

**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**(ФГБОУ ВО РГУПС)**

---

В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ**

Учебно-методическое пособие  
для практических работ

Ростов-на-Дону  
2015

УДК 621.313(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент С.Д. Мрыхин

**Соломин, В.А.**

Электромагнитные расчеты: учебно-методическое пособие для практических работ / В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 35 с.: ил. – Библиогр.: с. 30.

Приведены методики расчета магнитной цепи машины постоянного тока и основных параметров трансформатора, намагничивающего тока синхронного генератора. Содержатся общие вопросы расчета простых петлевых и простых волновых обмоток и принцип расчета и построения основных характеристик электрических машин и трансформаторов.

Предназначено для студентов очной и заочной формы обучения специальности «Подвижной состав железных дорог» всех специализаций, специальности «Системы обеспечения движения поездов» всех специализаций, направления «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электромеханика», направления «Прикладная механика» профилей «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг» и «Проектно-конструкторское обеспечение машиностроительных производств».

Одобрено к изданию кафедрой «Электрические машины и аппараты».

# 1. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основным магнитным потоком  $\Phi_\delta$  называется поток в воздушном зазоре  $\delta$ , приходящийся на один главный полюс машины [2]. Величина  $\Phi_\delta$  определяет величину индуцируемой в обмотке якоря электродвижущей силы (ЭДС).

При проектировании машины постоянного тока (МПТ) возникает необходимость определения зависимости  $\Phi_\delta$  от тока возбуждения. Эта задача решается путем расчета магнитной цепи машины при холостом ходе, когда ток якоря равен нулю  $I_a = 0$ . Вследствие симметрии устройства машины и равенства потоков всех полюсов достаточно рассмотреть магнитную цепь одной пары полюсов.

Магнитную цепь можно рассчитать на основе закона полного тока для средней магнитной линии, согласно которому линейный интеграл по замкнутому контуру (циркуляция) от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  равен сумме токов, охваченных контуром интегрирования:

$$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \sum i, \quad (1)$$

где:  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$d\vec{\ell}$  – элемент длины магнитной линии, м;

$\sum i$  – полный ток, охватываемый магнитной линией, А.

Точное вычисление линейного интеграла (1) затруднительно, так как определение левой части предполагает знание полной картины поля. Поэтому магнитную цепь разбивают на участки: воздушный зазор  $\delta$ , зубцы якоря  $h_z$ , спинка якоря  $L_a$ , главный полюс  $h_m$ , ярмо (станина)  $L_\text{я}$  и заменяют интеграл (1) суммой, предполагая, что на протяжении каждого участка напряженность поля  $H_j$  постоянна вдоль магнитной линии длиной  $L_j$ , а направление обхода контура совпадает с вектором напряженности поля [3]:

$$\sum_{(j)} u_{mj} = F_\text{в}, \quad (2)$$

где:  $\sum_{(j)} u_{mj} = H_j \cdot \ell_j$  – магнитодвижущая сила (МДС)  $j$ -го участка магнитной цепи, А,  $H_j$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $\ell_j$  – длина  $j$ -го участка, м.

С учетом принятых обозначений и длин участков получим:

$$u_{m\delta} + u_{mz} + u_{ma} + u_{mt} + u_{m\text{я}} = F_\text{в} = W_\text{в} \cdot I_\text{в}, \quad (3)$$

где:  $u_{m\delta} = H_\delta \cdot \delta'$ ;  $u_{mz} = H_z \cdot h_z$ ;  $u_{ma} = H_a \cdot L_a$ ;  $u_{mt} = H_m \cdot h_m$ ;  $u_{m\text{я}} = H_\text{я} \cdot L_\text{я}$ ;  $\delta' = \delta \cdot k_\delta$  эквивалентный воздушный зазор, м.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на полюс:

$$F_\text{в} = W_\text{в} \cdot I_\text{в}. \quad (4)$$

Необходимые для решения задачи величины и их числовые значения приведены в таблице 1..

Таблица 1

Исходные данные к: расчету магнитной цепи МПТ

Наименование величины	Номера вариантов										
	по предпоследней цифре шифра	по последней цифре шифра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр якоря $D_a$ , мм	0, 2, 4, 6, 8	415	450	295	340	455	315	480	250	470	465
	1, 3, 5, 7, 9	300	240	320	225	370	280	335	260	330	210
Активная длина якоря $\ell_a$ , мм	0, 2, 4, 6, 8	245	240	370	290	330	320	345	260	235	350
	1, 3, 5, 7, 9	420	210	215	220	430	440	450	315	310	400
Число пар полюсов $p$	0-9	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Расчетный коэффициент Полюсной дуги $\alpha_\delta$	0, 2, 4, 6, 8	0,64	0,63	0,67	0,71	0,72	0,69	0,66	0,7	0,68	0,65
	1, 3, 5, 7, 9	0,67	0,72	0,65	0,7	0,69	0,71	0,64	0,66	0,63	0,68
Отношение $\frac{t_1}{b_{23}}$	0, 2, 4, 6, 8	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
	1, 3, 5, 7, 9	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1
Воздушный зазор $\delta$ , мм	0-9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	2,3	2,5	2,7	2,9
Высота паза $h_z$ , мм	0-9	31	33	35	37	39	41	40	32	34	36
Высота главного полюса $h_m$ , мм	0-9	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Коэф. магнитного рассеяния $\sigma$	0-9	1,17	1,25	1,1	1,21	1,23	1,22	1,09	1,27	1,24	1,15
Тип обмотки	0, 2, 4, 6, 8	П	П	П	П	П	П	П	П	П	П
	1, 3, 5, 7, 9	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
Число пазов якоря $Z$	0, 2, 4, 6, 8	20	37	39	74	42	57	75	77	18	30
	1, 3, 5, 7, 9	49	55	19	26	17	38	35	29	51	58
Напряжение питания $U$ , В	0, 2, 4, 6, 8	165	220	330	220	165	150	330	220	150	165
	1, 3, 5, 7, 9	220	165	220	150	220	220	150	165	220	150
Частота вращения $n$ , об/мин	0, 2, 4, 6, 8	1300	1150	1000	1100	1500	1200	1500	850	1200	750
	1, 3, 5, 7, 9	600	1300	750	1000	1100	1500	750	1200	1150	850
Режим работы машины	0, 2, 4, 6, 8	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г
	1, 3, 5, 7, 9	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д

Тип обмотки: В – волновая обмотка якоря МПТ; П – петлевая обмотка якоря МПТ.

Режим работы машины: Г – генераторный режим МПТ; Д – двигательный режим МПТ.

## 1.1 Определение МДС воздушного зазора

Наиболее сложный характер имеет магнитное поле в воздушном зазоре, на который приходится наибольшая часть (до 60...80%) полной МДС. Определим размеры данного участка магнитной цепи.

Сердечник якоря выполнен без радиальных вентиляционных каналов, поэтому длина пакетов якоря  $\ell_c$  равна активной длине якоря  $\ell_a$ . Осевая длина полюсного наконечника  $\ell_m$  на 5 мм меньше длины якоря  $\ell_a$ .

1.1.1 Расчетная длина якоря, м:

$$\ell_{\delta} = \frac{1}{2}(\ell_a + \ell_m), \quad (5)$$

где:  $\ell_m$  – осевая длина полюсного наконечника, м:

$$\ell_m = (\ell_a - 5) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

1.1.2 Расчетная ширина полюсной дуги, м:

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau, \quad (7)$$

якоря  $\alpha_{\delta}$  – расчетный коэффициент полюсной дуги;

$\tau$  – полюсное деление, м:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}. \quad (8)$$

1.1.3 Площадь данного участка магнитной цепи, м<sup>2</sup>:

$$S_{\delta} = b_{\delta} \cdot \ell_{\delta}. \quad (9)$$

1.1.4 Коэффициент воздушного зазора, обусловленный зубчатым строением якоря:

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta}, \quad (10)$$

где:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{II}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{II}}{\delta}}, \quad (11)$$

$$b_{II} = t_3 - b_{z3}, \quad (12)$$

$$t_3 = \frac{\pi(D_a - 2h_z)}{Z}, \quad (13)$$

$$b_{z3} = \frac{t_1}{\left(\frac{t_1}{b_{z3}}\right)}, \quad (14)$$

$$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}, \quad (15)$$

$b_{II}$  – ширина открытия паза у поверхности воздушного зазора, м;

$t_1$  – величина зубцового деления в верхней части, м;

$t_3$  – величина зубцового деления в нижней части, м;

$b_{z3}$  – расчетная ширина зубца в нижней части.

Обычно  $k_\delta = 1,1 \div 1,35$ .

1.1.5 Расчетная длина магнитной линии, приходящаяся на одно полюсное деление, м:

$$\delta' = \delta \cdot k_\delta \quad (16)$$

1.1.6 Магнитный поток при номинальном режиме, Вб:

$$\Phi_{\delta n} = S_\delta \cdot B_{\delta n}, \quad (17)$$

где:  $B_{\delta n}$  – магнитная индукция в воздушном зазоре при номинальном режиме, определяемая по рисунку приложения 1, Тл.

1.1.7 МДС воздушного зазора, А:

$$F_\delta = \frac{\delta' \cdot B_{\delta n}}{\mu_0}, \quad (18)$$

где:  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  – постоянная магнитная проницаемость, Г/м.

## 1.2 Определение МДС зубцовой зоны.

Обычно рассматривается поле в одном элементе зубцовой зоны – зубцовом делении  $t_1$ .

Определим расчетную длину участка.

1.2.1 Расчетная длина зубцов якоря, м:

$$\ell_z = \ell_a \cdot k_{cm}, \quad (19)$$

где:  $k_{cm} = 0,98$  – коэффициент заполнения стали.

1.2.2 Величина зубцового деления, м:

- в средней части

$$t_2 = \frac{1}{2}(t_1 + t_3); \quad (20)$$

1.2.3 Расчетная ширина зубца, м:

- в верхней части

$$b_{z1} = t_1 - b_{\Pi}; \quad (21)$$

- в средней части

$$b_{z2} = \frac{1}{2}(b_{z1} + b_{z3}); \quad (22)$$

1.2.4 Сечение зубцов якоря, м<sup>2</sup>:

$$S_{zi} = b_{zi} \cdot \ell_z, \quad (23)$$

где:  $i = 1, 2, 3$  – части зубца.

1.2.5 Магнитная индукция, Тл:

- в верхней части зубца

$$B'_{z1} = \frac{\Phi_{\delta Hz}}{S_{z1}}; \quad (24)$$

- в средней части зубца

$$B'_{z2} = \frac{\Phi_{\delta Hz}}{S_{z2}}; \quad (25)$$

- в нижней части зубца

$$B'_{z3} = \frac{\Phi_{\delta Hz}}{S_{z3}}, \quad (26)$$

где:  $\Phi_{\delta Hz}$  – номинальный магнитный поток, приходящийся на одно зубцовое деление, Вб:

$$\Phi_{\delta Hz} = B_{\delta H} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}. \quad (27)$$

1.2.6 Зубцовые коэффициенты:

$$K_{zi} = \frac{t_i \cdot \ell_{\delta}}{S_{zi}}, \quad (28)$$

где:  $i = 1, 2, 3$  – части зубца.

1.2.7 Расчетная длина магнитной линии зубцового слоя, приходящаяся на одно полюсное деление, м:

$$L_z = h_z. \quad (29)$$

1.2.8 Напряженность магнитного поля в зубцовой зоне:

$$H_{zp} = \frac{1}{6} (H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}), \quad (30)$$

где  $H_{z1}$ ,  $H_{z2}$ ,  $H_{z3}$  - напряженности магнитного поля в каждой части зубцовой зоны определяются с учетом магнитной индукции в этих частях по кривым 1 (приложение 2)

1.2.9 МДС зубцовой зоны, А:

$$F_z = h_z H_{zp} \quad (31)$$

### 1.3 Определение МДС главного полюса

1.3.1 Расчетная длина сердечника главного полюса, м:

$$\ell_{mp} = \ell_m \cdot k_{cm}. \quad (32)$$

1.3.2 Расчетная ширина сердечника, м:

$$b_m = \frac{\Phi_{mn}}{B_{mn} \cdot \ell_{mp}}, \quad (33)$$

где:  $\Phi_{mn}$  – магнитный поток в сердечнике главного полюса, Вб:

$$\Phi_{mn} = \sigma \cdot \Phi_{\delta H}; \quad (34)$$

$\sigma$  – коэффициент магнитного рассеяния;

$B_{mi} = (1,2 \div 1,6)$  Тл – магнитная индукция в сердечнике главного полюса.

1.3.3 Сечение сердечника главного полюса, м<sup>2</sup>:

$$S_m = b_m \cdot \ell_{mp}. \quad (35)$$

1.3.4 Расчетная длина магнитной линии в сердечнике главного полюса, приходящаяся на одно полюсное деление, м:

$$L_m = h_m. \quad (36)$$

1.3.5 МДС главного полюса, А:

$$F_m = h_m H_m, \quad (37)$$

где  $H_m$  - напряженность магнитного поля главного полюса определяется с учетом магнитной индукции по кривым 1 (приложение 2).

## 1.4 Определение МДС спинки якоря

1.4.1 Расчетная длина спинки якоря, м:

$$\ell_{ap} = \ell_a \cdot k_{cm}. \quad (38)$$

1.4.2 Высота спинки якоря, м:

$$h_a = \frac{\Phi_{an}}{B_{an} \cdot \ell_{ap}}, \quad (39)$$

где:  $\Phi_{an}$  – магнитный поток в спинке якоря, Вб:

$$\Phi_{an} = \frac{\Phi_{\delta a}}{2}; \quad (40)$$

$B_{an} = (1,0 \div 1,5)$  Тл – магнитная индукция в спинке якоря.

1.4.3 Сечение спинки якоря, м<sup>2</sup>:

$$S_a = h_a \cdot \ell_{ap}. \quad (41)$$

1.4.4 Расчетная длина магнитной линии в спинке якоря, приходящаяся на одно полюсное деление, м:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2}. \quad (42)$$

1.4.5 МДС спинки якоря, А:

$$F_a = L_a H_a, \quad (43)$$

где  $H_a$  - напряженность магнитного поля в спинке якоря определяется с учетом магнитной индукции по кривым 1 (приложение 2).

## 1.5 Определение МДС ярма станины

1.5.1 Расчетная длина станины [3], м:

$$\ell_{яп} = \ell_m + 0,4D_a. \quad (44)$$

1.5.2 Высота станины, м:

$$h_{я} = \frac{\Phi_{яи}}{B_{яи} \cdot \ell_{яп}}, \quad (45)$$

где:  $\Phi_{яи}$  – магнитный поток в станине, Вб:

$$\Phi_{яи} = \frac{\Phi_{тн}}{2}; \quad (46)$$

$B_{яи} = (1,1 \div 1,2)$  Тл – магнитная индукция в станине.

1.5.3 Сечение станины, м<sup>2</sup>:

$$S_{я} = h_{я} \cdot \ell_{яп}. \quad (47)$$

1.5.4 Средняя длина магнитной линии в станине, приходящаяся на одно полюсное деление, м:

$$L_{я} = \frac{\pi[D_a + 2(\delta + h_m + h_{я})]}{4p} + \frac{h_{я}}{2}. \quad (48)$$

1.5.5 МДС ярма станины:

$$F_{я} = L_{я} H_{я}, \quad (49)$$

где  $H_{я}$  - напряженность магнитного поля в ярме станины определяется с учетом магнитной индукции по кривым 1 (приложение 2).

## 1.6 Построение характеристики намагничивания машины постоянного тока

Расчет характеристики намагничивания машины необходимо выполнить для пяти значений основного магнитного потока по таблице 3. Для определения напряженности магнитного поля в зубцовой зоне, в полюсах, в спинке якоря и в ярме с учетом магнитной индукции на этих участках следует использовать табличные данные, приведенные в приложении 2.

При  $B'_{zi} \leq 1,8$  Тл напряженность магнитного поля определяется по таблицам приложения 2. Если,  $B'_{zi} > 1,8$  Тл, то напряженность магнитного поля определяется по кривым 1 [приложение 2].

По данным таблицы 3 строится кривая намагничивания машины  $\Phi_{\deltaи} = (F_{\sigma})$ . Общий вид характеристики намагничивания приведен на рис. 2.

## 1.7 Определение коэффициента насыщения магнитной цепи

1.7.1 Определение коэффициента насыщения расчетным путем:

$$k_{\mu} = \frac{\sum F_{\sigma}}{F_{\deltaи}}, \quad (50)$$

где  $\sum F_{\sigma}$  – суммарная МДС, приходящаяся на один полюс, А:

Таблица 2

Данные расчета магнитной цепи машины постоянного тока

Участок	Размеры, м			Расчетная магнитная линия $L_i, \text{ м}$	Магнитный поток $\Phi_i, \text{ Вб}$	Магнитная индукция $B_i, \text{ Тл}$
	Длина $l_i, \text{ м}$	Ширина $b_i, t_i, \text{ м}$	Площадь $S_i, \text{ м}^2$			
1	2	3	4	5	6	7
Воздушный Зазор	$l_{\delta 0} =$ $l_m =$	$b_{\delta 0} =$ $\tau =$	$S_{\delta 0} =$	$\delta'_0 =$ $K_{\delta} =$ $\gamma_1 =$	$\Phi_{\delta 0} =$	$B_{\delta 0} = f(D_a),$ $B_{\delta 0} =$
Зубцовый слой якоря	$K_{cm} = 0,98,$ $l_z =$	$b_{z1} =$ $t_1 =$ $t_2 =$ $t_3 =$ $b_{z1} =$ $b_{z2} =$ $b_{z3} =$	$S_{z1} =$ $S_{z2} =$ $S_{z3} =$	$h_z =$	$\Phi_z =$	$B_{z1} =$ $B_{z2} =$ $B_{z3} =$ $K_{z1} =$ $K_{z2} =$ $K_{z3} =$
Спинка якоря	$l_a =$	$h_a =$	$S_a =$	$L_a =$	$\Phi_a =$	$B_a =$
Сердечник главного полюса	$l_{mp} =$	$b_m =$	$S_m =$	$h_m =$	$\Phi_m =$	$B_m =$
Станина	$l_{\text{я}} =$	$h_{\text{я}} =$	$S_{\text{я}} =$	$L_{\text{я}} =$	$\Phi_{\text{я}} =$	$B_{\text{я}} =$

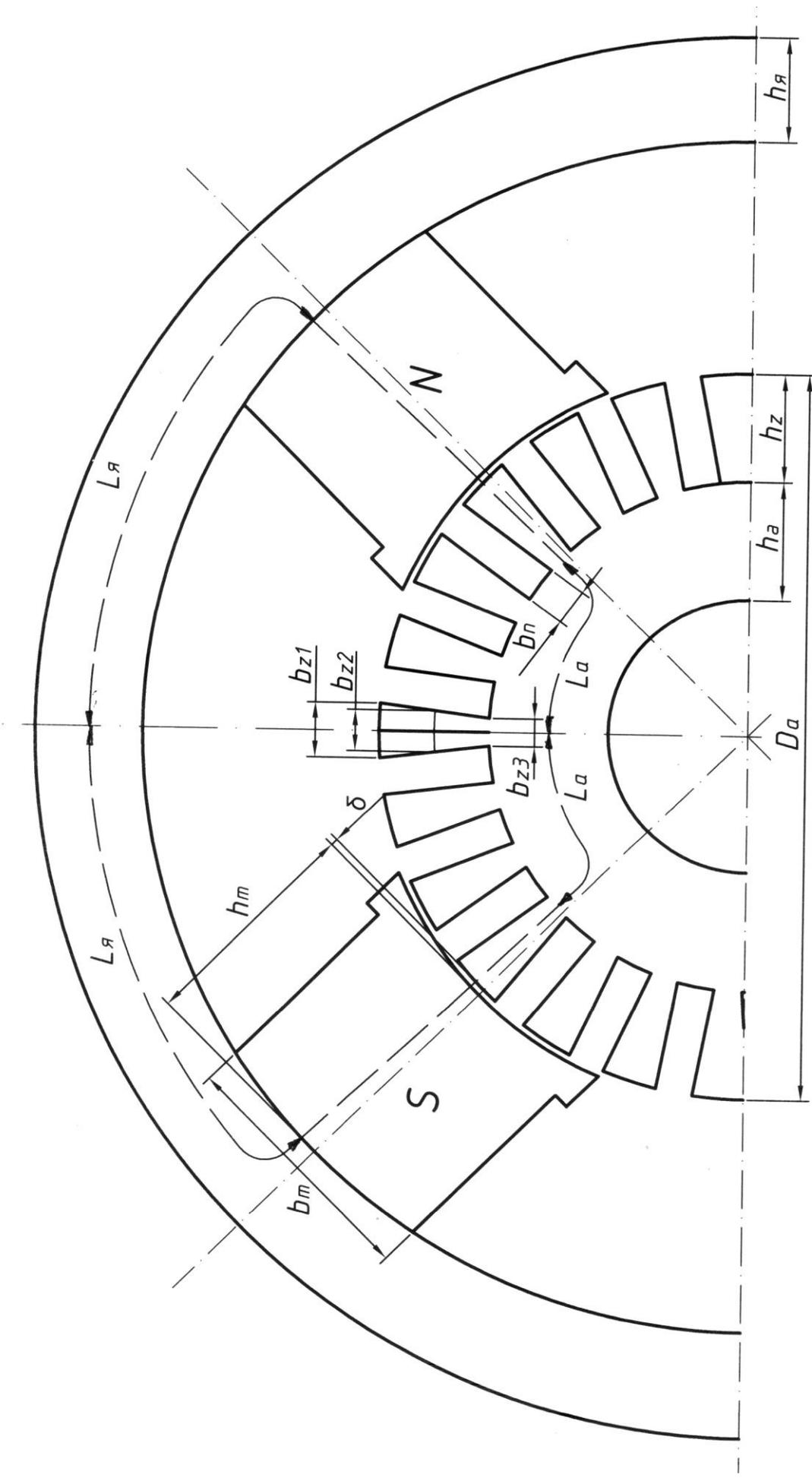


Рис. 1. — Эскиз магнитной цепи машины постоянного тока

Таблица 3

Данные расчета характеристики намагничивания машины постоянного тока

Наименование величины	Значение при				
	$0,5\Phi_{\delta n}$	$0,75\Phi_{\delta n}$	$0,9\Phi_{\delta n}$	$\Phi_{\delta n}$	$1,15\Phi_{\delta n}$
Основной магнитный поток, $\Phi_{\delta}$ , Вб					
Магнитная индукция в воздушном зазоре, $B_{\delta}$ , Тл					
Магнитная индукция в верхней части зубца, $B_{z1}$ , Тл					
Магнитная индукция в средней части зубца, $B_{z2}$ , Тл					
Магнитная индукция в нижней части зубца, $B_{z3}$ , Тл					
Магнитная индукция в полюсах, $B_m$ , Тл					
Магнитная индукция в спинке якоря, $B_a$ , Тл					
Магнитная индукция в станине, $B_{\sigma}$ , Тл					
Напряженность магнитного поля в зубцовой зоне: $H_{z1}$ , А/м					
$H_{z2}$ , А/м					
$H_{z3}$ , А/м					
Расчетное значение: $H_{zp} = \frac{1}{6}(H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3})$ , А/м					
Напряженность магнитного поля в полюсах, $H_m$ , А/м					
Напряженность магнитного поля в спинке якоря, $H_a$ , А/м					
Напряженность магнитного поля в ярме станины, $H_{\sigma}$ , А/м					
МДС воздушного зазора: $F_{\delta} = \frac{\delta' \cdot B_{\delta n}}{\mu_0}$ , А					
МДС зубцовой зоны якоря: $F_z = h_z H_{zp}$ , А					
МДС главных полюсов: $F_m = h_m H_m$ , А					
МДС спинки якоря: $F_a = L_a H_a$ , А					
МДС станины: $F_{\sigma} = L_{\sigma} H_{\sigma}$ , А					
МДС на один полюс: $\sum F_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n F_{\kappa}$ , А					

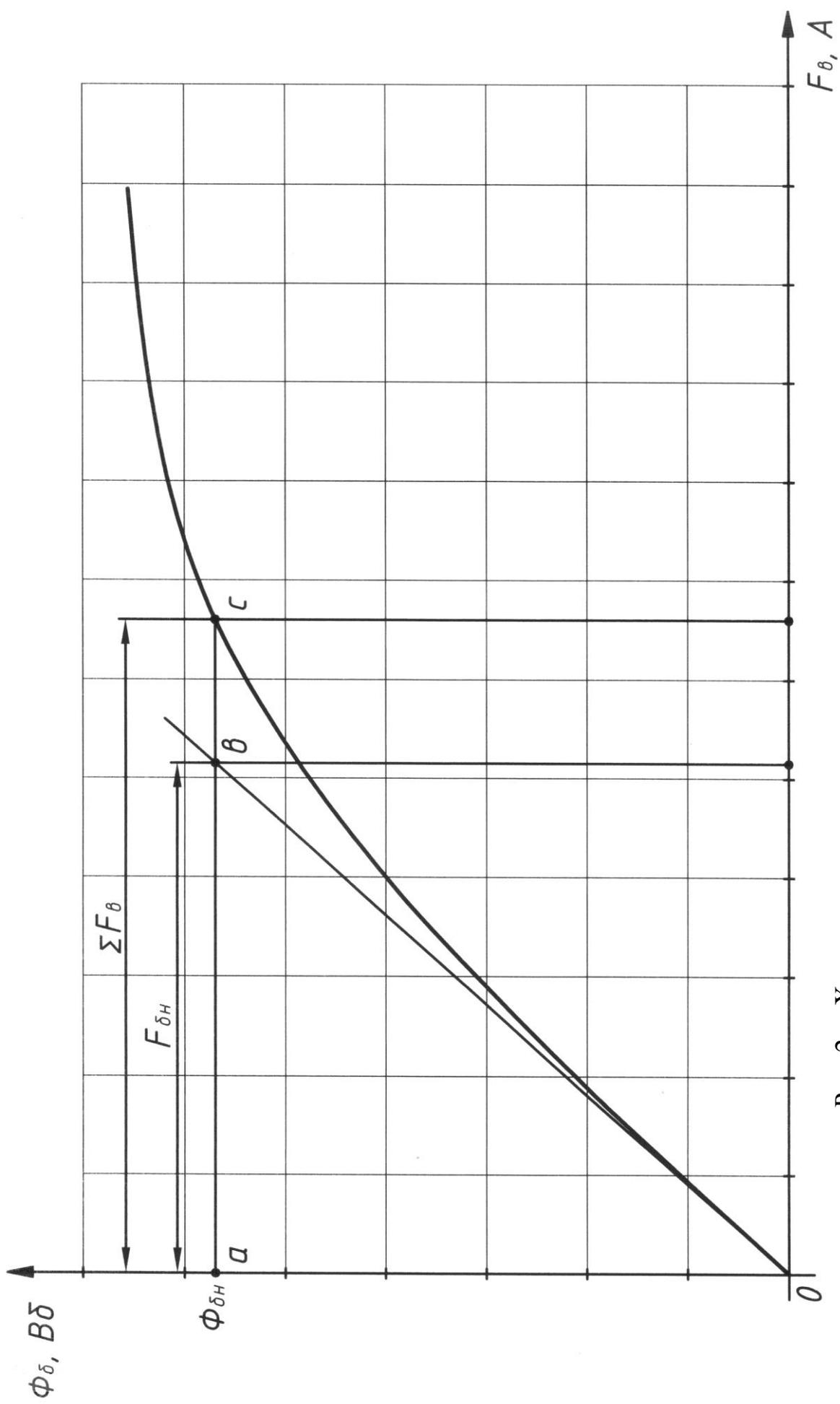


Рис. 2. – Характеристика намагничивания машины постоянного тока

$$\sum F_{\delta} = F_{\delta} + F_z + F_m + F_a + F_{\text{я}}. \quad (51)$$

1.7.2 Определение коэффициента насыщения графическим путем:

$$k_{\mu} = \frac{ac}{av}. \quad (52)$$

Коэффициент насыщения определяется в соответствии с рис. 2.

Коэффициент насыщения магнитной цепи, определяемый расчетным путем, сравнивается со значением, полученным графически. Обычно при потоках меньших или равных номинальному  $k_{\mu} = 1 \div 1,35$ , а в некоторых случаях  $k_{\mu} = 1,7 \div 2,0$

1.7.3 Построение эскиза магнитной цепи машины постоянного тока.

Все данные для построения магнитной цепи машины постоянного тока сводятся в таблицу 2, а сам эскиз представлен на рис. 1.

## 1.8 Расчет простой петлевой обмотки МПТ

В обмотках якорей машин постоянного тока происходит преобразование электрической энергии в механическую, если машина работает в двигательном режиме, и наоборот – механической в электрическую, если работа происходит в генераторном режиме. Основным элементом обмотки является секция  $S$ , состоящая из одного или нескольких витков.

Обмотки делятся на:

1. Простые петлевые.
2. Простые волновые.
3. Сложные петлевые.
4. Сложные волновые.
5. Комбинированные.

1.8.1 Минимальное число коллекторных пластин:

$$K_{\min} = \frac{2pU_n}{u_{к.ср}}, \quad (53)$$

где:  $u_{к.ср} = 18 \div 22$  В – среднее значение напряжения между соседними коллекторными пластинами, В.

1.8.2 Максимальное число коллекторных пластин:

$$K_{\max} = \frac{0,7\pi D_a}{t_{к.мин}}, \quad (54)$$

где:  $t_{к.мин}$  – минимально-допустимое значение коллекторного деления, м:

$$t_{к.мин} = b_{к.мин} + \Delta_{уз}; \quad (55)$$

$b_{к.мин} = 4$  мм – минимальная толщина коллекторной пластины;

$\Delta_{из} = 1\text{мм}$  – толщина изоляции между коллекторными пластинами.

1.8.3 Общее число коллекторных пластин выбирается из условия обеспечения нормальных потенциальных условий на коллекторе:

$$K_{\min} < K = S = Z_3 = u_{II} Z < K_{\max}, \quad (56)$$

где:  $u_{II}$  – число элементарных пазов в одном реальном.

1.8.4 Число витков в секции:

$$W_c = \frac{60 \cdot a \cdot E_a}{K \cdot \pi D_a \cdot \alpha_\delta \cdot B_{\text{ном}} \cdot n \cdot \ell_\delta}, \quad (57)$$

где:  $E_a = U_{\text{ном}} (1 \pm R_a^*)$ , В;

$R_a^* = 0,05$  – сопротивление цепи якоря в о.е.;

$2a = 2p$  – число пар параллельных ветвей обмотки.

Знак «+» берется для генератора, знак «-» – для двигателя.

Если полученное значение  $W_c$  не превышает 4, то на этом выбор чисел  $K$  и  $u_{II}$  следует считать законченным. В противном случае необходимо взять другие значения  $K$  и  $u_{II}$ , удовлетворяющие указанным выше требованиям. По технологическим соображениям рекомендуется обмотку выполнять равносекционной, для которой  $y_1$  целое число.

1.8.5 Первый частичный шаг обмотки по пазам:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2p} \pm \varepsilon, \quad (58)$$

где:  $\pm \varepsilon$  – удлинение или укорочение шага обмотки в долях пазового деления.

В формуле (58) рекомендуется выбрать знак «-».

1.8.6 Шаг по коллектору, равный результирующему шагу обмотки:

$$y_k = y = \pm 1. \quad (59)$$

1.8.7 Второй частичный шаг обмотки по пазам:

$$y_2 = \pm 1 - y_1. \quad (60)$$

В формулах (59) и (60) рекомендуется выбрать знак «+».

По расчетным данным вычерчивается схема-развертка петлевой обмотки простой, образец которой показан на рис. 3.

## 1.9 Расчет простой волновой обмотки МПТ

1.9.1 Минимальное число коллекторных пластин:

$$K_{\min} = \frac{2pU_n}{u_{к.ср}}, \quad (61)$$

где:  $u_{к.ср} = 18 \div 22\text{В}$  – среднее значение напряжения между соседними коллекторными пластинами, В.

1.9.2 Максимальное число коллекторных пластин:

$$K_{\max} = \frac{0,7\pi D_a}{t_{к.мин}}, \quad (62)$$

где:  $t_{к. min}$  – минимально-допустимое значение коллекторного деления, м:

$$t_{к. min} = b_{к. min} + \Delta_{уз}; \quad (63)$$

$b_{к. min} = 4 \text{ мм}$  – минимальная толщина коллекторной пластины;

$\Delta_{уз} = 1 \text{ мм}$  – толщина изоляции между коллекторными пластинами.

1.9.3 Выбираем число коллекторных пластин:

$$K_{min} < K = S = Z_э = u_{II} Z < K_{max}, \quad (64)$$

где:  $u_{II}$  – число элементарных пазов в одном реальном.

1.9.4 Число витков в секции:

$$W_c = \frac{60 \cdot a \cdot E_a}{K \cdot \pi D_a \cdot \alpha_\delta \cdot B_{\delta ном} \cdot n \cdot \ell_\delta}, \quad (65)$$

где:  $E_a = U_{ном} (1 \pm R_a^*)$ , В;

$R_a^* = 0,05$  – сопротивление цепи якоря в о.е.;

$2a = 2$  – число пар параллельных ветвей обмотки.

Знак «+» берется для генератора, знак «-» – для двигателя.

1.9.5 Первый частичный шаг обмотки по пазам:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon, \quad (66)$$

где:  $\pm \varepsilon$  – удлинение или укорочение обмотки.

1.9.6 Результирующий шаг обмотки, равный шагу по коллектору:

$$y = y_k = \frac{Z_э \pm 1}{p}. \quad (67)$$

1.9.7 Второй частичный шаг по пазам:

$$y_2 = y - y_1. \quad (68)$$

Предпочтительными, с точки зрения расхода меди, являются неперекрещивающиеся обмотки, для которых перед единицей в формулах (66) и (67) берется знак «-».

По расчетным данным вычерчивается схема-развертка простой волновой обмотки, образец которой показан на рис. 4.

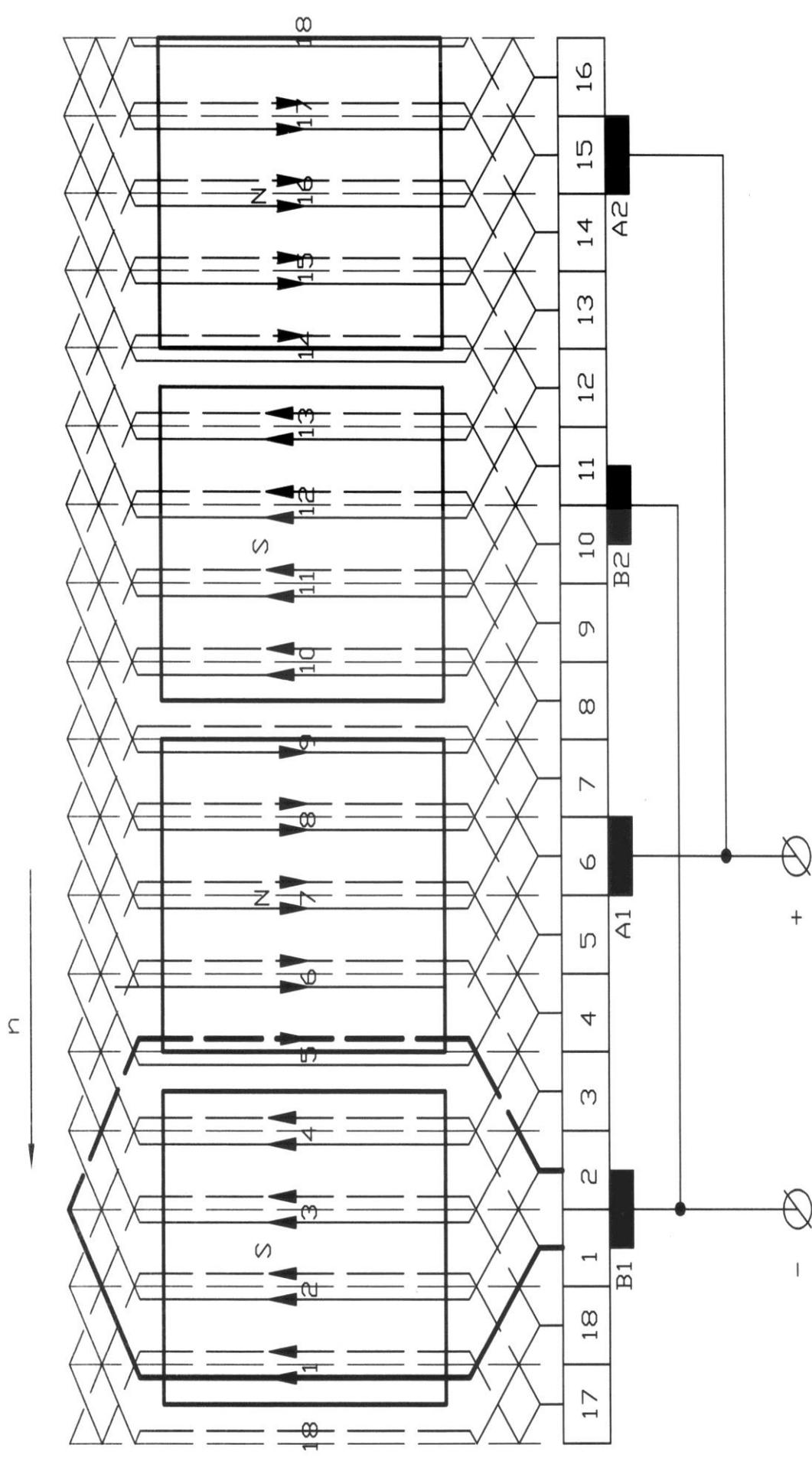


Рис. 3. – Схема-развертка простой петлевой обмотки с  $2p=4$ ,  $Z_3=S=K=18$ ,  $y_1=4$ ,  $y_2=-3$ ,  $y_k=+1$

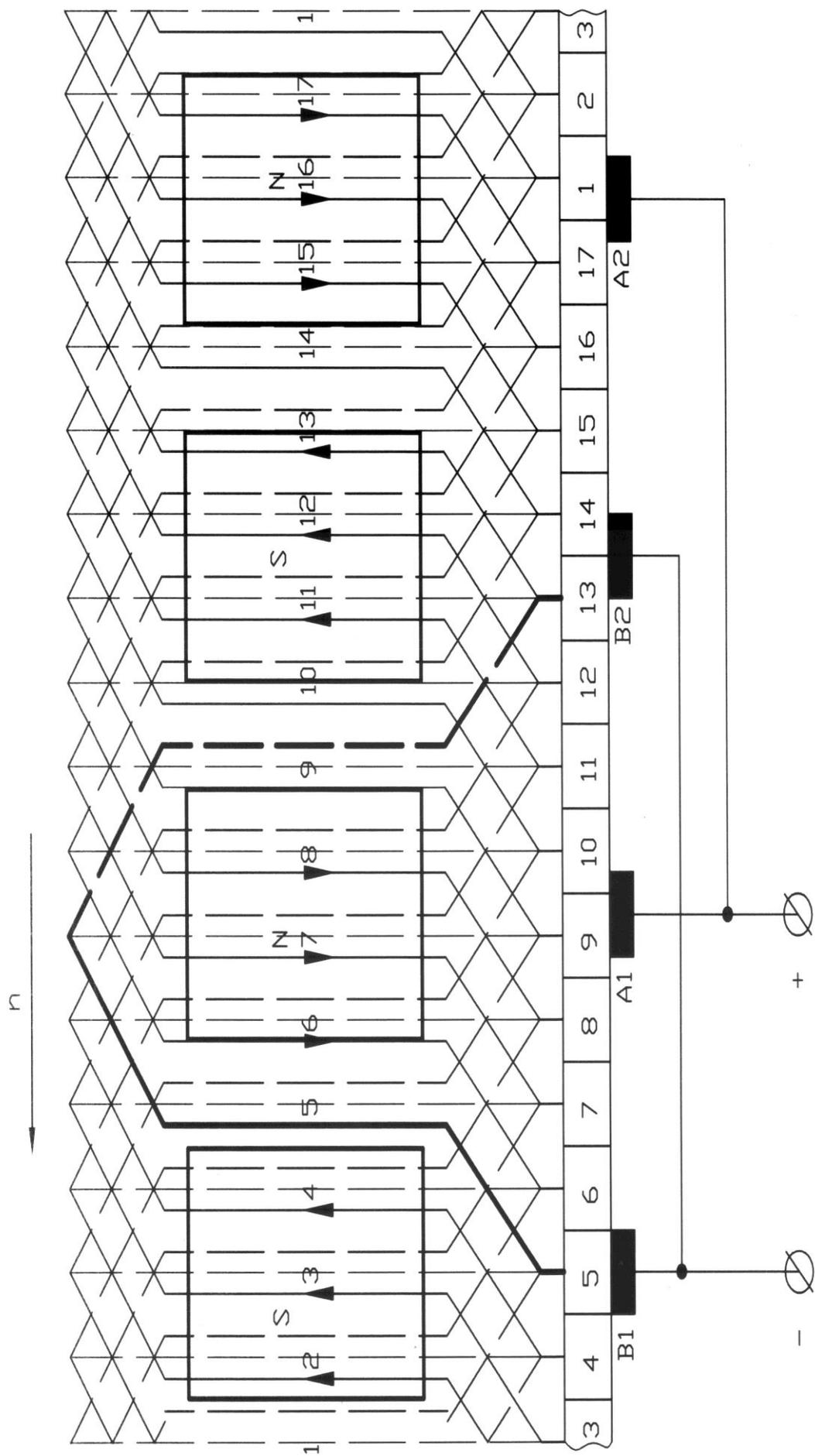


Рис. 4. – Схема-развертка простой волновой обмотки с  $2p=4$ ,  $Z_0=S=K=17$ ,  $y_1=4$ ,  $y_2=4$ ,  $y=y_k=8$

## 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Необходимые для расчета параметров трансформатора величины и их числовые значения приведены в таблице 4

### 2.1 Определение номинальных линейных и фазных токов и напряжений трансформатора

2.1.1 Линейные токи обмоток:

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1н}}; \quad I_{2н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{2н}}.$$

2.1.2 Фазные токи:

- при соединении обмоток в «звезду» Y

$$I_{1фн} = I_{1н}; \quad I_{2фн} = I_{2н};$$

- при соединении обмоток в «треугольник» Δ

$$I_{1фн} = \frac{I_{1н}}{\sqrt{3}}; \quad I_{2фн} = \frac{I_{2н}}{\sqrt{3}}.$$

2.1.3 Линейные напряжения  $U_{1н}$  и  $U_{2н}$  приводятся в задании (таблице 4).

2.1.4 Фазные напряжения:

- при соединении обмоток в «звезду» Y

$$U_{1фн} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}}; \quad U_{2фн} = \frac{U_{2н}}{\sqrt{3}};$$

- при соединении обмоток в «треугольник» Δ

$$U_{1фн} = U_{1н}; \quad U_{2фн} = U_{2н}.$$

### 2.2 Параметры холостого хода

2.2.1 Относительное значение тока холостого хода:

$$I_0^* = \frac{I_0}{100}.$$

2.2.2 Полное сопротивление холостого хода (относительное значение):

$$Z_0^* = \frac{1}{I_0^*}.$$

2.2.3 Относительное значение активного сопротивления холостого хода:

$$r_0^* = \frac{P_0}{S_n (I_0^*)^2}.$$

2.2.4 Относительное значение индуктивного сопротивления холостого хода:

Таблица 4

## Исходные данные

Наименование величины	Номера вариантов										
	по предпо- следней цифре шиф- ра	по последней цифре шифра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номинальная мощность $S_H$ , тыс. кВ·А	0-9	40,0	25,0	16,0	1,0	16,0	0,4	10,0	2,5	6,3	1,0
Номинальное высшее напряжение $U_{1H}$ , кВ	0-9	220	110	38,75	6,0	121	35	121	110	35	10
Номинальное низшее напряже- ние $U_{2H}$ , кВ	0, 2, 4, 6, 8	35,0	21,0	6,0	0,69	35,0	6,0	35,0	21,0	10,5	0,69
	1, 3, 5, 7, 9	27,5	38,5	10	0,4	20,0	0,69	20,0	15,75	6,3	0,4
Напряжение короткого замы- кания $u_K$ , %	0, 2, 4, 6, 8	10,0	10,5	10,0	8,0	10,5	6,5	10,5	10,5	7,5	5,5
	1, 3, 5, 7, 9	12,0	9,0	8,0	10,0	7,5	8,5	8,0	9,0	10,0	7,0
Ток холостого хода $I_0$ , %	0, 2, 4, 6, 8	0,5	0,8	0,75	1,5	0,85	2,1	0,9	1,5	0,9	2,5
	1, 3, 5, 7, 9	0,55	1,2	1,0	1,8	1,1	2,5	1,2	1,3	1,2	3,0
Мощность короткого замыка- ния $P_K$ , кВт	0, 2, 4, 6, 8	170	120,0	105,0	12,2	85,0	5,5	60,0	22,0	46,5	11,2
	1, 3, 5, 7, 9	180	110,0	95,0	14,0	99,0	6,5	80,0	9,0	50,0	14,0
Мощность холостого хода $P_0$ , кВт	0, 2, 4, 6, 8	34	29,0	17,8	2,3	21,0	1,15	14,0	5,0	8,0	3,0
	1, 3, 5, 7, 9	36	32,0	16,0	2,6	23,0	1,3	16,0	6,0	9,5	4,0
Коэффициент мощности нагрузки, $\cos\varphi_2$	0, 2, 4, 6, 8	0,8	0,86	0,9	0,83	0,75	0,78	0,82	0,85	0,93	0,7
	1, 3, 5, 7, 9	0,95	0,8	0,83	0,7	0,85	0,88	0,72	0,9	0,75	0,82
Схема и группа соединения	0, 2, 4, 6, 8	$\Delta/Y-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/Y-0$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$\Delta/Y-11$
	1, 3, 5, 7, 9	$Y/Y-0$	$Y/Y-0$	$Y/Y-0$	$Y/Y-0$	$Y/Y-0$	$\Delta/Y-11$	$Y/Y-0$	$Y/Y-0$	$\Delta/Y-11$	$Y/\Delta-11$

$$x_0^* = \sqrt{(Z_0^*)^2 - (r_0^*)^2}.$$

### 2.3 Фазный коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{1\phi H}}{U_{2\phi H}}.$$

### 2.4 Полное базовое сопротивление трансформатора:

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}}, \text{ Ом.}$$

### 2.5 Абсолютные значения сопротивлений холостого хода:

$$r_0 = r_0^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } x_0 = x_0^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } Z_0 = Z_0^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.}$$

### 2.6 Параметры короткого замыкания

2.6.1 Относительное значение активного сопротивления короткого замыкания:

$$r_k^* = \frac{P_k}{S_H}.$$

2.6.2 Относительные значения напряжения короткого замыкания и полного сопротивления короткого замыкания:

$$U_k^* = Z_k^* = \frac{u_k}{100}.$$

2.6.3 Относительное значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_k^* = \sqrt{(Z_k^*)^2 - (r_k^*)^2}.$$

### 2.7 Абсолютные значения параметров короткого замыкания:

$$r_k = r_k^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } x_k = x_k^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } Z_k = Z_k^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.}$$

### 2.8 Параметры обмоток трансформатора

2.8.1 Относительные значения сопротивлений обмоток:

$$r_1^* = r_2^* = \frac{r_k^*}{2}; \quad x_1^* = x_2^* = \frac{x_k^*}{2}.$$

2.8.2 Абсолютные значения сопротивлений обмоток:

$$r_1 = r_2 = r_1^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } x_1 = x_2 = x_1^* \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом; } r_2 = \frac{r_2'}{k^2}, \text{ Ом; } x_2 = \frac{x_2'}{k^2}, \text{ Ом.}$$

## 2.9 Параметры намагничивающего контура

$$r_M = r_0 - r_1, \text{ Ом}; \quad x_M = x_0 - x_1, \text{ Ом}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{r_M}{x_M}.$$

## 2.10 Построение векторной диаграммы трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Данные для построения векторной диаграммы при пренебрежении током холостого хода ( $I_1^* = I_2^*$ )

2.10.1 ЭДС трансформатора:

$$E_1 = E_2' = U_{1\phi_n} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta U_{2\phi_n}^*}{2} \right), \text{ кВ},$$

где:  $\Delta U_{2\phi_n}^* = r_k^* \cdot \cos \varphi_2 + x_k^* \cdot \sin \varphi_2$ .

2.10.2 Приведенное вторичное напряжение:

$$U_{2\phi_n}' = U_{1\phi_n} \cdot (1 - \Delta U_{2\phi_n}^*), \text{ кВ}.$$

2.10.3 Падения напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях обмоток приведенного трансформатора:

$$I_{1\phi_n} \cdot r_1 \cong I_{2\phi_n}' \cdot r_2', \text{ кВ}; \quad I_{1\phi_n} \cdot x_1 \cong I_{2\phi_n}' \cdot x_2', \text{ кВ}.$$

2.10.4 Векторная диаграмма трансформатора при заданной активно-индуктивной нагрузке строится на бумаге формата А4 (лучше миллиметровой или в «клетку»). Порядок построения векторной диаграммы описан ниже. Примерный вид диаграммы приведен на рис.5.

2.10.5 Горизонтально без масштаба откладывается вектор  $\dot{\Phi}_m$ .

2.10.6 Под углом  $90^\circ$  к вектору  $\dot{\Phi}_m$  (с отставанием) в масштабе  $m_U, \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$ ,

откладывают векторы  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$  и под углом  $90^\circ$  к  $\dot{\Phi}_m$  (с опережением) откладываем

вектор  $(-\dot{E}_1)$ .

2.10.7 Под углом  $\psi_2$  (с отставанием) к вектору  $\dot{E}_2'$  в масштабе  $m_i, \frac{\text{А}}{\text{мм}}$ ,

откладывают вектор тока  $\dot{I}_2'$ . Угол  $\psi_2$  определяют по соотношению:

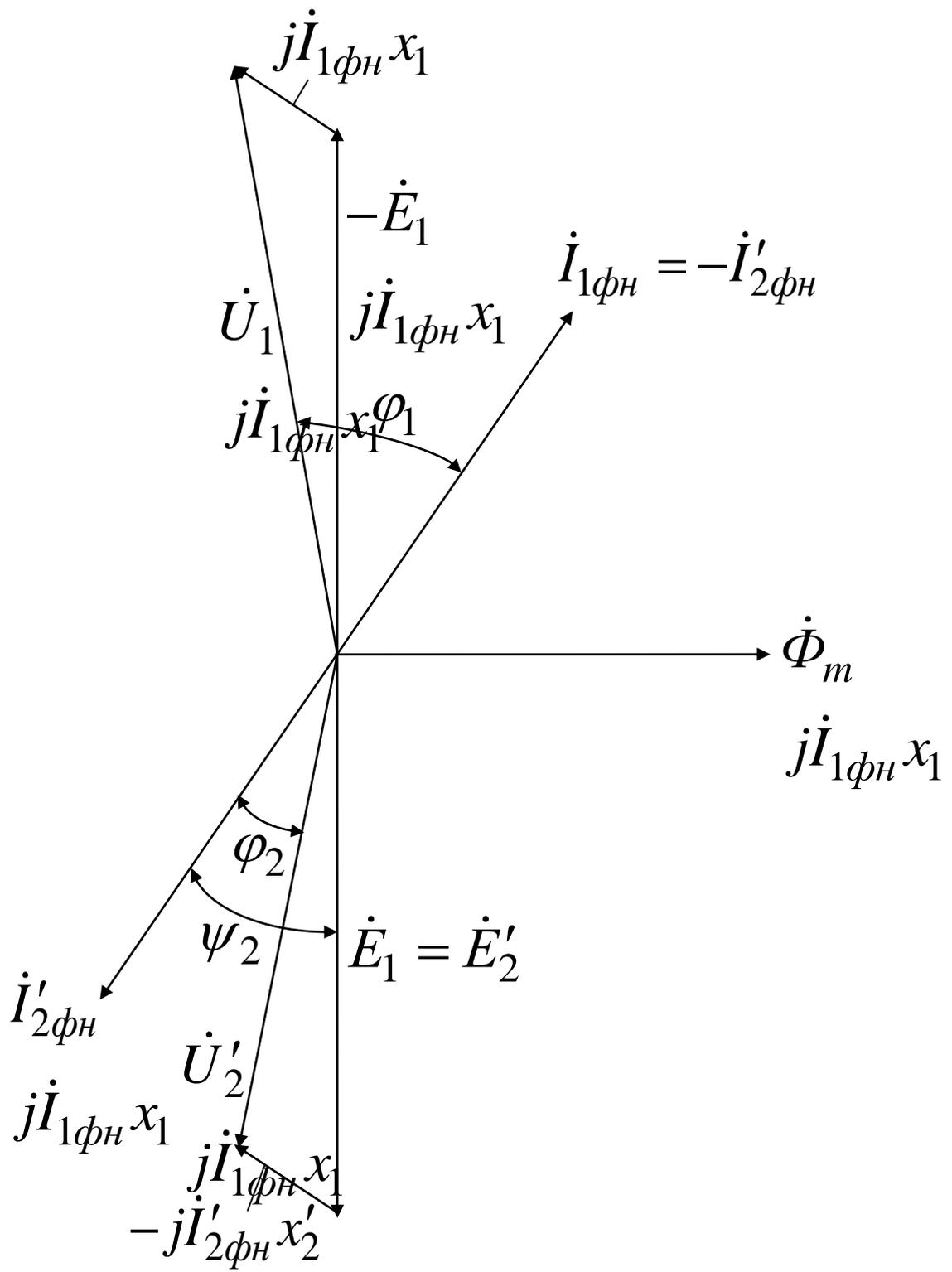


Рис. 5. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \varphi_2 + \frac{x_k^*}{2}}{\cos \varphi_2 + \frac{r_k^*}{2}}.$$

2.10.8 Вектор напряжения  $\dot{U}'_{2\phi_n}$  строится по уравнению:

$$\dot{U}'_{2\phi_n} = \dot{E} - j\dot{I}'_{2\phi_n} \cdot x'_2 - \dot{I}'_{2\phi_n} \cdot r'_2,$$

полагая, что  $\dot{I}'_{2\phi_n} = -\dot{I}'_{1\phi_n}$ .

2.10.9 Затем строится вектор напряжения  $\dot{U}'_{1\phi_n}$  по уравнению:

$$\dot{U}'_{1\phi_n} = -\dot{E}_1 + j\dot{I}'_{1\phi_n} \cdot x_1 + \dot{I}'_{1\phi_n} \cdot r_1.$$

## 2.11 Определение КПД трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{S_n \cdot \cos \varphi_2} \cdot \left( \frac{P_0}{I_2^*} + I_2^* \cdot P_k \right)},$$

где:  $I_2^* = \frac{I_2}{I_{2n}}$  – степень нагрузки трансформатора.

Расчет производится для  $I_2^* = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ . По результатам расчета строится характеристика  $\eta = f(I_2^*)$ . Расчет одного значения КПД трансформатора приводится в работе. Результаты других значений КПД сводятся в таблицу.

## 2.12 Изменение вторичного напряжения под нагрузкой

Изменение напряжения трансформатора при номинальной нагрузке  $\Delta u$  рассчитывается по формулам, приведенным в [2].

2.12.1 Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_{ка} \% = \frac{P_k}{10 \cdot S_n};$$

где  $P_k$  – в Вт,  $S_n$  – в кВ·А.

2.12.2 Индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_{кр} \% = \sqrt{(u_k \%)^2 - (u_{ка} \%)^2}.$$

2.12.3 Номинальное изменение вторичного напряжения:

$$\Delta u_n = u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2 \cdot$$

2.12.4 Для любого значения тока нагрузки:

$$\Delta u = I_2^* \cdot (u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2)$$

Расчет производится для  $I_2^* = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ . По результатам расчета строится характеристика  $\Delta u = f(I_2^*)$ .

2.12.5 Построить схему замещения приведенного трансформатора [2] и [3] с указанием значений рассчитанных параметров.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

Для определения величины намагничивающего тока, обеспечивающей заданное напряжение на зажимах генератора при заданном токе нагрузке и коэффициенте мощности требуется построить векторную диаграмму ЭДС и МДС неявнополюсного трехфазного синхронного генератора (СГ) при номинальном режиме работы. Для вычерчивания диаграммы ЭДС и МДС должны быть заданы:

- а) характеристика холостого хода СГ  $E_0 = f(i_g)$ ;
- б) номинальный коэффициент мощности генератора  $\cos \varphi_n$ ;
- в) индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора генератора  $x_\sigma$ ;
- г) отношение короткого замыкания ОКЗ.

Необходимые для определения намагничивающего тока СГ величины и их числовые значения приведены в таблице 4.

При этом рекомендуется принять для величин  $E_0^* = 1$  и  $i_g^* = 1$  отрезки по 10 см, т.е. принять масштаб 1:10.

Прежде всего следует построить характеристику холостого хода  $E_0 = f(i_g)$ , для которой значения ЭДС и тока возбуждения в относительных единицах приведены в таблице 5.

Таблица 5

Нормальная характеристика холостого хода СГ

Ток возбуждения $i_g$ , о.е.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
ЭДС $E_0$ , о.е.	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

Нормальная характеристика холостого хода СГ задана относительными значениями ЭДС и тока возбуждения, которые приведены в таблице 5.

В рассматриваемом случае ток возбуждения определяется для номинальных значений напряжения, тока нагрузки и коэффициента мощности. Построение диаграммы выполняется в относительных единицах величин напряжения и тока.

3.1 Номинальный ток СГ:

$$I_{2H} = \frac{P_H}{m_1 U_H \cos \varphi_n}, \text{ А, где } m_1 = 3 \text{ - число фаз синхронного генератора.}$$

3.2 Угол сдвига фаз в номинальном режиме:

$$\varphi_n = \arccos(\cos \varphi_n), \text{ град};$$

Принимаем масштабы по напряжению и току:  $m_U = 0,01$  ед/мм и  $m_I = 0,01$  ед/мм.

3.3 Ток короткого замыкания (к.з.):

$$i_{\text{ск}} = \frac{1}{OKЗ}, \text{ о.е.}$$

3.4 Угол сдвига фаз при опыте к.з.

$$\psi_{\text{ск}} = \arctg \frac{X_{\sigma a}}{R_a}, \text{ град.}$$

Если  $R_a \leq 0,01$ , то падением напряжения на активном участке сопротивления обмотки статора пренебрегаем.

3.5 ЭДС синхронного генератора при опыте к.з:

$$E_{\text{ск}} = \sqrt{R_a^2 + X_{\sigma a}^2}, \text{ о.е.}$$

Откладываем по оси ординат величину  $E_{\sigma n} = X_{\sigma a}$  о.е., и снеся ее на характеристику холостого хода синхронного генератора по оси абсцисс находим значение тока  $i_{\sigma \sigma}$ .

3.6 Ток якоря приведенный к условиям возбуждения:

$$i_{\sigma a} = i_{\text{ск}} - i_{\sigma \sigma} \text{ о.е.}$$

3.7 Теперь строим вектор  $E_{\sigma n} = E_{\text{он}}$  по уравнению:

$$E_{\sigma n} = E_{\text{он}} = \dot{U}_n + \dot{I}_n \cdot R_a + j X_{\sigma a} \cdot \dot{I}_n, \text{ В}$$

По оси ординат откладываем вектор  $U = \dot{U}_n = 1$  (точка А на рис. 6), под углом  $\varphi_n^\circ$  к нему проводим вектор тока  $I = \dot{I}_n = 1$  (точка А<sub>1</sub> на рис. 6). Затем, прибавив к вектору  $U$  геометрически падение напряжения  $\Delta U_\sigma = j X_{\sigma a} \dot{I}_n$  (отрезок АВ), получаем вектор  $E_{\sigma n} = \dot{E}_{\text{он}}$  (отрезок ОВ на рис. 6), который опережает вектор  $U = \dot{U}_n = 1$  на угол  $\gamma_n$ , а вектор тока  $I = \dot{I}_n = 1$  - на угол  $\psi_n$ .

3.8 Угол сдвига по фазе между напряжением и ЭДС:

$$\gamma_n = \arctg \frac{BK}{OK}, \text{ град.}$$



### 3.9 Угол сдвига по фазе между током и ЭДС:

$$\psi_n = \varphi_n + \gamma_n, \text{ град.}$$

Перенеся величину  $E_{\sigma n} = \dot{E}_{on} = OB$  на ось ординат, найдем по характеристике х.х. соответствующий ей намагничивающий ток  $i_M = \dot{i}_{e0} = OD$  о.е. Вектор  $OD$  откладываем по оси абсцисс. В точке  $D$  под углом  $\psi_n$  к оси ординат строим вектор  $DM = i_{ea}$ . Сумма векторов  $OD$  и  $DM$  даст вектор  $OM = i_{en}$  о.е. Так же из точки  $O$  радиусом  $OM$  проводим дугу  $MN$ . Сносим это значение на характеристику х.х. и определяем ЭДС холостого хода СГ  $E_0$  о.е.

### 3.10 Изменение напряжения при сбросе нагрузки:

$$\Delta U = (E_0 - U_n) \cdot 100\%, \%$$

Для определения процентного изменения напряжения при сбросе нагрузки, используем построенную диаграмму и характеристику холостого хода и воспользуемся следующим приемом: т.к. задача состоит в том, что в  $\triangle OM_1D_1$ , из которого можно определить намагничивающий ток  $i_{M1} = OD_1$  известны лишь две стороны  $OM = i_{en}$  и  $D_1M_1$ , то задаемся углом  $\angle C_1D_1M_1 = \varphi_n + \gamma_1$ . Считая угол  $\gamma_n$  малым, полагают, что  $\gamma_1 = I_{1,2,3} \cdot \gamma_n$ .

Все данные сводим в таблицу 6.

Таблица 6

Данные токов и углов

$I_n$	1,0	$I_1$	0,75	$I_2$	0,5	$I_3$	0,25
$\psi_n$		$\psi_1$		$\psi_2$		$\psi_3$	
$\gamma_n$		$\gamma_1$		$\gamma_2$		$\gamma_3$	
$i_{ea}$		$i_{ea1}$		$i_{ea2}$		$i_{ea3}$	

Из точки  $D$  под углами  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  к линии  $DC$  проводим отрезки  $DS_1 = I_1 \cdot DM$ ,  $DS_2 = I_2 \cdot DM$ ,  $DS_3 = I_3 \cdot DM$ . Здесь  $I_1, I_2, I_3$  - относительные значения тока нагрузки. Передвигаем отрезки  $DS_1, DS_2, DS_3$  вправо параллельно самим себе до тех пор пока точки  $S_1, S_2, S_3$  не коснутся дуги  $MN$  (получим точки  $M_1, M_2, M_3$  и  $D_1, D_2, D_3$  являющиеся вершинами  $\triangle OM_1D_1, \triangle OM_2D_2, \triangle OM_3D_3$ ). Сторона  $OD_1$  равна намагничивающему току  $i_{M1}$  в о.е. Зная токи  $i_{M1}, i_{M2}, i_{M3}$  с помощью характеристики х.х. находим ЭДС  $E_{\sigma 1} = E_{o1} = D_1C_1$  о.е., индуктируемую потоком в воздушном зазоре.

### 3.11 Напряжение синхронного генератора:

$$U_1 = \dot{E}_{o1} - I_1 \cdot R_a - j X_{\sigma a} \cdot I_1, \text{ В.}$$

Вектор  $E_{o1} = OB_1$  откладываем под углом  $\gamma_1$  к оси ординат. Вычитая из этого вектора падение напряжения  $\Delta U = j X_{\sigma a} \cdot I_1$ , направленное перпендикулярно току  $I = \dot{I}_n = 1$ , получим искомое напряжение  $U_1 = OA_2$ . Этим способом определяют напряжения для трех значений тока нагрузки  $I_i = 0,25; 0,5; 0,75$ . Внешнюю характеристику строим слева от диаграммы в о.е. (рис. 6).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

**1. Копылов, И.П.** Электрические машины в 2 т. Том : учебник для академического бакалавриата/ И.П. Копылов - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Юрайт, 2017 - 267 с. ЭБС ЮРАЙТ

**2. Встовский, В. Л.** Электрические машины. Учебник Сибирский федеральный университет 2013 464.с. <http://www.knigafund.ru/books/185233>

**3. Лунин, В. П.** Электротехника и электроника в 3 т. Том 1. Электрические и магнитные цепи : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. П. Лунин, Э. В. Кузнецов ; под общ. ред. В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 255 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00356-7.

**5. Соломин, В.А.** Электрические машины постоянного тока и трансформаторы: учебно-методическое пособие к практическим работам / В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина; ФГБОУ ВО РГУПС.-Ростов-н/д, РГУПС, 2016 г.-33 с. +ЭР НТБ (Электронный ресурс научно-технической библиотеки)

## Приложение 1

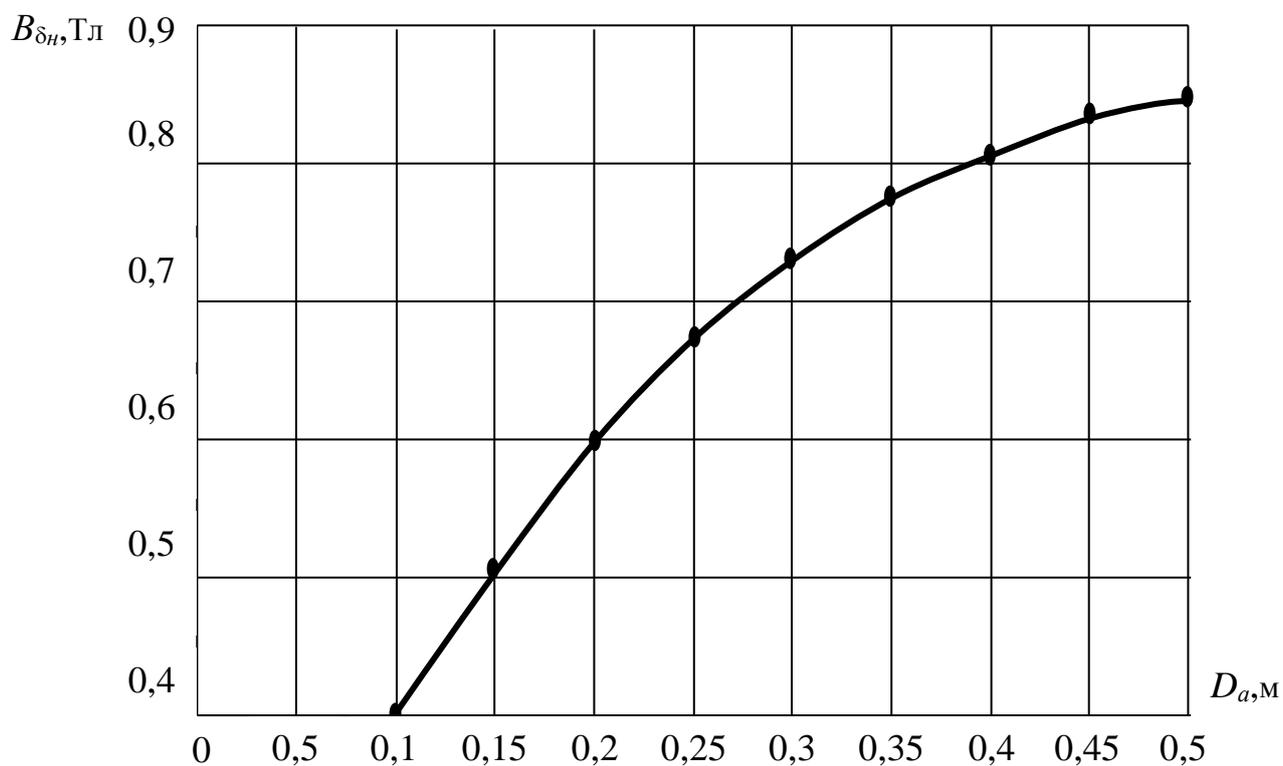


Рисунок 1. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

При выполнении расчетов принять, что сердечники якоря и главных полюсов набраны из листов электротехнической стали марок 1211, 1212 или 2212, 3411 толщиной 0,5 мм; материал станины – литая сталь. Пазы якоря открытые, с параллельными стенками.

Приложение 2  
Кривая намагничивания стали марок 1211,1212

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H \cdot 10^2, A/m$									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,4	1,40	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,21	3,30	3,37	3,44	3,52	3,6	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,0	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,2	7,39	7,59	7,79	8,0	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	44,12
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	356	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1144	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2,5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560

Кривая намагничивания стали 3411 (для полюсов)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H \cdot 10^2, A/m$									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,0	1,7	1,7	1,8	1,85	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1
1,1	2,2	2,2	2,3	2,35	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7
1,2	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
1,3	3,7	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8
1,4	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
1,5	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7
1,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,7	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	28,0	31,0	34,0	37,0
1,8	40,0	43,0	46,0	50,0	54,0	59,0	65,0	71,0	78,0	85,0
1,9	92,0	100	112	130	155	190	225	260	300	350
2,0	400	450	500	550	600	-	-	-	-	-

Кривая намагничивания литой стали (Ст. 3)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H·10 <sup>2</sup> , А/м									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,8	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,50	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,0	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,1	8,23	8,35	8,48	8,5	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,76
1,1	10,90	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,4	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет магнитной цепи машины постоянного тока .....	5
1.1 Определение МДС воздушного зазора .....	6
1.2 Определение МДС зубцовой зоны .....	7
1.3 Определение МДС главного полюса .....	8
1.4 Определение МДС спинки якоря .....	9
1.5 Определение МДС ярма станины .....	9
1.6 Построение характеристики намагничивания машины постоянного тока .....	9
1.7 Определение коэффициента насыщения магнитной цепи .....	9
1.8 Расчет простой петлевой обмотки МПТ .....	14
1.9 Расчет простой волновой обмотки МПТ .....	15
2. Расчет параметров трехфазного трансформатора .....	19
2.1 Определение номинальных линейных и фазных токов и напряжений трансформатора .....	19
2.2 Параметры холостого хода .....	19
2.3 Фазный коэффициент трансформации .....	22
2.4 Полное базовое сопротивление трансформатора .....	22
2.5 Абсолютные значения сопротивлений холостого хода .....	22
2.6 Параметры короткого замыкания .....	22
2.7 Абсолютные значения параметров короткого замыкания .....	22
2.8 Параметры обмоток трансформатора .....	22
2.9 Параметры намагничивающего контура .....	23
2.10 Построение векторной диаграммы трансформатора при активно- индуктивной нагрузке .....	23
2.11 Определение КПД трансформатора .....	25
2.12 Изменение вторичного напряжения под нагрузкой .....	25
3. Определение намагничивающего тока синхронного генератора при нагрузке .....	26
Библиографический список .....	30
Приложение 1 .....	31
Приложение 2 .....	32

*Учебное издание*

**Соломин Владимир Александрович**  
**Замшина Лариса Леонидовна**  
**Трубицина Надежда Анатольевна**

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ**

Печатается в авторской редакции

Технический редактор Н.С. Федорова

Подписано в печать 30.12.15. Формат 60×84/16.  
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,09.  
Тираж        экз. Изд. № 50226. Заказ        .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

---

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, д. 2.