

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

До друку дозволяю

Ректор \_\_\_\_\_ Л.Л.Товажнянский

У світ дозволяю

Ректор \_\_\_\_\_ Л.Л.Товажнянский

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА,  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ  
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ»  
для студентов специальности 7.092206  
«Электрические машины и аппараты»  
заочной формы обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
Протокол № 4 от 15.12.2000 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2001

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА,  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ  
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ»  
для студентов специальности 7.092206  
«Электрические машины и аппараты»  
заочной формы обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
Протокол № 4 от 15.12.2000 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2001

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА,  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ  
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ»  
для студентов специальности 7.092206  
«Электрические машины и аппараты»  
заочной формы обучения

Харьков 2001

Типова програма, методичні вказівки до контрольних робіт з курсу «Електричні машини з постійними магнітами» для студентів спеціальності 7.092206 «Електричні машини та апарати» заочної форми навчання / Уклад. А.Г. Мірошніченко, Ю.Д.Новіков - Харків: НТУ «ХП», 2001. - 12 с. Рос. мовою.

Укладачі: А.Г.Мірошніченко  
Ю.Д.Новіков

Рецензент Л.П.Галайко

Кафедра електричних машин

# 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КУРСА «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ»

Целью изучения данной дисциплины является изучение основных свойств постоянных магнитов и электрических машин на основе этих постоянных магнитов.

В ходе изучения дисциплины студенты должны изучить основные типы постоянных магнитов, их свойства и характеристики, способы намагничивания, а также конструкцию и основные характеристики электрических машин с постоянными магнитами.

В результате изучения курса студенты должны обрести умение выбирать тип и конструкцию электрических машин, в которых применение постоянных магнитов наиболее эффективно.

Теоретической базой дисциплины являются курс физики и общий курс электрических машин.

Изучение курса «Электрические машины с постоянными магнитами» предусматривает прослушивание лекций, самостоятельную работу над учебниками и пособиями, а также выполнение контрольной работы. При самостоятельной работе необходимо составить краткий конспект изученного материала и ответить на вопросы для самопроверки. При работе над материалом курса следует пользоваться рекомендованными в конце данного пособия источниками.

После изучения курса и проверки усвоения путем ответов на вопросы для самопроверки рекомендуется выполнять контрольную работу.

## 2 ПРОГРАММА КУРСА

### 2.1 Постоянные магниты в системах возбуждения электрических машин

Особенности электрических машин с постоянными магнитами. Природа ферромагнетизма. Предельная петля гистерезиса. Частичные петли перемагничивания. Линия возврата. Магнитотвердые материалы для постоянных магнитов. Намагничивание постоянных магнитов.

#### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные достоинства и недостатки электрических машин с постоянными магнитами.
2. Что такое предельная петля гистерезиса?
3. Что такое линия возврата?
4. В чем разница магнитомягких и магнитотвердых материалов?
5. Перечислите основные типы магнитотвердых материалов.

6. Какие существуют способы намагничивания постоянных магнитов?

## 2.2 Совместная работа постоянных магнитов с внешней цепью

Особенности работы разомкнутого постоянного магнита. Размагничивающий фактор. Влияние величины коэрцитивной силы на размагничивание магнита. Влияние реакции якоря на состояние магнита. Энергия, запасенная постоянными магнитами. Коэффициент формы кривой размагничивания. Совместная работа постоянного магнита с внешней цепью. Стабилизация постоянных магнитов. Защита постоянных магнитов от нестационарных размагничивающих эффектов. Схема замещения линеаризованных постоянных магнитов.

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое размагничивающий фактор?
2. Как влияет величина коэрцитивной силы на размагничивание магнитов?
3. Как влияет реакция якоря на состояние постоянного магнита?
4. Чему равна энергия, создаваемая единичным объемом магнита в рабочем зазоре?
5. Перечислите два условия совместной работы постоянного магнита с внешней цепью.
6. Для чего выполняется стабилизация постоянных магнитов?
7. Какова защитная роль полюсных наконечников?
8. Что такое фиктивная МДС постоянного магнита?

## 2.3 Основные конструкции электрических машин с постоянными магнитами

Конструкция статора синхронного генератора с постоянными магнитами (СГ с ПМ). Конструкции роторов СГ с ПМ: ротор с цилиндрическим ПМ; ротор с ПМ типа «звездочка»; роторы с призматическими ПМ; роторы с когтеобразными полюсами. Особенности работы СГ с ПМ. Регулирование и стабилизация выходного напряжения. Синхронные двигатели с ПМ. Машины постоянного тока с ПМ.

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные конструкции роторов СГ с ПМ.
2. В чем заключаются особенности работы СГ с ПМ?
3. Как производится регулирование и стабилизация выходного напряжения СГ с ПМ?
4. В чем особенности пазовой, беспазовой и полый конструкции якоря?

### 3 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

#### 3.1 Постановка задачи

По данным таблицы 1 определить величину магнитного потока и индукции в зазоре синхронного генератора с постоянными магнитами.

#### 3.2 Порядок выполнения

Для определения величины магнитного потока в зазоре СГ с ПМ используются два условия совместной работы ПМ с внешней цепью - условие равновесия потоков и условие равновесия МДС:

$$\Phi_M = \Phi_\delta + \Phi_\sigma, \quad F_M = F_{вн}.$$

На основании этих условий по заданным размерам ротора СГ с ПМ (Таблица 1) и параметрам материала ПМ (Таблица 2) строится рабочая диаграмма ПМ в относительных единицах и определяется магнитный поток в зазоре  $\Phi_\delta$  и индукция  $B_\delta$  в режиме холостого хода. В зависимости от номера варианта расчет ведется для ротора с радиальным намагничиванием ПМ (Рисунок 1) и для ротора с тангенциальным намагничиванием ПМ (Рисунок 2).

Таблица 1 - Данные ротора СГ с ПМ

№ ва- риан- та	Марка матери- алов ПМ	Намагни- чивание ПМ	D, м	$\tau$ , м	L, м	$\delta$ , м	$h_M$ , м	$b_M$ , м
1	КС37	Радиальн.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,015	0,008
2	КС37	Тангенц.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,004	0,015
3	КС37А	Радиальн.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,015	0,008
4	КС37А	Тангенц.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,004	0,015
5	КСП37	Радиальн.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,015	0,008
6	КСП37	Тангенц.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,004	0,015
7	КСП37А	Радиальн.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,015	0,008
8	КСП37А	Тангенц.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,004	0,015
9	Nd-Fe-B	Радиальн.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,015	0,008
10	Nd-Fe-B	Тангенц.	0,07	0,027	0,04	0,001	0,004	0,015
11	КС37	Радиальн.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,022	0,018
12	КС37	Тангенц.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,009	0,022
13	КС37А	Радиальн.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,022	0,018
14	КС37А	Тангенц.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,009	0,022
15	КСП37	Радиальн.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,022	0,018
16	КСП37	Тангенц.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,009	0,022

Таблица 2 - Параметры ПМ на основе РЗМ

Марка материала ПМ	$B_{\delta}$ , Тл	$H_c$ , кА/м
КС37	0,77	540
КС37А	0,82	560
КСП37	0,9	520
КСП37А	0,9	500
Nd-Fe-B	1,23	880

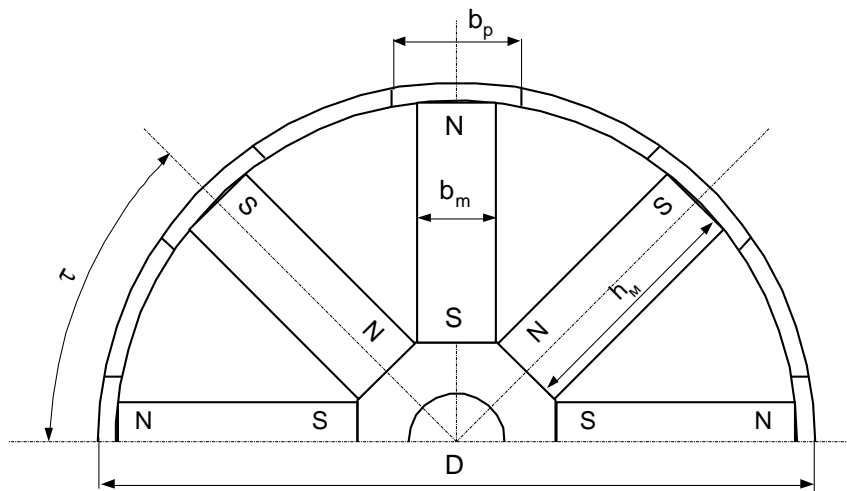


Рисунок 1 – Ротор с радиальным намагничиванием ПМ

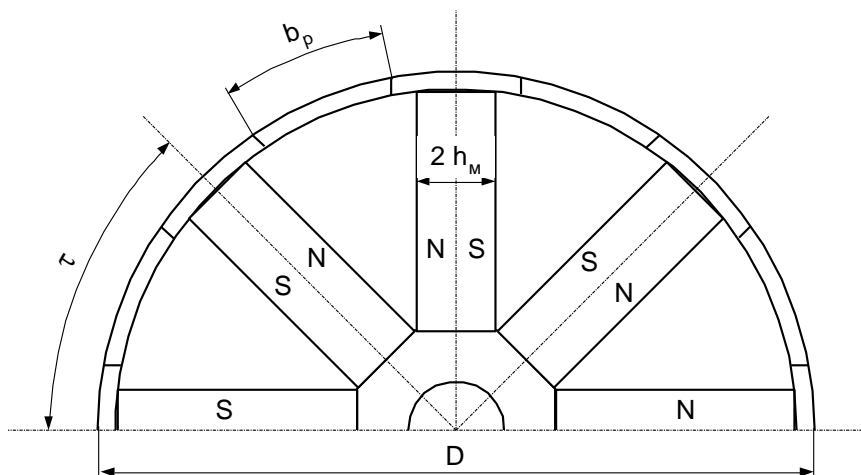


Рисунок 2 – Ротор с тангенциальным намагничиванием ПМ



Принятые обозначения:

$B_r$  - остаточная индукция;

$H_c$  - коэрцитивная сила;

$D$  - диаметр ротора;

$\tau$  - полюсное деление;

$L$  - осевая длина ротора;

$\delta$  - длина воздушного зазора;

$h_m$  - длина магнита в направлении намагничивания;

$b_m$  - ширина магнита;

$b_p$  - ширина полюса;

$\Phi_m$  - магнитный поток в магните;

$\Phi_\delta$  - магнитный поток в зазоре;

$\Phi_\sigma$  - поток рассеяния;

$k_\sigma$  - коэффициент рассеяния;

$k_\delta$  - коэффициент воздушного зазора;

$k_\mu$  - коэффициент насыщения.

Для построения рабочей диаграммы ПМ в относительных единицах необходимо определить характерные масштабы:

- масштаб потока  $m_\Phi = B_r S_m$ ,

где  $S_m = b_m L$  - площадь поперечного сечения магнита;

- масштаб МДС  $m_F = H_c h_m$ ;

- масштаб магнитной проводимости  $m_G = \frac{B_r S_m}{H_c h_m}$ .

При построении рабочей диаграммы ПМ за основу берется характеристика размагничивания заданного материала ПМ, которую необходимо построить по двум точкам  $B_r$  и  $H_c$  (Рисунок 3), учитывая линейность кривой размагничивания ПМ из РЗМ. Характеристику размагничивания материала магнита необходимо перестроить в характеристику размагничивания конкретного ПМ с заданными размерами в координатах  $F$ ,  $\Phi$ . Для этого необходимо задаться рядом точек характеристики размагничивания материала ПМ (Рисунок 3) и преобразовать координаты этих точек по схеме

$$H \rightarrow F = H h_m, \quad B \rightarrow \Phi = B S_m.$$

По полученным координатам точек строится характеристика размагничивания магнита (Рисунок 4). Полученную характеристику размагничивания магнита необходимо перестроить в относительных координатах  $f$  и  $\varphi$ . Для этого необходимо задаться рядом точек характеристики размагничивания магнита (Рисунок 4) и преобразовать координаты этих точек по схеме

$$F \rightarrow f = \frac{F}{m_F}, \quad \Phi \rightarrow \varphi = \frac{\Phi}{m_\Phi}.$$

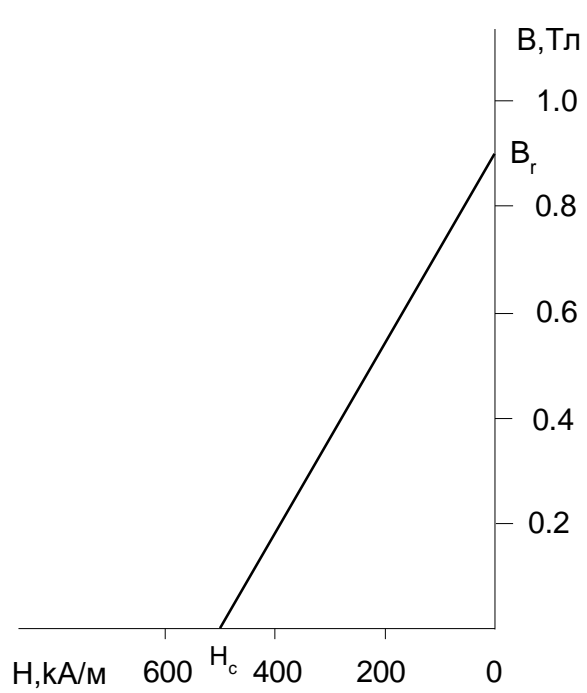


Рисунок 3

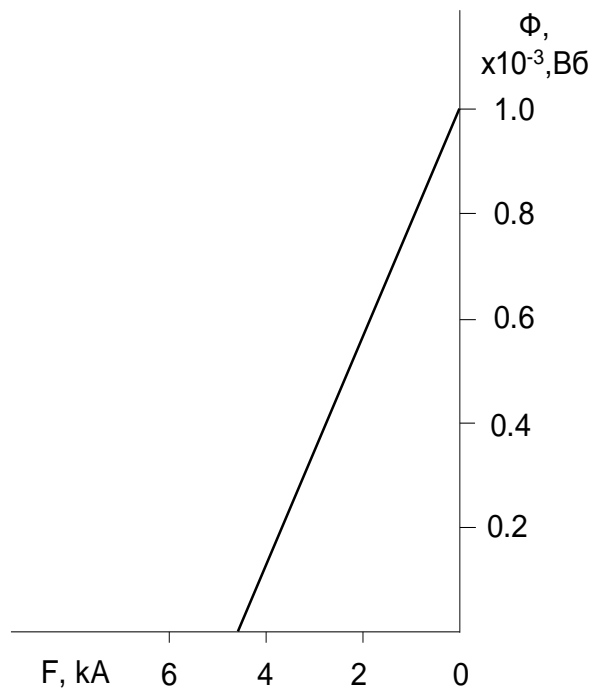


Рисунок 4

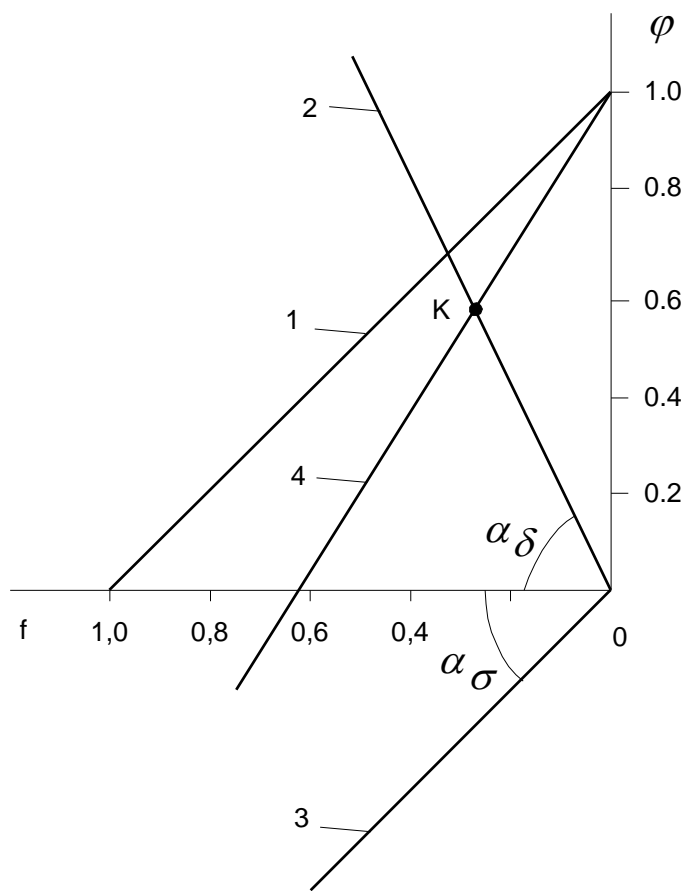


Рисунок 5

По полученным координатам точек строится характеристика размагничивания магнита в относительных координатах  $f$  и  $\varphi$  (зависимость 1 на рисунке 5). В этих же координатах строится зависимость потока в зазоре в относительных единицах  $\varphi_\delta$  от МДС внешней цепи путем проведения луча из начала координат под углом  $\alpha_\delta$  (зависимость 2 на рисунке 5)

$$\alpha_\delta = \arctg g_\delta,$$

где  $g_\delta = \frac{G_\delta}{m_G},$

$G_\delta$  - Магнитная проводимость воздушного зазора, определяется по формулам:

для ротора с радиальным намагничиванием ПМ

$$G_\delta = \frac{\mu_0 \alpha_\delta \tau L}{\delta'};$$

для ротора с тангенциальным намагничиванием ПМ

$$G_\delta = \frac{0,5 \mu_0 \alpha_\delta \tau L}{\delta'}.$$

В этих формулах:

$\alpha_\delta$  - расчетный коэффициент полюсного перекрытия,

$$\alpha_\delta = (1,1 \div 1,2) \alpha_p,$$

где  $\alpha_p = \frac{b_p}{\tau} = 0,6 \div 0,7;$

$$\delta' = \kappa_\delta \kappa_\mu \delta,$$

где  $\kappa_\delta \kappa_\mu = 1,1 \div 1,4.$

В третьем квадранте на рисунке 5 строится зависимость потока рассеяния в относительных единицах  $\varphi_\sigma$  от МДС путем проведения луча из начала координат по углом  $\alpha_\sigma$  (зависимость 3 на рисунке 5)

$$\alpha_\sigma = \arctg g_\sigma,$$

где  $g_\sigma = (\kappa_\sigma - 1)g_\delta, \quad \kappa_\sigma = 1,1 \div 1,4.$

Путем вычитания из характеристики размагничивания магнита (1) характеристики потока рассеяния (3) получается характеристика размагничивания (4) идеального магнита без потока рассеяния. Точка пересечения зависимостей (2) и (4) дает положение рабочей точки К, которой соответствует значение  $\varphi_\delta$ . Переход к абсолютным единицам производится по формулам:

для ротора с радиальным намагничиванием ПМ

$$\Phi_\delta = \varphi_\delta m_\phi;$$

для ротора с тангенциальным намагничиванием ПМ

$$\Phi_{\delta} = 2\varphi_{\delta} m_{\phi}.$$

Величина индукции в воздушном зазоре определяется по формуле

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \tau L}.$$

### 3.2 ПРИМЕР РАСЧЕТА

Данные ротора СГ с ПМ

№ варианта	Марка материала ПМ	Намагничивание ПМ	D, м	$\tau$ , м	L, м	$\delta$ , м	$h_m$ , м	$b_m$ , м
22	КСП37А	Тангенц.	0,09	0,0354	0,05	0,001	0,009	0,022

Сделать соответствующий рисунок ротора СГ с ПМ.

Определяем соответствующие масштабы:

- масштаб потока

$$m_{\phi} = B_r S_m,$$

где  $S_m = b_m L = 0,022 \cdot 0,05 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,

$$m_{\phi} = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = 0,99 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

- масштаб МДС

$$m_F = H_c h_m = 500 \cdot 10^3 \cdot 0,009 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ А};$$

- масштаб магнитной проводимости

$$m_G = \frac{B_r S_m}{H_c h_m} = \frac{0,99 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^3} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

По данным таблицы 2 строится характеристика размагничивания материала ПМ (Рисунок 3), которая перестраивается в характеристику размагничивания заданного ПМ в абсолютных (Рисунок 4) и относительных единицах (Рисунок 5).

Определяем магнитную проводимость воздушного зазора в абсолютных и относительных единицах.

$$G_{\delta} = \frac{0,5\mu_0 \alpha_{\delta} \tau L}{\delta'} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,0354 \cdot 0,05}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$g_{\delta} = \frac{G_{\delta}}{m_G} = \frac{6,9 \cdot 10^{-7}}{2,2 \cdot 10^{-7}} = 3,13.$$

Определяем угол наклона характеристики зазора

$$\alpha_{\delta} = \arctg g_{\delta} = \arctg 3,13 = 72,5^{\circ}.$$

Строим зависимость потока в зазоре от МДС путем проведения луча под углом  $\alpha_\delta$ .

Определяем магнитную проводимость рассеяния в относительных единицах

$$g_\sigma = (\kappa_\sigma - 1) g_\delta = (1,2 - 1) \cdot 3,13 = 0,626.$$

Определяем угол наклона характеристики потока рассеяния

$$a_\sigma = \text{arctg } g_\sigma = \text{arctg } 0,626 = 32^\circ.$$

Строим зависимость потока рассеяния от МДС путем проведения луча из начала координат под углом  $\alpha_\sigma = 32^\circ$  к оси абсцисс в третьем квадранте. Путем вычитания характеристик получаем характеристику размагничивания идеального магнита без потока рассеяния. Точка пересечения этой характеристики с зависимостью потока в зазоре от МДС дает положение рабочей точки К, которой соответствует значение потока в относительных единицах  $\varphi_\delta = 0,62$ . Производим перевод относительных единиц в абсолютные

$$\Phi_\delta = 2 \varphi_\delta m_\phi = 2 \cdot 0,62 \cdot 0,99 \cdot 10^{-3} = 1,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Определяем величину индукции в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_\delta \tau L} = \frac{1,23 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 0,65 \cdot 0,0354 \cdot 0,05} = 0,93 \text{ Тл.}$$

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Новиков Ю.Д., Петренко Н.Я. Специальные электрические машины. Текст лекций. - Харьков: ХПИ, 1991.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высш. шк., 1990.
3. Балагуров В.А., Галтеев, Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. - М.: Энергия, 1964.
4. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. - М.: Высш. шк., 1990.
5. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. - М.: Энергоатомиздат, 1989.