

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Часть II Катушка со стальным сердечником в цепи переменного тока

На магнитопровод из трансформаторной стали с заданными l – длиной средней линии, S – площадью поперечного сечения и массой M намотана катушка, содержащая w витков (рис. 1).

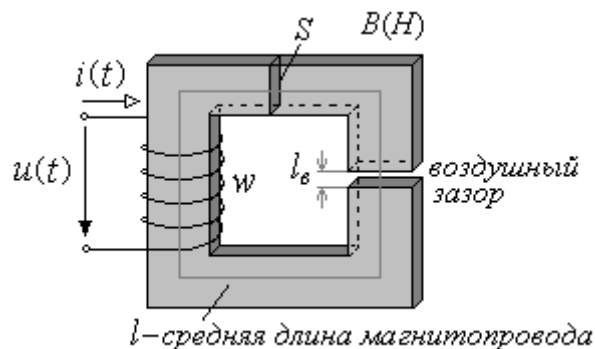


Рис.1

Катушка питается от источника напряжения $u(t) = U_0 \sqrt{2} \sin 314t$, В. Сопротивление обмотки медного провода R_M , сопротивление рассеяния X_S . Зависимости $B_m(H)$, удельных потерь $P_0(B_m)$ [Вт/кг] и удельной реактивной мощности $Q_0(B_m)$ [вар/кг] заданы таблицей.

Таблица 1

B_m , Тл	0	0,5	0,73	0,88	1,0	1,1	1,23	1,35	1,4	1,48	1,5
H , [А/см]	0	0,5	1,0	1,5	2,15	3,1	4,7	7,0	9,0	13,5	20
P_0 , [Вт/кг]	0	0,44	0,66	0,92	1,2	1,46	1,75	2,1	2,26	2,45	3,08
Q_0 , [Вар/кг]	0	1,6	2,4	3,3	4,6	6,7	10,0	16,0	20	25,8	31,2

1. Без учета активного сопротивления обмотки и потока рассеяния рассчитать действующее значение входного напряжения катушки сердечника U_0 , которое соответствует максимальной индукции $B_m = 1,5$ Тл в магнитопроводе без зазора

2. Без учета активного сопротивления обмотки и потока рассеяния:
 - 2.1. Построить кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид в интервале значений $U = (0,5 \div 1,0)U_0$ для магнитопровода без воздушного зазора и с воздушным зазором l_g .
 - 2.2. Построить на протяжении одного периода кривые $u(t)$, $\Phi(t)$ и $i(t)$ для магнитопровода без воздушного зазора.
3. Приняв $U_\Phi = 0,95U_0$ с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния рассчитать параметры параллельной схемы замещения катушки для магнитопровода без воздушного зазора и с воздушным зазором l_g .
4. Найти для сердечника с зазором полную мощность источника и мощность в воздушном зазоре. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные:

Параметры катушки со стальным сердечником:

количество витков

$$w = 620;$$

площадь поперечного сечения магнитопровода

$$S = 17, [\text{см}^2];$$

средняя длина магнитопровода

$$l = 76 [\text{см}];$$

масса магнитопровода

$$M = 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot l \cdot S = 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 76 \cdot 17 = 10,0776 \approx 10 [\text{кг}] (S [\text{см}^2], l [\text{см}]),$$

воздушный зазор

$$l_g = 1,7 [\text{мм}];$$

сопротивление обмотки

$$R_M = 3,41 [\text{Ом}];$$

индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_S = 7,44 [\text{Ом}].$$

Решение

1. Рассчитаем действующее значение входного напряжения катушки сердечника U_0 , без учета активного сопротивления обмотки $R_M = 0$ и потока рассеяния $X_S = 0$, которое соответствует максимальной индукции $B_m = 1,5$ Тл в магнитопроводе без воздушного зазора $B_g = 0$ (рис. 2).

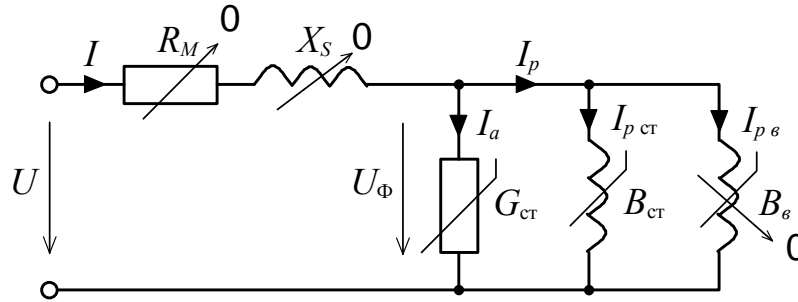


Рис. 2

Действующее значение входного напряжения катушки сердечника

$$U_0 = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 620 \cdot 17 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 350,98 \text{ В.}$$

Мгновенное значение входного напряжения катушки сердечника

$$u(t) = U_0 \sqrt{2} \sin \omega t = 350,98 \sqrt{2} \sin 314t = 496,36 \sin 314t \text{ В.}$$

2. Построим кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид в интервале значений $U = (0,5 \div 1,0)U_0$ для магнитопровода без учета активного сопротивления обмотки и потока рассеяния, без воздушного зазора (рис. 3, а) и с воздушным зазором l_g (рис. 3, б).

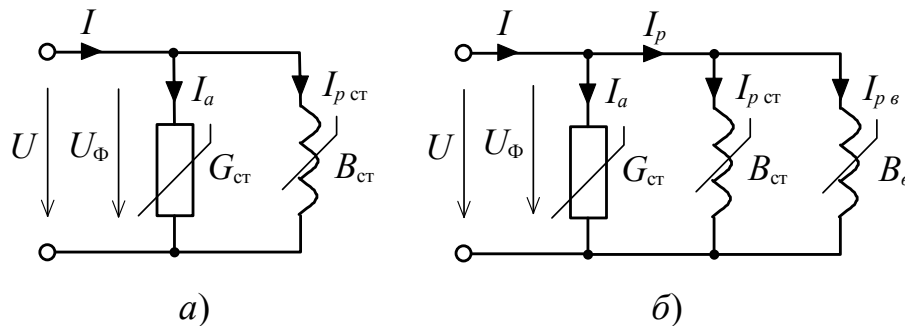


Рис. 3

Расчетные формулы для магнитопровода без воздушного зазора (рис. 3, а)

$$U = U_\Phi = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B_m;$$

$$I_a = \frac{P}{U} = \frac{P_0 \cdot M}{U}; \quad I_{pct} = \frac{Q}{U} = \frac{Q_0 \cdot M}{U}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_{pct}^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{I_{pct}}{I_a}; \quad \Phi = B_m \cdot S.$$

При $U = 0,5U_0$ индукция магнитного поля в магнитопроводе

$$B_m = \frac{0,5U_0}{4,44 \cdot f \cdot w \cdot S} = \frac{0,5 \cdot 350,98}{4,44 \cdot 50 \cdot 620 \cdot 17 \cdot 10^{-4}} = 0,75 \text{ Тл.}$$

Данные вычислений для магнитопровода без воздушного зазора заносим в таблицу 2

Таблица 2 – Расчет магнитопровода без воздушного зазора

B_m , Тл	U , В	I_a , А	$I_{p \text{ ст.}}$, А	I , А	φ , град	Φ , мВб
0,73	170,811	0,0389	0,1416	0,1469	74,62	1,24
0,88	205,909	0,0450	0,1615	0,1677	74,42	1,50
1	233,988	0,0517	0,1981	0,2047	75,38	1,70
1,1	257,387	0,0572	0,2623	0,2685	77,71	1,87
1,23	287,805	0,0613	0,3502	0,3555	80,07	2,09
1,35	315,884	0,0670	0,5104	0,5148	82,52	2,30
1,4	327,583	0,0695	0,6153	0,6192	83,55	2,38
1,48	346,302	0,0713	0,7508	0,7542	84,58	2,52
1,5	350,982	0,0884	0,8958	0,9002	84,36	2,55

Зависимость $\Phi(I)$ для магнитопровода без воздушного зазора представлена на рис. 4.

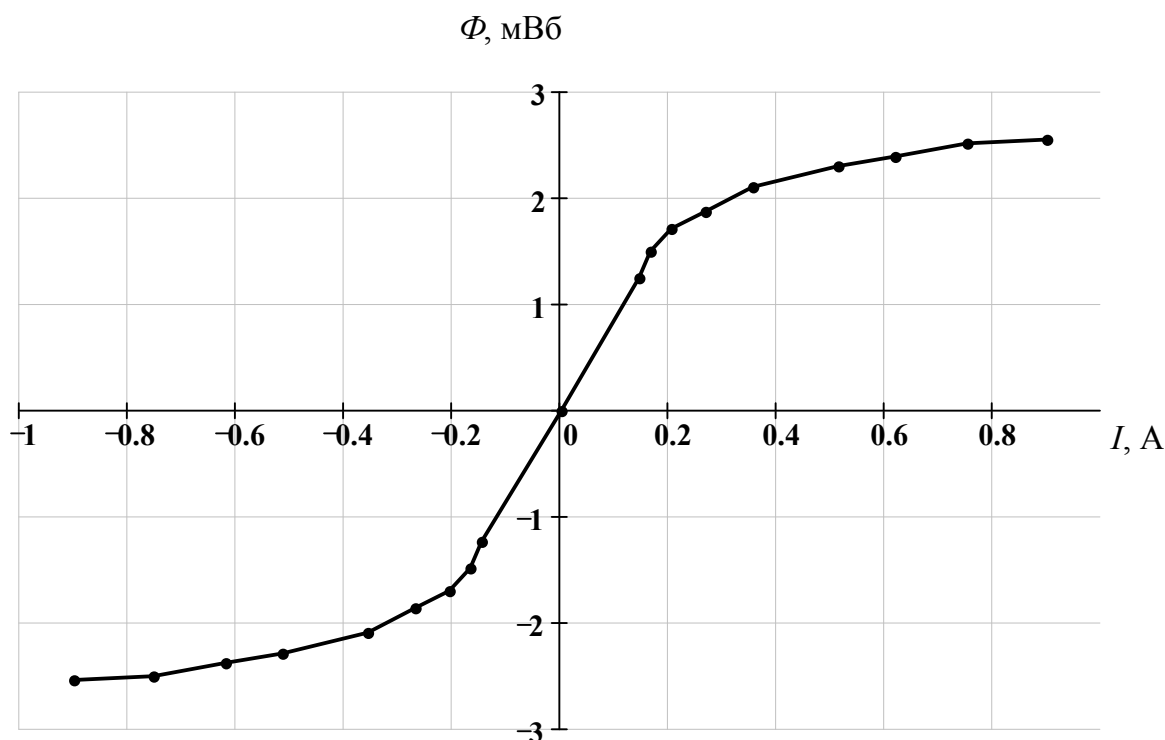


Рис. 4 Зависимость $\Phi(I)$ для магнитопровода без воздушного зазора

По данным табл. 2 кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид для магнитопровода без воздушного зазора представлены на рис. 5.

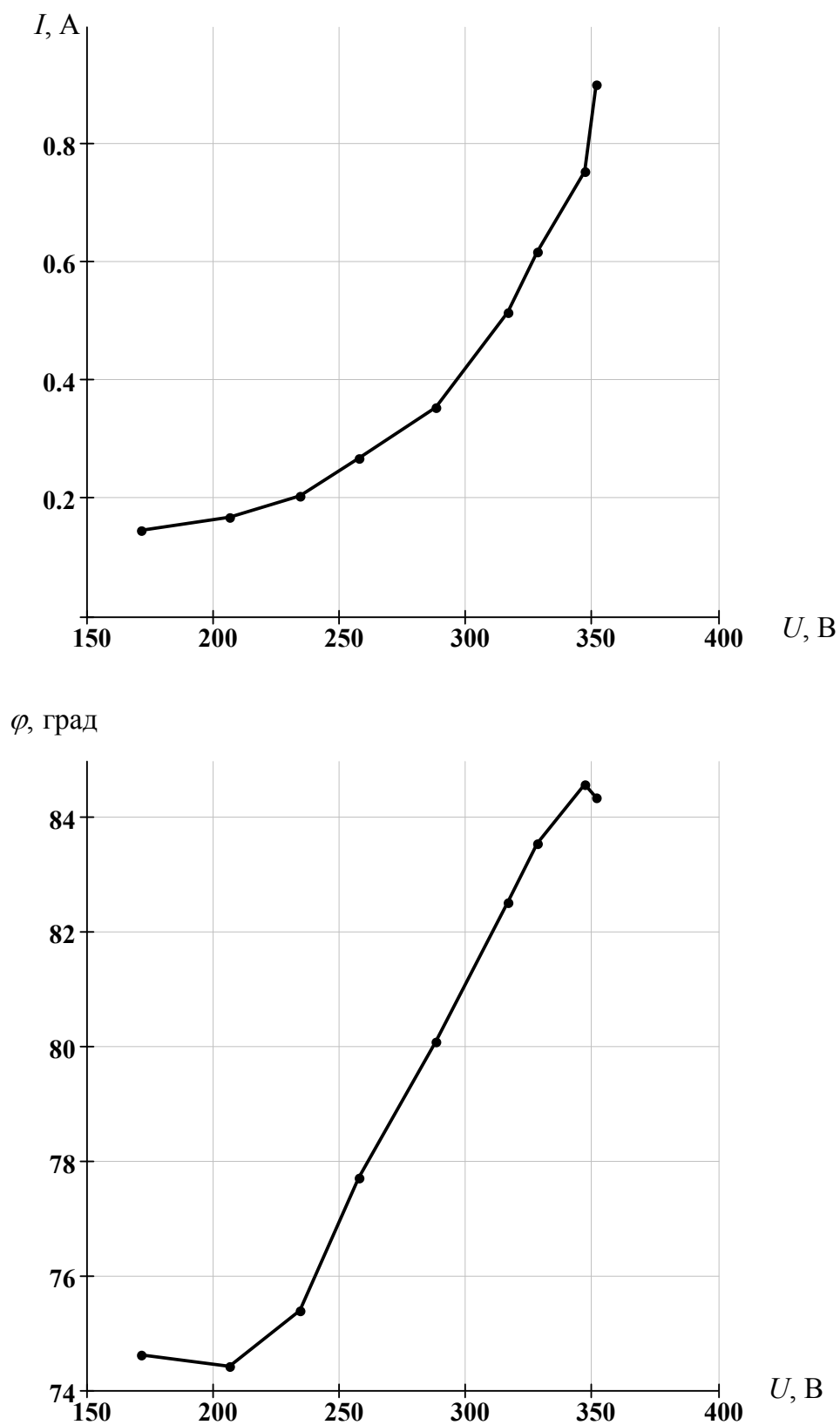


Рис. 5 Кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид для магнитопровода без воздушного зазора

Построим на протяжении одного периода кривые $u(t)$, $\Phi(t)$ и $i(t)$ для магнитопровода без воздушного зазора.

Напряжение на катушке

$$u(t) = U_0 \sqrt{2} \sin \omega t = 350,98 \sqrt{2} \sin 314t = 496,36 \sin 314t \text{ В}$$

связано с магнитным потокосцеплением $\Psi = w \cdot \Phi$ выражением

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(w \cdot \Phi)}{dt} = w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Откуда магнитный поток в магнитопроводе

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \frac{1}{w} \int u(t) dt = \frac{1}{w} \int U_0 \sqrt{2} \sin \omega t dt = \\ &= -\frac{U_0 \sqrt{2}}{w \cdot \omega} \cos \omega t = -\frac{496,36}{620 \cdot 314} \cos 314t = -2,550 \cdot 10^{-3} \cos 314t \text{ Вб.} \end{aligned}$$

Строим график зависимости

$$\Phi(t) = -2,550 \cos 314t \text{ мВб.}$$

По графику $\Phi(t)$ и зависимости $\Phi(I)$ для магнитопровода без воздушного зазора (рис. 4) строим зависимость $i(t)$ (рис. 6).

Расчетные формулы для магнитопровода с воздушным зазором (рис. 3, б)

$$U = U_{\phi} = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B_m;$$

$$I_a = \frac{P_0 \cdot M}{U}; I_{p \text{ ст}} = \frac{Q_0 \cdot M}{U}; I_{p \text{ в}} = \frac{U}{X_{\epsilon}}; I = \sqrt{I_a^2 + (I_{p \text{ ст}} + I_{p \text{ в}})^2}; \varphi = \arctg \frac{I_{p \text{ ст}} + I_{p \text{ в}}}{I_a};$$

$$\Phi = B_m \cdot S,$$

где реактивное сопротивление воздушного зазора дается выражением

$$X_{\epsilon} = \frac{U}{I_{p \text{ в}}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B_m}{\frac{H_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}}{w}} = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w^2 \cdot S \cdot B_m}{H_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}} = \frac{2\pi f \cdot w^2 \cdot S \cdot B}{H_{\epsilon} \cdot l_{\epsilon}} = \frac{\omega \cdot w^2 \cdot S \cdot \mu_0}{l_{\epsilon}}.$$

Находим реактивное сопротивление воздушного зазора

$$X_{\epsilon} = \frac{\omega \cdot w^2 \cdot S \cdot \mu_0}{l_{\epsilon}} = \frac{314 \cdot 620^2 \cdot 17 \cdot 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{1,7 \cdot 10^{-3}} = 151,68 \text{ Ом.}$$

Данные вычислений для магнитопровода с воздушным зазором заносим в таблицу 3

Таблица 3 – Расчет магнитопровода с воздушным зазором

B_m , Тл	U , В	I_a , А	$I_{p \text{ ст}}$, А	$I_{p \text{ в}}$, А	I , А	φ , град	Φ , мВб
0,73	170,811	0,0389	0,1416	1,1261	1,2683	88,24	1,24
0,88	205,909	0,0450	0,1615	1,3575	1,5197	88,30	1,50
1	233,988	0,0517	0,1981	1,5427	1,7415	88,30	1,70
1,1	257,387	0,0572	0,2623	1,6969	1,9601	88,33	1,87
1,23	287,805	0,0613	0,3502	1,8975	2,2485	88,44	2,09
1,35	315,884	0,0670	0,5104	2,0826	2,5939	88,52	2,30
1,4	327,583	0,0695	0,6153	2,1597	2,7759	88,56	2,38
1,48	346,302	0,0713	0,7508	2,2831	3,0348	88,65	2,52
1,5	350,982	0,0884	0,8958	2,3140	3,2110	88,42	2,55

По данным табл. 3 кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид для магнитопровода с воздушным зазором представлены на рис. 7.

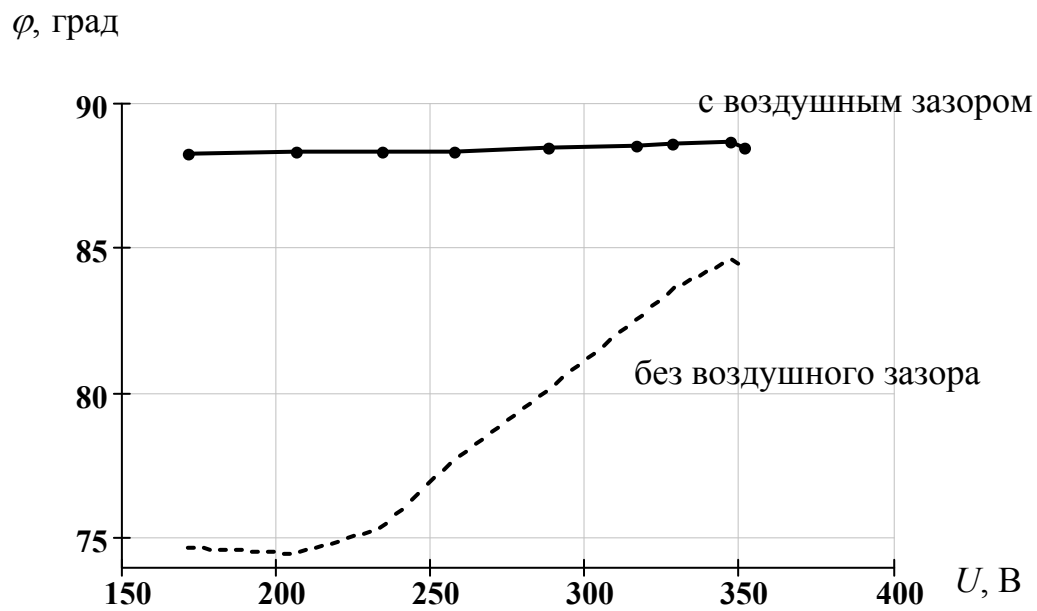
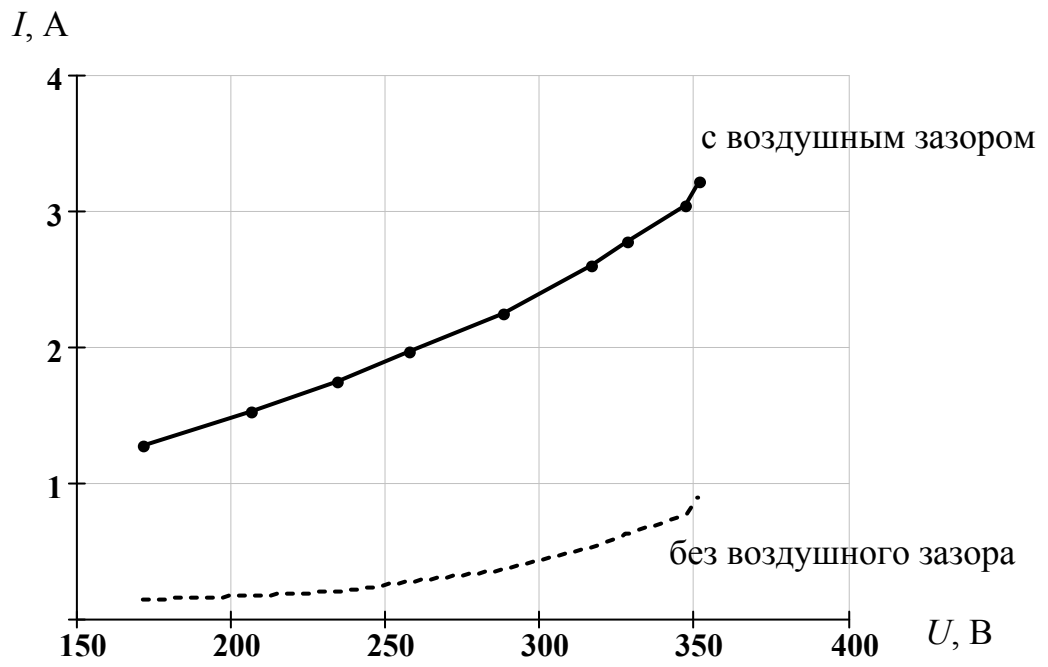


Рис. 7 Кривые $I(U)$ и $\varphi(U)$ для эквивалентных синусоид
для магнитопровода с воздушным зазором

3. Приняв $U_\Phi = 0,95U_0$ с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния рассчитаем параметры параллельной схемы замещения катушки для магнитопровода без воздушного зазора и с воздушным зазором l_δ .

Схема замещения магнитной цепи с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния без зазора представлена на рис. 8.

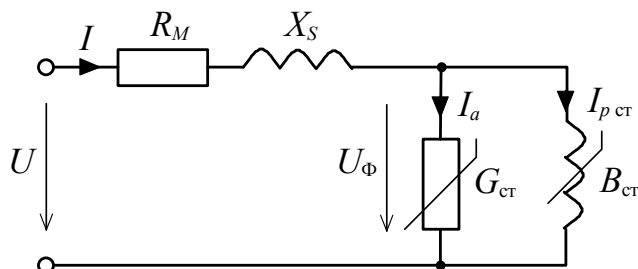


Рис. 8 Схема замещения магнитной цепи с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния без зазора

Напряжение магнитного потока

$$U_\Phi = 0,95U_0 = 0,95 \cdot 350,982 = 333,43 \text{ В.}$$

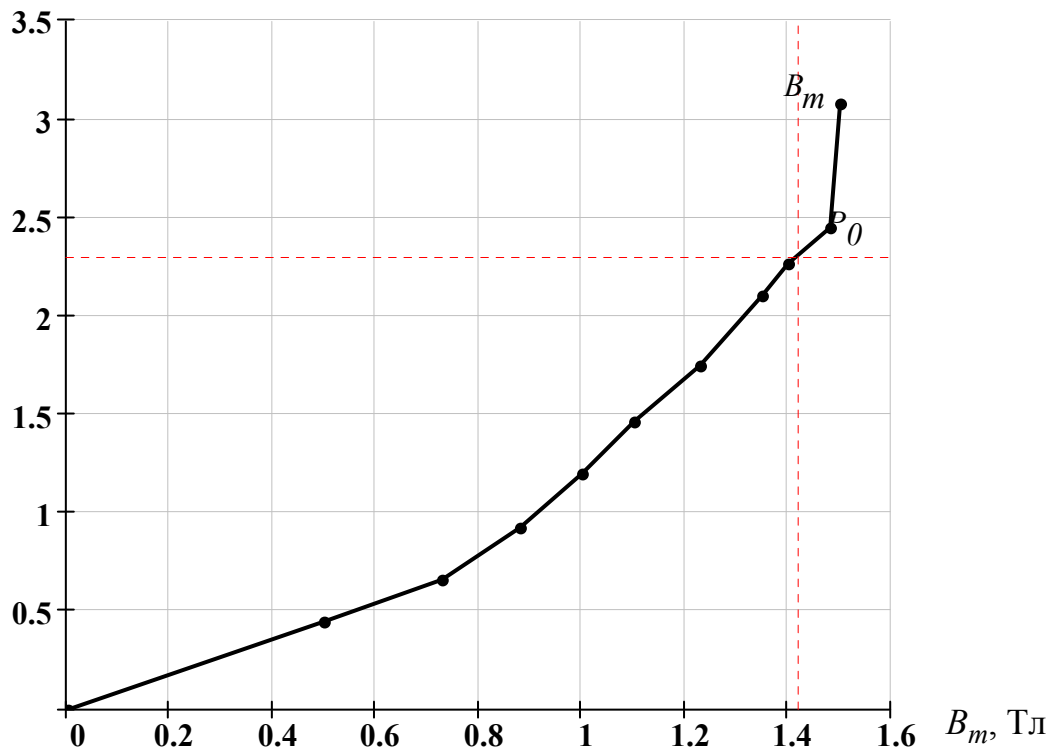
Индукция магнитного поля магнитопровода

$$B_m = \frac{U_\Phi}{4,44 \cdot f \cdot w \cdot S} = \frac{333,43}{4,44 \cdot 50 \cdot 620 \cdot 17 \cdot 10^{-4}} = 1,425 \text{ Тл.}$$

По таблице 1 строим графики $P_0(B_m)$, $Q_0(B_m)$ (рис. 9). Откуда определяем при $B_m = 1,425$ Тл:

$$P_0 = 2,3 \text{ Вт; } Q_0 = 21,5 \text{ вар.}$$

P_0 , Вт



Q_0 , вар

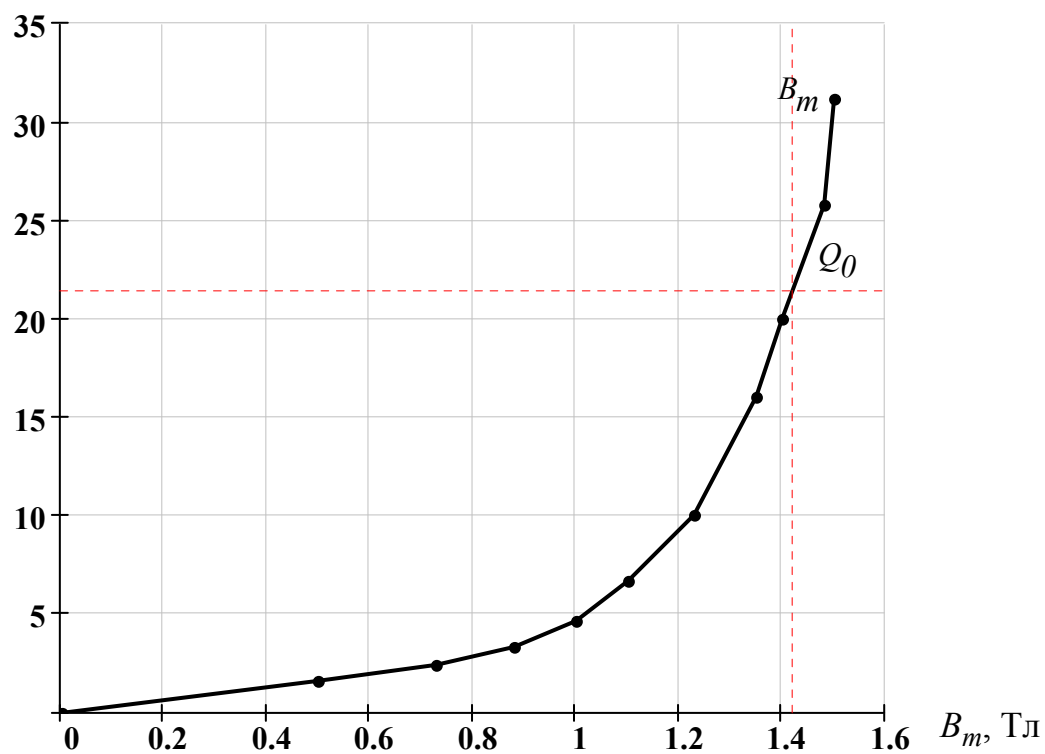


Рис. 9

Выполним расчет параллельной схемы замещения катушки (рис. 8) для магнитопровода без воздушного зазора

$$I_a = \frac{P_0 \cdot M}{U_\phi} = \frac{2,3 \cdot 10,078}{333,43} = 0,0695 \text{ A};$$

$$I_{p \text{ ст}} = \frac{Q_0 \cdot M}{U_\phi} = \frac{21,5 \cdot 10,078}{333,43} = 0,6498 \text{ A};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_{p \text{ ст}}^2} = \sqrt{0,0695^2 + 0,6498^2} = 0,6535 \text{ A};$$

$$\dot{I} = I_a - jI_{p \text{ ст}} = 0,0695 - j0,6498 = 0,6535 \cdot e^{-j83,89^\circ} \text{ A};$$

$$G_{\text{ст}} = \frac{I_a}{U_\phi} = \frac{0,0695}{333,43} = 2,085 \cdot 10^{-4} \text{ СМ};$$

$$R_{\text{ст}} = \frac{1}{G_{\text{ст}}} = \frac{1}{2,085 \cdot 10^{-4}} = 4800 \text{ Ом};$$

$$B_{\text{ст}} = \frac{I_{p \text{ ст}}}{U_\phi} = \frac{0,6498}{333,43} = 1,949 \cdot 10^{-3} \text{ СМ};$$

$$X_{\text{ст}} = \frac{1}{B_{\text{ст}}} = \frac{1}{1,949 \cdot 10^{-3}} = 513 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_\phi + \dot{I} \cdot (R_M + jX_S) = \\ &= 333,43 + (0,0695 - j0,6498) \cdot (3,41 + j7,44) = \\ &= 338,5 - j1,70 = 338,5 \cdot e^{-j0,29^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Схема замещения магнитной цепи с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния с зазором представлена на рис. 10.

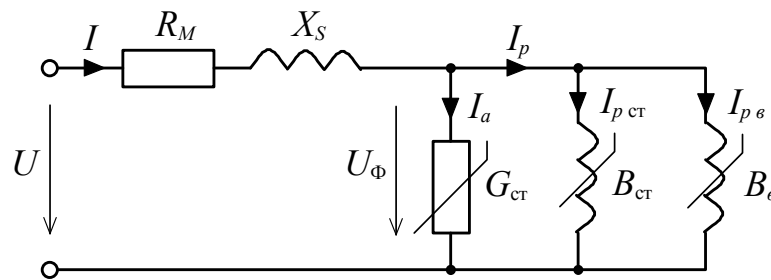


Рис. 10 Схема замещения магнитной цепи с учетом активного сопротивления обмоток и потока рассеяния с зазором

Выполним расчет параллельной схемы замещения катушки (рис. 10) для магнитопровода с воздушным зазором:

$$I_a = \frac{P_0 \cdot M}{U_\phi} = \frac{2,3 \cdot 10,078}{333,43} = 0,0695 \text{ А};$$

$$I_{p \text{ ct}} = \frac{Q_0 \cdot M}{U_\phi} = \frac{21,5 \cdot 10,078}{333,43} = 0,6498 \text{ А};$$

$$I_{p \text{ e}} = \frac{U_\phi}{X_e} = \frac{333,43}{151,68} = 2,1983 \text{ А};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + (I_{p \text{ ct}} + I_{p \text{ e}})^2} = \sqrt{0,0695^2 + (0,6498 + 2,1983)^2} = 2,8490 \text{ А};$$

$$\dot{I} = I_a - j(I_{p \text{ ct}} + I_{p \text{ e}}) = 0,0695 - j2,8481 = 2,8490 \cdot e^{-j88,60^\circ} \text{ А};$$

$$G_{\text{ct}} = \frac{I_a}{U_\phi} = \frac{0,0695}{333,43} = 2,085 \cdot 10^{-4} \text{ СМ}; \quad R_{\text{ct}} = \frac{1}{G_{\text{ct}}} = \frac{1}{2,085 \cdot 10^{-4}} = 4800 \text{ Ом};$$

$$B_{\text{ct}} = \frac{I_{p \text{ ct}}}{U_\phi} = \frac{0,6498}{333,43} = 1,949 \cdot 10^{-3} \text{ СМ}; \quad X_{\text{ct}} = \frac{1}{B_{\text{ct}}} = \frac{1}{1,949 \cdot 10^{-3}} = 513 \text{ Ом};$$

$$X_e = 151,68 \text{ Ом}; \quad B_e = \frac{1}{X_e} = \frac{1}{151,68} = 6,593 \cdot 10^{-3} \text{ СМ};$$

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_\phi + \dot{I} \cdot (R_M + jX_S) = \\ &= 333,43 + (0,0695 - j2,8481) \cdot (3,41 + j7,44) = \\ &= 354,9 - j9,20 = 355,0 \cdot e^{-j1,48^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

4. Найдем для сердечника с зазором полную мощность источника и мощность в воздушном зазоре.

Полная мощность источника

$$S = U \cdot I = 355 \cdot 2,849 \approx 1010 \text{ ВА.}$$

Мощность в воздушном зазоре

$$S_e = U_\phi \cdot I_e = 333,43 \cdot 2,1983 \approx 733 \text{ ВА.}$$

Построим векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 11).