\delta_p = 0,8 * 10^{-3}, м$

$$\Lambda_p = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 8 * 10^{-4}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 8 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 1,9589 * 10^{-7},$$

$$R_p = 1 / 2,456 * 10^{-7} = 4071059,$$

$$\frac{d\Lambda_p}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (8 * 10^{-4})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (8 * 10^{-4} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -2,0371 * 10^{-5},$$

При $\delta_p = 1 * 10^{-3}, м$

$$\Lambda_p = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 1 * 10^{-3}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 1 * 10^{-3} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 1,651 * 10^{-7},$$

$$R_p = 1 / 1,651 * 10^{-7} = 6057718,$$

$$\frac{d\Lambda_p}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (1 * 10^{-3})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (1 * 10^{-3} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -1,7098 * 10^{-5},$$

При $\delta_p = 1,1 * 10^{-3}, м$

$$\Lambda_p = 1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * 1,1 * 10^{-3}} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,69 * 1,1 * 10^{-3} / 0,002 + 0,63} + 0,96 * 0,0104 \right) =$$

$$= 1,536 * 10^{-7},$$

$$R_p = 1 / 1,536 * 10^{-7} = 6510367,$$

$$\frac{d\Lambda_p}{d\delta} = -1,257 * 10^{-7} \left(\frac{3,1416 * 1,08 * 10^{-4}}{4 * (1,1 * 10^{-3})^2} 1,034 + \frac{3,1416 * 0,0104}{0,02 * (1,1 * 10^{-3} / 0,002 + 0,63)^2} \right) =$$

$$= -1,5764 * 10^{-5},$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

$\delta_p * 10^{-3}, м$	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1
$\Lambda_p * 10^{-7}, Гн$	22,84	11,79	6,24	3,42	2,46	1,96	1,65	1,54
$R_p * 10^6, Гн^{-1}$	0,438	0,849	1,6	2,9	4,07	5,105	6,06	6,51
$\left\ \frac{d\Lambda_p}{d\delta} \right\ * 10^{-4}, Гн/м$	0,489	0,454	0,395	0,308	0,247	0,204	0,171	0,158

Зависимость магнитной проводимости рабочего воздушного зазора от его величины приведена на рис. 8..

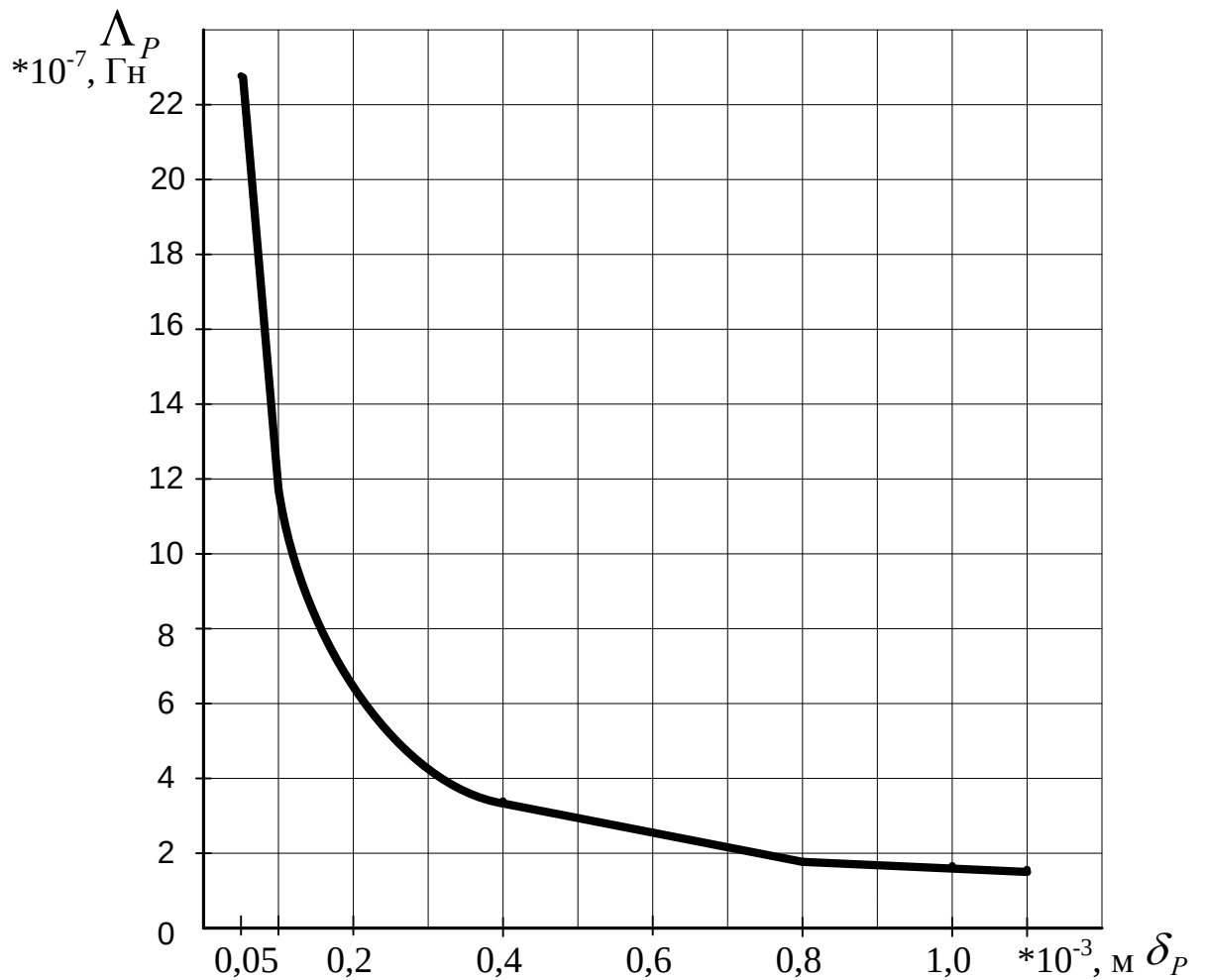


Рис. 7. Зависимость магнитной проводимости рабочего воздушного зазора от его величины

Можно отметить, что при увеличении рабочего воздушного зазора магнитная проводимость и производная магнитной проводимости уменьшаются, а магнитное сопротивление увеличивается.

ЗАДАЧА 2

Расчет магнитных проводимости и сопротивления нерабочего воздушного зазора. Расчет коэффициента рассеивания

Рассчитать магнитные проводимости нерабочего воздушного зазора. Вычислить значения коэффициента рассеивания σ в зависимости от величины рабочего воздушного зазора. Значения рабочего воздушного зазора $\delta_P = (0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1) \cdot 10^{-3}, \text{ м}$. Значение магнитной постоянной $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-7} \cdot K$ — коэффициент, зависящий от соотношения b и h , $K = 0,87$. Исходные данные для решения задания приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Пре- дпос- ледн- яя циф- ра шиф- ра	Пос- ледн- яя циф- ра шиф- ра	диамет- р сердеч- ника, $d_c = \dots * 10^{-3}$ м	высота катуш- ки, $H = \dots * 10^{-3}$ м	толщи- на ярма $a = \dots * 10^{-3}$ м	рассто- яние от сердеч- ника до горизо- нтальн- ой части ярма $h = \dots * 10^{-3}$ м	ширина ярма $b = \dots * 10^{-3}$ м	нерабоч- ий воздуш- ный зазор $\delta_{H1} = \dots * 10^{-5}$ м	толщина антимаг- нитного штифта $\Delta = \dots * 10^{-3}$ м
чет- ная или 0	0	7	14	1,3	11,25	21	1,3	0,09
	1	6	15,8	1,4	11	18	1,4	0,1
	2	8	16,2	1,6	12	19	1,5	0,07
	3	9	19,4	1,5	11,5	22	1,6	0,08
	4	10	20,5	2	11,85	23	1	0,06
	5	7,5	19	1,2	10,95	24	1,1	0,11
	6	8,2	20	1,35	12,25	20	1,2	0,12
	7	8	16	1,4	11,55	20,5	1,55	0,13
	8	6,8	17,9	1,45	12,75	19,8	1,35	0,14
	9	8,4	19	1	12,55	16,2	1,15	0,06
неч- етн- ая	0	7,8	15,5	1,1	11,25	17,2	1,25	0,05
	1	8,5	16,3	2	13	21	1,6	0,04
	2	9,4	18,5	1,9	11,45	19,4	1,7	0,1
	3	6,7	18	1,8	13,25	19	1,35	0,07
	4	7,4	17	1,7	14,25	22	1,1	0,08
	5	8,8	15	1,6	13,45	18,6	1	0,1
	6	9,3	17,5	1,75	13,75	21	1,2	0,13
	7	6,4	15,5	1,65	14	19,5	1,4	0,06
	8	7,6	16	1,83	11,4	20,4	1,3	0,07
	9	7,7	16,5	1,73	13,45	18,8	1,5	0,08

Типовой пример.

Исходные данные:

1) эскиз рабочего воздушного зазора (рис. 2):

2) Δ - толщина антимагнитного штифта, $\Delta = 0,05$ мм;3) a - толщина ярма, $a = 1,5 * 10^{-3}$ м;4) h - расстояние от сердечника до горизонтальной части ярма, $h = 13 * 10^{-3}$

м;

5) b - ширина ярма $b = 20 * 10^{-3}$ м;6) d_c - диаметр сердечника, $d_c = 0,007$ м;

7) H - высота катушки, $H=16,5*10^{-3}$ м;

8) δ_{H1} - нерабочий воздушный зазор между вертикальной частью ярма прямоугольной формы и основанием цилиндрического сердечника,

$$\delta_{H1} = 1,5*10^{-5} \text{ м};$$

9) K — коэффициент, зависящий от соотношения b и h , $K = 0,87\text{№}$

10) расстояние от оси вращения якоря до оси симметрии

$$R_0 = a + h = 14,5*10^{-3} \text{ м}$$

Нерабочий зазор состоит из изменяющейся части, зависящей от величины рабочего зазора и постоянной части, обусловленной антимагнитным штифтом: С учетом ранее принятых допущений связь между величиной рабочего

воздушного зазора и изменяющейся частью нерабочего воздушного зазора δ'_H в зависимости от величины рабочего воздушного зазора δ_p будет следующей.

$$\text{При } \delta_p = 0,05*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 2,586*10^{-6}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,1*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 5,172*10^{-6}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,2*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 1,034*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,4*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 2,069*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,6*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 3,1035*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,8*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 4,1379*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 1*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 5,172*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 1,1*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta'_H = \delta_p * 0,5*1,5*10^{-3} / 14,5*10^{-3} = 5,6897*10^{-5}$$

Нерабочий зазор в соответствии с выражением (6) равен:

$$\delta_H = \delta'_H + \Delta,$$

$$\text{При } \delta_p = 0,05*10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta'_H + \Delta = 2,586*10^{-6} + 5*10^{-5} = 5,2586*10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,1 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 5,172 * 10^{-6} + 5 * 10^{-5} = 5,52 * 10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,2 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 1,035 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 6,03 * 10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,4 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 2,069 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 7,07 * 10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,6 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 3,104 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 8,1 * 10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 0,8 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 4,138 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 9,14 * 10^{-5}$$

$$\text{При } \delta_p = 1 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 5,172 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 1,02 * 10^{-4}$$

$$\text{При } \delta_p = 1,1 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\delta_H = \delta_H' + \Delta = 5,68 * 10^{-5} + 5 * 10^{-5} = 1,07 * 10^{-4}$$

Магнитная проводимость, в зависимости от величины рабочего воздушного зазора определяется по формуле (5);

$$\text{При } \delta_p = 0,05 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 5,26 * 10^{-5} = 7,169 * 10^{-7},$$

$$\text{При } \delta_p = 0,1 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 5,52 * 10^{-5} = 6,833 * 10^{-7},$$

$$\text{При } \delta_p = 0,2 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 6,03 * 10^{-5} = 6,247 * 10^{-7},$$

$$\text{При } \delta_p = 0,4 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 7,07 * 10^{-5} = 5,333 * 10^{-7},$$

$$\text{При } \delta_p = 0,6 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 8,1 * 10^{-5} = 4,652 * 10^{-7},$$

$$\text{При } \delta_p = 0,8 * 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 9,14 * 10^{-5} = 4,126 * 10^{-7},$$

При $\delta_p = 1 * 10^{-3}, м$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 1,02 * 10^{-4} = 3,706 * 10^{-7},$$

При $\delta_p = 1,1 * 10^{-3}, м$

$$\Lambda_H = 1,257 * 10^{-6} * 0,02 * 0,0015 / 1,07 * 10^{-4} = 3,527 * 10^{-7},$$

Магнитное сопротивление, в зависимости от величины рабочего воздушного зазора определяется как обратная величина от магнитной проводимости.

При $\delta_p = 0,05 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 7,169 * 10^{-7} = 1394892,$$

При $\delta_p = 0,1 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 6,833 * 10^{-7} = 1463494,$$

При $\delta_p = 0,2 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 6,247 * 10^{-7} = 1600696,$$

При $\delta_p = 0,4 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 5,333 * 10^{-7} = 1875101,$$

При $\delta_p = 0,6 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 4,652 * 10^{-7} = 2149506,$$

При $\delta_p = 0,8 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 4,126 * 10^{-7} = 2423911,$$

При $\delta_p = 1 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 3,706 * 10^{-7} = 2698317,$$

При $\delta_p = 1,1 * 10^{-3}, м$

$$R_H = 1 / 3,527 * 10^{-7} = 2835519,$$

В соответствии с принятыми значениями рабочего воздушного зазора были вычислены значения нерабочего зазора (6), его магнитная проводимость (5) и магнитное сопротивление. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

$\delta_p * 10^{-3}, м$	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1
$\delta_H * 10^{-3}, м$	0,05	0,055	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,105
$\Lambda_H * 10^{-7}, Гн$	7,17	6,83	6,25	5,33	4,65	4,13	3,7	3,53

$R_H * 10^6, \Gamma H^{-1}$	1,39	1,46	1,6	1,88	2,15	2,42	2,698	2,84
-----------------------------	------	------	-----	------	------	------	-------	------

Магнитная проводимость нерабочего воздушного зазора между вертикальной частью ярма и основанием цилиндрического сердечника (зазор обусловлен наличием немагнитного покрытия этих деталей и не плотностью их прилегания) рассчитывается без учета краевых потоков по выражению (5):

$$\Lambda_{H1} = 1,257 * 10^{-6} * 3,14 * 0,007^2 / 4 * 1,5 * 10^{-5} = 3,224 * 10^{-6}$$

Магнитное сопротивление этого зазора:

$$R_{H1} = 1 / 3,224 * 10^{-6} = 310166,9,$$

Проводимость зазора утечки, образованного параллельными цилиндрическим сердечником и горизонтальной частью ярма (рис. 4) рассчитывается по выражениям (7 - 9) .

Удельная магнитная проводимость зазора утечки в соответствии с выражением (8):

$$\lambda = \frac{2 * 0,87 * 4 * \pi * 10^{-7} * \pi}{\ln(2 * 1,86 * + \sqrt{4 * 1,86^2 - 1})} = 34,55 * 10^{-7} \Gamma H / м,$$

где $K = 0,87$ — коэффициент, зависящий от соотношения b и h :
 $n = h/d_c = 13 * 10^{-3} / 7 * 10^{-3} = 1,86$.

Полная проводимость зазора утечки:

$$\Lambda_y = 34,55 * 10^{-7} * 16,5 * 10^{-3} = 0,57 * 10^{-7} \Gamma H.$$

Приведенная магнитная проводимость зазора утечки (7):

$$\Lambda_{yII} = 0,57 * 10^{-7} / 2 = 0,285 * 10^{-7} \Gamma H.$$

Приведенное магнитное сопротивление зазора утечки:

$$R_{yII} = 1 / \Lambda_{yII} = 1 / 0,285 * 10^{-7} = 350 * 10^5 \Gamma H^{-1},$$

Упрощенная схема замещения магнитной цепи электромагнита без учета магнитного сопротивления стальных участков имеет вид, приведенный на рис. 5.

Подставляя (10) в (11), получим:

$$\text{При } \delta_p = 0,05 * 10^{-3}, м$$

$$\sigma = 1 + (437747,5 + 1394892 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,0606$$

$$\text{при } \delta_p = 0,1 * 10^{-3}, м$$

$$\sigma = 1 + (848497,2 + 1463494 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,07414$$

$$\text{при } \delta_p = 0,2 * 10^{-3}, м$$

$$\sigma = 1 + (1604121 + 1600696 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,0994$$

при $\delta_p = 0,4 * 10^{-3}, м$

$$\sigma = 1 + (2923448 + 1875101 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,145$$

при $\delta_p = 0,6 * 10^{-3}, м$

$$\sigma = 1 + (4071059 + 2149506 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,185$$

при $\delta_p = 0,8 * 10^{-3}, м$

$$\sigma = 1 + (5104873 + 2423811 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,2217$$

при $\delta_p = 1 * 10^{-3}, м$

$$\sigma = 1 + (6057718 + 2698317 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,256$$

при $\delta_p = 1,1 * 10^{-3}, м$

$$\sigma = 1 + (6510367 + 2835519 + 310167) / (31067 + 35956544,9) = 1,273$$

В таблице 5 приведены значения коэффициента рассеяния, определенные по (11) при разных величинах рабочего зазора.

Таблица 5

$\delta_p * 10^{-3}, м$	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1
σ	1,061	1,074	1,099	1,145	1,185	1,22	1,256	1,27

Чем больше рабочий воздушный зазор, тем больше коэффициент рассеяния.

ЗАДАЧА 3

Расчет кривых намагничивания магнитной системы электромагнита

Рассчитать и построить кривую намагничивания магнитной системы электромагнита. При срабатывании реле изменяется рабочий воздушный зазор и его магнитная проводимость. Исходные данные для решения задания приведены в табл. 6 - 10.

Кроме того:

- 1) эскиз магнитной системы (рис. 6);
- 2) материал магнитопровода — электро-техническая сталь марки 20880;

3) значения магнитного потока в воздушном зазоре: $3 \cdot 10^{-5}$; $4 \cdot 10^{-5}$; $4,5 \cdot 10^{-5}$; $5 \cdot 10^{-5}$ (Вб).

6) кривая намагничивания материала магнитопровода (приложение 1).

Таблица 6

Участок	Обозначение на схеме замещения	Сечение, 10^{-6} , м ²	Длина силовой линии, 10^{-3} , м
1.Верхняя часть сеодечника (АБ)	<i>R1</i>	176,625	49
2. Якорь (БВ)	<i>R2</i>	50	42
3. Верхняя часть ярма (ВГ)	<i>R3</i>	50	49
4. Нижняя часть ярма (ГД)	<i>R4</i>	50	86
5. Нижняя часть сердечника (ДА)	<i>R5</i>	176,625	49

Таблица.7.

Предпос ледняя цифра шифра	Пос ледняя цифра шифра	Магнит ное сопроти вление рабоче го воздуш ного зазора, $R_P = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнит ное сопроти вление нерабоч его воздуш ного зазора $R_H = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора между ярмом и основанием сердечника $R_{HI} = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	магнитн ый поток $\Phi = \dots * 10^{-5}$ Вб	рабочий воздушн ый зазор $\delta_P = \dots * 10^{-3}$ м	коэффици ент рассеяния σ
чет ная или 0	0	0,438	1,39	0,31	3	0,05	1,058
	1	0,44	1,58	0,3			
	2	0,4	1,62	0,32			
	3	0,45	1,4	0,33			
	4	0,43	1,35	0,29			
	0	1,6	1,63	0,31	4		
	1	1,5	1,65	0,3			
	2	1,7	1,62	0,32			
	3	1,66	1,64	0,33			
	4	1,56	1,61	0,29			
	0	4,07	2,15	0,31	4,5		
	1	4,1	2,1	0,3			
	2	4,17	2,25	0,32			
	3	4,2	2,12	0,33			
	4	4	2,13	0,29			
	0	6,51	2,84	0,31			

	1	6,45	2,87	0,3	5		
	2	6,55	2,83	0,32			
	3	6,6	2,85	0,33			
	4	6,4	2,8	0,29			

Таблица.8.

Пред- пос- ледн- яя циф- ра шиф- ра	Пос- ледн- яя циф- ра шиф- ра	Магнит- ное сопроти- вление рабочег- о воздуш- ного зазора, $R_P = \dots * 10^6, \Gamma_H^{-1}$	Магнит- ное сопроти- вление нерабоч- его воздуш- ного зазора $R_H = \dots * 10^6, \Gamma_H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора между ярмом и основанием сердечника $R_{HI} = \dots * 10^6, \Gamma_H^{-1}$	магнитн- ый поток $\Phi = \dots * 10^{-5} \text{ Вб}$	рабочий воздуш- ный зазор $\delta_P = \dots * 10^{-3} \text{ м}$	коэффици- ент рассеяния σ
чет- ная или 0	5	1,5	1,67	0,21	3	0,2	1,096
	6	1,61	1,74	0,19			
	7	1,65	1,59	0,21			
	8	1,72	1,66	0,22			
	9	1,63	1,8	0,215			
	5	1,68	1,57	0,198	4		
	6	1,72	1,81	0,23			
	7	1,74	1,8	0,24			
	8	1,76	1,62	0,23			
	9	1,86	1,67	0,195			
	5	1,47	1,65	0,215	4,5		
	6	1,71	1,61	0,22			
	7	1,88	1,65	0,232			
	8	1,82	1,72	0,3			
	9	1,67	1,63	0,26			
	5	1,77	1,67	0,24	5		
	6	1,64	1,74	0,28			
	7	1,59	1,59	0,35			
	8	1,86	1,66	0,31			
	9	1,87	1,8	0,33			

Таблица.9.

Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	Магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора, $R_P = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора $R_H = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора между ярмом и основанием сердечника $R_{HI} = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	магнитный поток $\Phi = \dots * 10^{-5} Bб$	рабочий воздушный зазор $\delta_P = \dots * 10^{-3} м$	коэффициент рассеяния σ
нечетная	0	4,07	2,15	0,41	3	0,6	1,18
	1	4,1	2,1	0,4			
	2	4,17	2,25	0,42			
	3	4,2	2,12	0,45			
	4	4	2,13	0,39			
	0	4,6	2,63	0,385	4		
	1	4,5	2,65	0,48			
	2	4,7	2,62	0,52			
	3	4,66	2,64	0,43			
	4	4,56	2,61	0,39			
	0	4,26	2,33	0,46	4,5		
	1	4,35	2,25	0,54			
	2	4,17	2,3	0,4			
	3	4,26	2,4	0,5			
	4	4,36	2,2	0,49			
	0	4,31	2,4	0,33	5		
	1	4,5	2,7	0,32			
	2	4,51	2,3	0,34			
	3	4,32	2,5	0,3			
	4	4,4	2,8	0,4			

Таблица.10.

Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	Магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора, $R_P = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора $R_H = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	Магнитное сопротивление нерабочего воздушного зазора между ярмом и основанием сердечника $R_{HI} = \dots * 10^6, \Gamma H^{-1}$	магнитный поток $\Phi = \dots * 10^{-5} Bб$	рабочий воздушный зазор $\delta_P = \dots * 10^{-3} м$	коэффициент рассеяния σ
нечетн	5	6,7	2,84	0,41			
	6	6,55	2,88	0,4			

ая	7	6,48	2,87	0,42	3	1,1	1,27
	8	6,65	2,82	0,45			
	9	6,66	2,91	0,39			
	5	6,6	2,63	0,44	4		
	6	6,5	2,75	0,43			
	7	6,7	2,92	0,43			
	8	6,66	2,94	0,437			
	9	6,56	2,81	0,5			
	5	6,86	2,93	0,46	4,5		
	6	6,67	3	0,54			
	7	6,57	2,83	0,46			
	8	6,66	2,75	0,5			
	9	6,56	2,92	0,49			
	5	6,42	2,94	0,44	5		
	6	6,5	2,87	0,48			
	7	6,51	2,88	0,54			
	8	6,72	2,78	0,43			
	9	6,64	2,86	0,48			

Типовой пример.

Исходные данные:

- 1) эскиз магнитной системы (рис. 6);
- 2) материал магнитопровода — электро-техническая сталь марки 20880;
- 4) рабочий воздушный зазор: $0,05 \cdot 10^{-3}$ м;
- 5) значения магнитного потока в воздушном зазоре: $3 \cdot 10^{-5}$; $4 \cdot 10^{-5}$; $4,5 \cdot 10^{-5}$; $5 \cdot 10^{-5}$ (Вб).
- 6) кривая намагничивания материала магнитопровода (приложение 1).
- 7) значения коэффициента рассеяния σ приведены в таблице 5.

Разбиваем магнитопровод на участки, каждый из которых имеет постоянное сечение и обтекается одним и тем же магнитным потоком. Для рассчитываемого электромагнита можно выделить пять участков: АБ, БВ, ВГ, ГД, ДА (рис. 6). В табл. 8 приведены поперечные сечения и средняя силовая линия каждого участка.

Таблица 8

Участок	Обозначение на схеме замещения	Сечение, 10^{-6} , м ²	Длина силовой линии, 10^{-3} , м
1. Верхняя часть сеодечника (АБ)	R1	38,46	9
2. Якорь (БВ)	R2	30	16
3. Верхняя часть ярма (ВГ)	R3	30	9
4. Нижняя часть ярма (ГД)	R4	30	25
5. Нижняя часть	R5	38,46	9

сердечника (ДА)			
-----------------	--	--	--

Полная схема замещения электромагнита приведена на рис. 7. Участки с магнитными сопротивлениями R_1, R_2, R_3 обтекаются магнитным потоком рабочего воздушного зазора Φ_p , а с R_4 и R_5 — полным магнитным потоком $\Phi = \sigma * \Phi_p$.

Расчет координат точек для построения кривых намагничивания магнитной системы графоаналитическим методом выполняется в следующей последовательности.

Исходя из заданных значений магнитного потока в рабочем зазоре и площади сечения, определяем индукцию в стали на участках магнитной системы по выражению (13) для $\Phi = 3 * 10^{-5}$ Вб:

$$B_{R_1} = 3 * 10^{-5} / 3,846 * 10^{-5} = 0,78$$

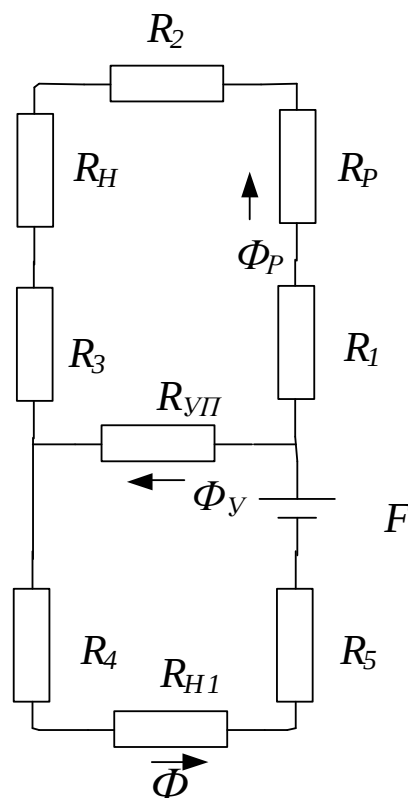
$$B_{R_2} = 3 * 10^{-5} / 3 * 10^{-5} = 1$$

$$B_{R_3} = 3 * 10^{-5} / 3 * 10^{-5} = 1$$

$$B_{R_4} = 1,061 * 3 * 10^{-5} / 3 * 10^{-5} = 1,061$$

$$B_{R_5} = 1,061 * 3 * 10^{-5} / 3,846 * 10^{-5} = 0,83$$

Для других значений магнитного потока в воздушном зазоре значения магнитной индукции рассчитываются аналогично.



Ряс. 3.19. Полная схема замещения электромагнита

По кривой намагничивания материала магнитопровода (приложение 1) находится напряженность магнитного поля, соответствующая полученной индукции, Падение магнитного напряжения на стальных участках по закону

полного тока для $\Phi=3*10^{-5}$ Вб определяется выражением (14):

$$F_{R1} = 160 * 0,009 = 1,44$$

$$F_{R2} = 200 * 0,016 = 3,2$$

$$F_{R3} = 200 * 0,009 = 1,8$$

$$F_{R4} = 210 * 0,025 = 5,25$$

$$F_{R5} = 170 * 0,009 = 1,53$$

Для других участков обтекаемых полным и рабочим потоком падение магнитного напряжения на стальных участках по закону полного тока рассчитываются аналогично.

Падение магнитного напряжения в воздушных зазорах по закону Ома для магнитной цепи (15) для $\Phi=3*10^{-5}$ Вб, будет равно:

$$F_p = 3*10^{-5} * 437747,5 = 13,13242$$

$$F_H = 3*10^{-5} * 1394892 = 41,84677$$

$$F_{H1} = 3,18176 * 10^{-5} * 310166,9 = 9,868781$$

МДС катушки, необходимая для создания принятого значения магнитного потока в рабочем зазоре, равна сумме рассчитанных падений магнитного напряжения на каждом участке по замкнутому контуру согласно второму закону Кирхгофа для магнитной цепи (16):

$$F_K = 1,44 + 3,2 + 1,8 + 13,13242 + 41,84677 + 5,25 + 1,53 + 9,868781 = 78,06798$$

Для построения кривой намагничивания нужно задаться новым значением магнитного потока и вновь выполнить вышеприведенные действия.

В табл. 9 приведены результаты расчетов кривой намагничивания при рабочем зазоре $0,05*10^{-3}$ м по указанной методике.

Таблица 9

$\Phi_P * 10^{-5}$, <i>Вб</i>	Параметр ы	Участки обтекаемые рабочим потоком					$\sigma * \Phi_P * 10^{-5}$, <i>Вб</i>	Участки обтекаемые полным потоком			<i>F, A</i>
		R1	R2	R3	δ_P	δ_H		R4	R5	δ_{H1}	
$\delta_P = 0,05 * 10^{-3}$, м; $\sigma = 1,058$											
3	<i>B, Тл</i>	0.78	1	1	-	-	3,18	1,06	0,82	-	
	<i>H, А/м</i>	160	200	200	-	-		210	170	-	
	<i>F, А</i>	1,44	3,2	1,8	13,132	41,85		5,25	1,53	9,87	78,1
4	<i>B, Тл</i>	1.04	1,33	1,33	-	-	4,3	1,4	1,1	-	
	<i>H, А/м</i>	210	410	410	-	-		600	210	-	
	<i>F, А</i>	1,89	6,56	3,69	17,51	59,93		16	1,89	13,3	120
4,5	<i>B, Тл</i>	1,17	1.5	1,5	-	-	4.77	1.59	1.24	-	
	<i>H, А/м</i>	290	1000	1000	-	-		1900	330	-	
	<i>F, А</i>	2.61	16	9	20,89	66,57		47,5	2,97	14,8	180
	<i>B, Тл</i>	1.3	1,67	1,67	-	-		1.69	1 38	-	

5	$H, A/m$	360	4000	4000	-	-	5,3	7000	490	-	
	F, A	3,24	64	36	23,21	73,97		175	4,41	16,5	396

По этим результатам строится кривая намагничивания (рис.9).

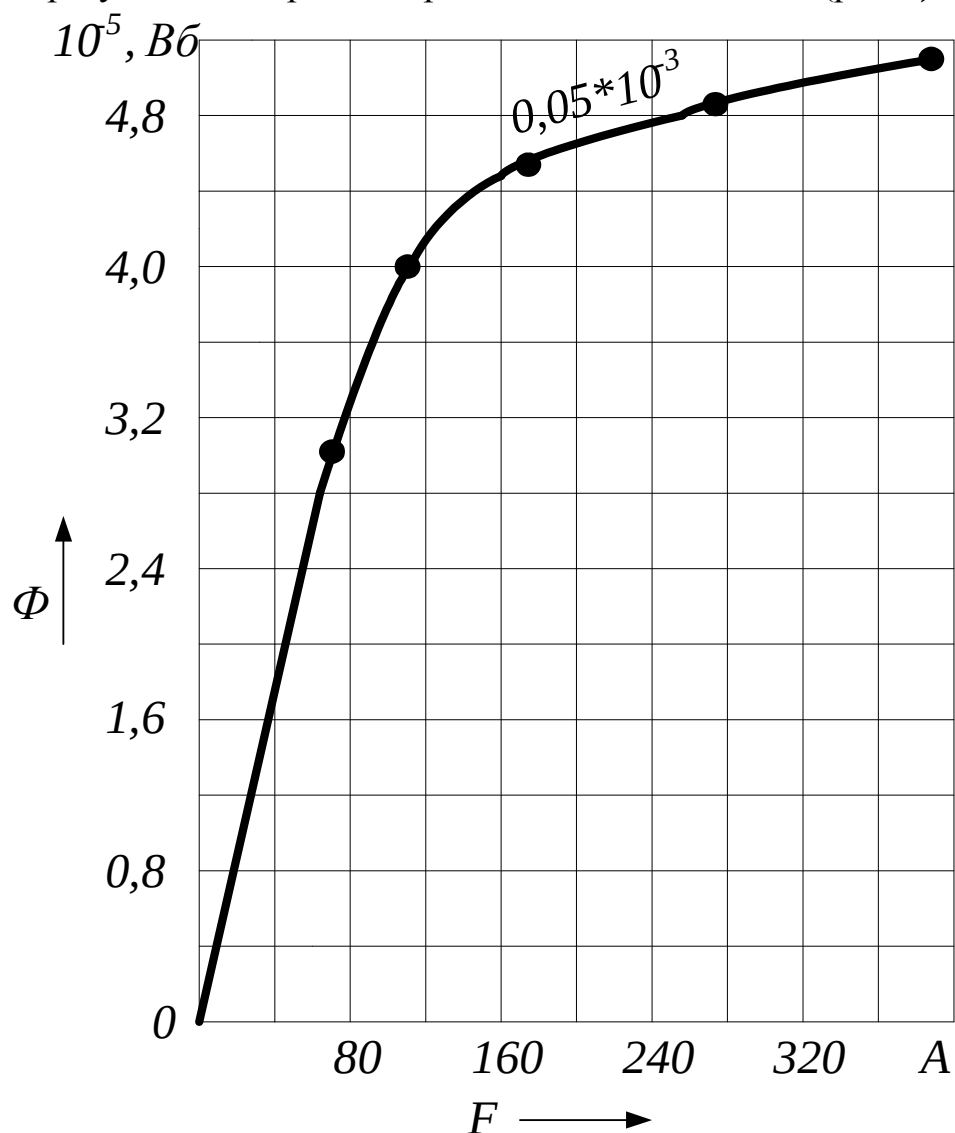


Рис. 9. Кривые намагничивания электромагнита

Кривая намагничивания электромагнита для заданного значения рабочего воздушного зазора имеет вид, представленный на рис.9. Каждому значению рабочего воздушного зазора соответствует своя кривая намагничивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. А. Жукова. В. П. Жуков Курсовое и дипломное проектирование по низковольтным электрическим аппаратам. Допущено министерством промышленности в качестве учебного пособия для техникумов М., Высшая школа 1987.
4. А. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов.— М.: Энергия, 1971.
5. Соболев С. Н. Расчет и конструирование низковольтной электрической аппаратуры. — М.: Высшая школа, 1981.
6. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. — М.: Энергия, 1972.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Кривая намагничивания материала магнитопровода

