

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА НИКОЛАЯ II»  
(МГУПС (МИИТ))**

Одобрено кафедрой  
«Электрификация и  
электрообеспечение»

**РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО  
И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 3**

по дисциплине

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

с методическими указаниями

для студентов III курса

специальности

Системы обеспечения движения поездов (СДс)

специализации: «Автоматика и телемеханика на железнодорожном  
транспорте» (СА)

«Электрообеспечение железных дорог» (СЭ)

«Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта» (СТ)

**Москва 2017**

Составители:     доцент, к.т.н. Мухамбетов С.Б.,  
                          доцент, к.т.н. Вырыханов Д.А.,  
                          доцент Гирина Е.С.

## Общие указания

В третьей контрольной работе студенты решают две задачи:

1. Расчет разветвленной магнитной цепи при постоянных токах.
2. Расчет цепи переменного тока, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником.

Контрольные задания имеют 100 вариантов. Варианты задач № 1 и 2 отличаются друг от друга схемами и числовыми значениями заданных величин.

Вариант, подлежащий решению, определяется по двум последним цифрам учебного шифра студента: по последней цифре выбирается номер схемы, а по предпоследней – номер числовых значений величин. Например, шифру 1510-СДс-1324 соответствуют схемы 4 и вторые варианты числовых значений.

### Требования к оформлению контрольной работы

1. Работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой указывают название дисциплины, курс, фамилию, имя, отчество, учебный шифр студента.
2. Писать следует на одной стороне листа или на двух при наличии широких полей для замечаний.
3. Условие задачи должно быть переписано в контрольную работу со схемой и числовыми значениями для своего варианта.
4. Расчетную часть каждой задачи следует сопровождать краткими и четкими пояснениями.
5. Основные положения решения объясняют и иллюстрируют электрическими схемами, чертежами, векторными диаграммами и т.д., которые выполняют аккуратно с помощью чертежного инструмента. На электрических схемах показывают положительные направления токов.
6. Выдерживают следующий порядок записи при вычислениях: сначала приводят формулу, затем подставляют числовые значения величин, входящих в формулу, без каких-либо преобразований, далее выполняют преобразования с числами, после этого записывают результат вычислений с указанием единиц измерения.
7. К работе прилагают перечень использованной литературы, в конце работы ставят дату и подпись.
8. Работы, выполненные не по своему варианту, а также написанные неразборчиво, не рецензируются.
9. Правильно выполненная контрольная работа возвращается к студенту с указанием «Допущен к зачету» и при необходимости с перечнем замечаний, которые студент должен исправить к зачету.
10. После получения отрецензированной работы студент должен исправить все ошибки и сделать требуемые дополнения. При большом количестве исправлений они делаются в конце работы.

## Задача № 1

### Расчет разветвленной магнитной цепи при постоянных токах

Для магнитной цепи, изображенной на рис. 1, выполнить следующее:

1. Начертить эквивалентную схему, указав на ней направления магнитных потоков и магнитодвижущих сил (МДС).
2. Составить для магнитной цепи систему уравнений по законам Кирхгофа.
3. Определить магнитные потоки в стержнях и значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Размеры магнитопровода на рис. 1 даны в мм. Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, кривая намагничивания которой представлена в табл.1. Величины токов и число витков обмоток для каждого варианта даны в табл. 2. При расчете цепи магнитными потоками рассеяния пренебречь.

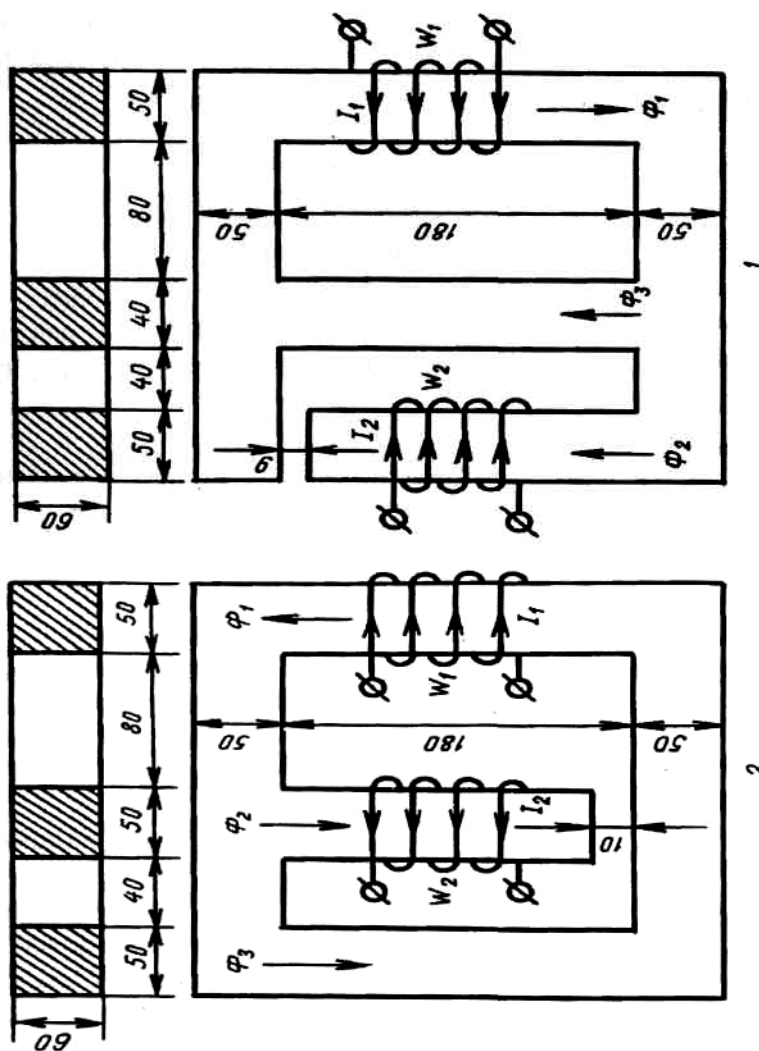


Рис. 1, а

(выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

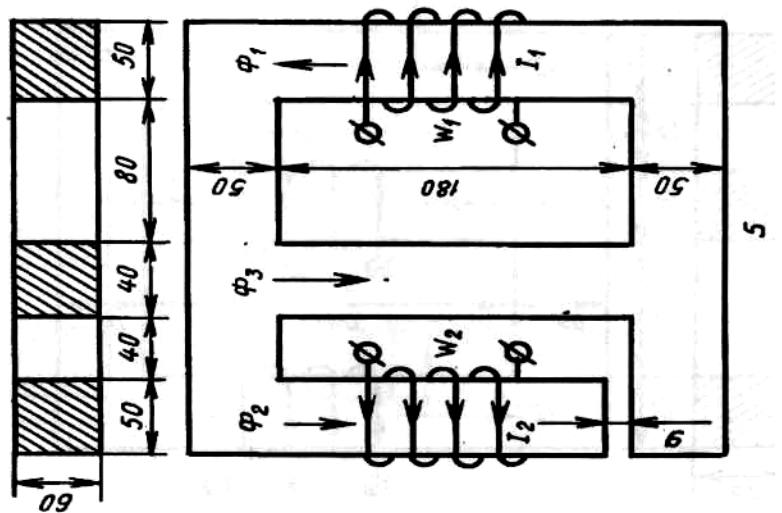
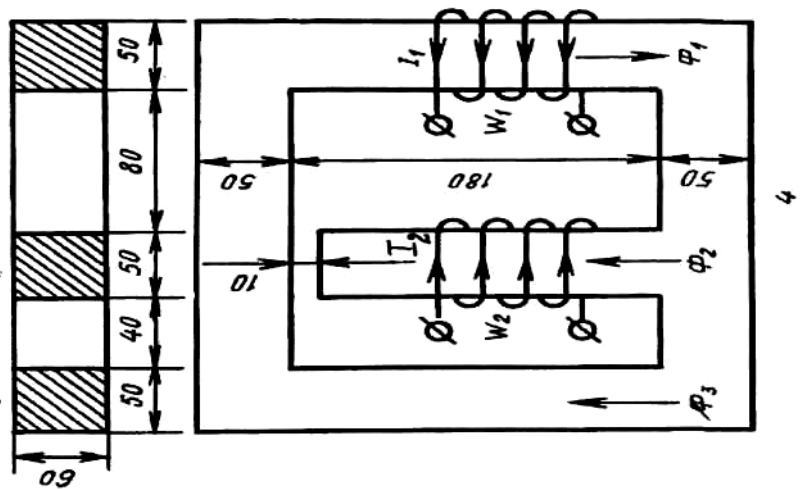
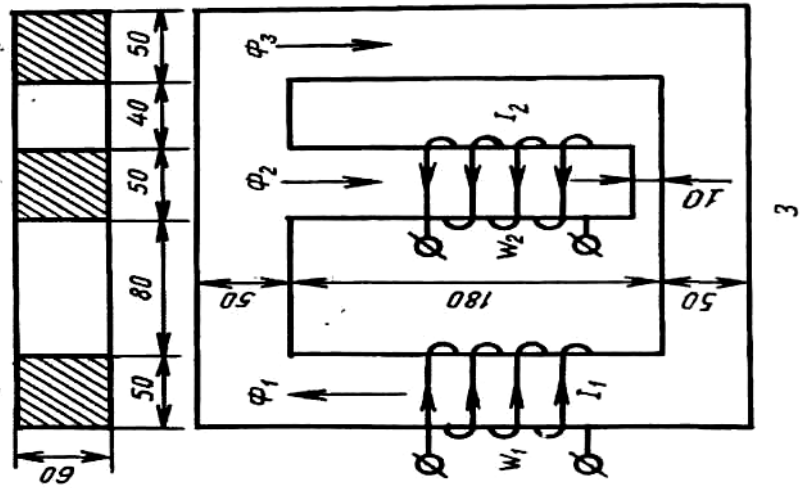


Рис. 1, б  
(выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

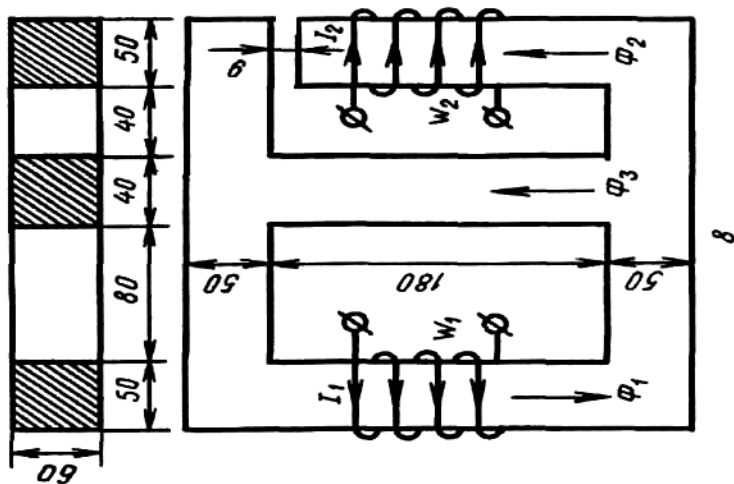
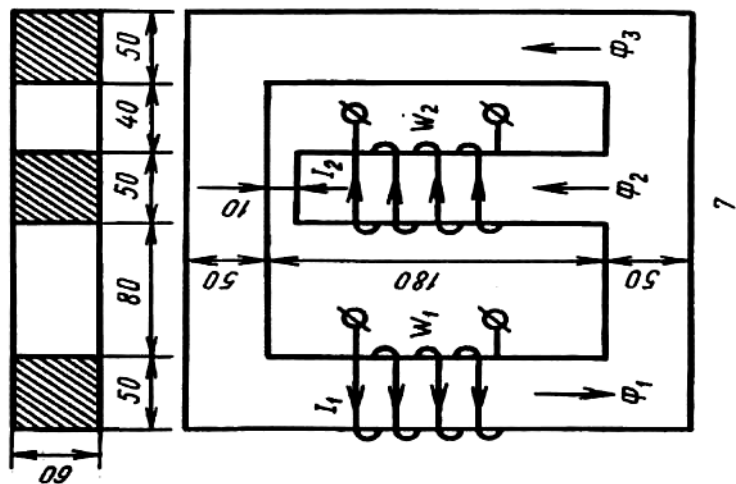
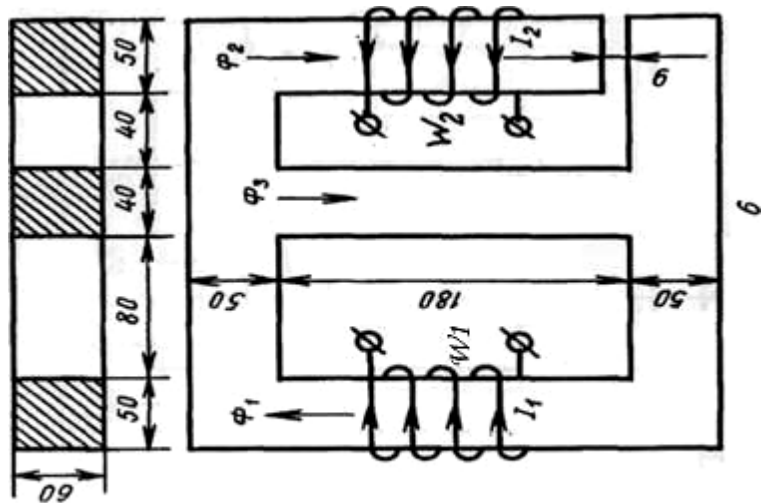


Рис. 1, в  
(выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

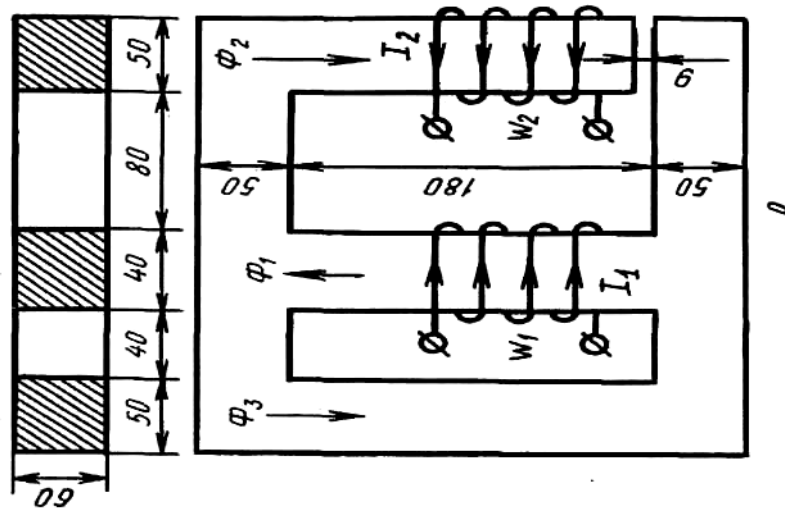
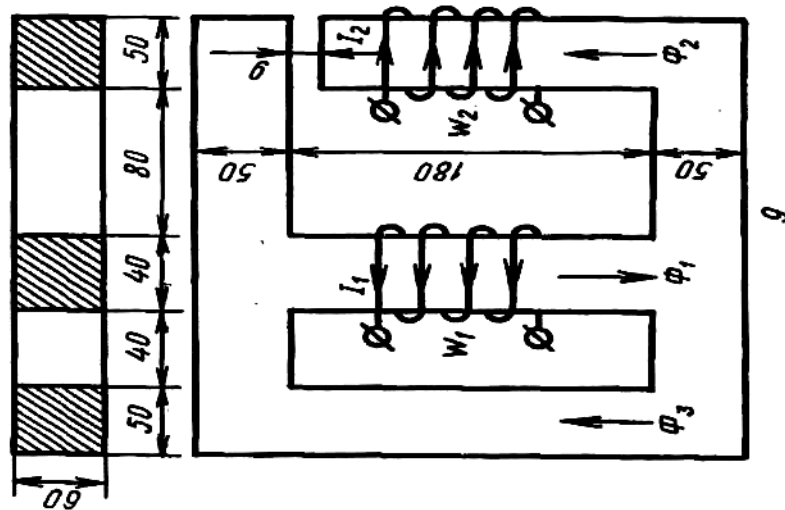


Рис. 1, а  
(выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

Таблица 1  
Кривая намагничивания стали магнитопровода (задача № 1)

$B$ , Тл	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2
$H$ , А/м	0	200	400	950	3900	15000

Исходные данные

Предпоследняя цифра учебного шифра студента	$I_1, \text{ A}$	Число витков $w_1$	$I_2, \text{ A}$	Число витков $w_2$
1	45	130	15	120
2	30	200	20	110
3	35	120	15	120
4	50	100	25	100
5	30	120	10	150
6	45	100	15	200
7	50	120	20	250
8	25	220	15	300
9	30	200	15	150
0	45	120	20	130

Теоретический материал и примеры расчета приведены в [1; 2].

### Методические указания к задаче № 1

Магнитная цепь состоит из элементов, возбуждающих магнитное поле, и ферромагнитных или каких-либо иных тел (сред), по которым замыкаются магнитные потоки. Расчеты разветвленных магнитных цепей основаны на законах Кирхгофа для магнитных цепей. Вследствие нелинейной связи между индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  для ферромагнитных материалов расчеты разветвленных магнитных цепей ведутся графическими методами, аналогично методам расчета нелинейных электрических цепей.

При расчете магнитной цепи, прежде всего, нужно указать на схеме направления магнитодвижущих сил (МДС) по известным направлениям токов и расположению обмоток и задаться направлениями магнитных потоков.

Для определения положительного направления МДС часто пользуются правилом правой руки: если сердечник мысленно охватить правой рукой, расположив ее пальцы по направлению тока в обмотке, то отогнутый большой палец укажет направление МДС.

Так как формально любая магнитная цепь аналогична нелинейной электрической цепи, то аналогами токов электрической цепи являются магнитные потоки, аналогами ЭДС являются МДС, аналогом вольтамперной характеристики является вебер-амперная характеристика.

Магнитопровод электромагнитных устройств характеризуется магнитным сопротивлением участков и величиной МДС обмоток возбуждения магнитного поля. Схема замещения содержит нелинейные элементы  $R_1$  (магнитные сопротивления участков магнитопровода) и линейные сопротивления воздушных промежутков  $R_1 \delta$ .



Для определения магнитных сопротивлений участков магнитопровода магнитную цепь разбивают на однородные участки, каждый из которых выполнен из одного и того же материала и имеет одинаковое поперечное сечение вдоль всей своей длины. Предполагается, что магнитное поле в участках магнитопровода однородно распределено по их длине.

Магнитные потоки замыкаются по средним линиям участков сердечника (магнитопровода). В месте пересечения средних линий горизонтальных участков и средней линии среднего стержня присутствуют узлы эквивалентной схемы (точки  $a$  и  $b$ ). Длины трех участков  $\ell_k$ , м, определяют от узла  $a$  до узла  $b$  с учетом зазора; площади поперечного сечения стержней  $S_k$  вычисляют в  $\text{м}^2$ .

Для графического расчета разветвленной магнитной цепи необходимо построить зависимости магнитных потоков ветвей  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  от магнитного напряжения  $U_{i \dot{a}b}$  между узлами  $a$  и  $b$ . Магнитное напряжение  $U_{i \dot{a}b}$  представляет собой разность магнитных потенциалов между узлами  $a$  и  $b$ , то есть  $U_{i \dot{a}b} = \Phi_{i a} - \Phi_{i b}$ . Эти расчеты рекомендуется выполнять для каждой ветви в отдельной таблице (табл. 3 – табл. 5).

Сначала задаются значениями магнитной индукции из табл. 1 и определяют магнитные потоки ветвей и напряженности магнитного поля участков. Для ферромагнитных участков напряженность поля определяют по кривой намагничивания. Напряженность в воздушном зазоре рассчитывают по известной формуле, считая, что индукция в зазоре равна индукции ветви. Затем для каждого значения магнитного потока на основе эквивалентной схемы находят и заносят в таблицу для каждой ветви межузловое магнитное напряжение  $U_{i \dot{a}b}$  с учетом знаков МДС относительно потоков. Для определения  $U_{i \dot{a}b}$  можно использовать уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа. Затем на основании результатов вычислений на одном графике строят зависимости магнитных потоков ветвей от общего аргумента  $U_{i \dot{a}b}$ .

Графически определяют то значение магнитного напряжения, при котором выполняется первый закон Кирхгофа для магнитной цепи ( $\sum \Phi = 0$ ). Потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , соответствующие этому магнитному напряжению, являются искомыми величинами. Индукцию в зазоре находят по потоку соответствующей ветви.

Пример подробного решения аналогичной задачи приведен в рекомендованной литературе (например, [2]).

3-й стержень ( $\ell_3 =$  м;  $S_3 =$  м<sup>2</sup>)

Таблица 3

№	$B_3$	$\Phi_3 = B_3 S_3$	$H_3$	$U_{i ab} =$
	Тл	Вб	А/м	А
1	0		0	
2	0,4		200	
3	0,8		400	
4	1,2		950	
5	1,6		3900	
6	2,0		15000	

1-й стержень ( $I_1 w_1 =$  А;  $\ell_1 =$  м;  $S_1 =$  м<sup>2</sup>)

Таблица 4

№	$B_1$	$\Phi_1 = B_1 S_1$	$H_1$	$H_1 \ell_1$	$U_{i ab} =$
	Тл	Вб	А/м	А	А
1	0		0		
2	0,4		200		
3	0,8		400		
4	1,2		950		
5	1,6		3900		
6	2,0		15000		

2-й стержень ( $I_2 w_2 =$  А;  $\ell_2 =$  м;  $\delta =$  м,  $S_2 =$  м<sup>2</sup>)

Таблица 5

№	$B_2$	$\Phi_2 = B_2 S_2$	$H_2$	$H_2 \ell_2$	$H_{\hat{a} \hat{c} \hat{a}}$	$H_{\hat{a} \hat{c} \hat{a}} \delta$	$U_{i ab} =$
	Тл	Вб	А/м	А	А/м	А	А
1	0		0				
2	0,4		200				
3	0,8		400				
4	1,2		950				
5	1,6		3900				
6	2,0		15000				

## Задача № 2

### Расчет цепи переменного тока, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником

Электрическая цепь (рис. 2) содержит катушку с ферромагнитным сердечником. Кривая намагничивания стали сердечника  $B = f(H)$  задана в виде таблицы (табл. 6).

Таблица 6

Кривая намагничивания стали сердечника (задача № 2)

$B,$ Тл	0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,75
$H,$ А/м	0	100	120	140	160	200	250	350	500	700	1000	1800	2500	3000

Предполагается, что магнитная индукция в сердечнике изменяется по синусоидальному закону, пренебрегают явлениями гистерезиса и не учитывают вихревые токи и явления рассеивания.

Параметры элементов схемы, максимальная величина магнитной индукции  $B_m$ , длина средней магнитной линии  $\ell$  и площадь поперечного сечения  $S$  сердечника для различных вариантов приведены в табл. 7. Значения индуктивного  $x_L$  и емкостного  $x_C$  сопротивлений соответствуют частоте  $f$ , указанной в этой же таблице.

Аппроксимирующее выражение кривой намагничивания:

$$\hat{I} = a\hat{A}^3. \quad (1)$$

В задаче требуется:

1. Найти коэффициент "a" аппроксимирующего выражения, используя метод наименьших квадратов. Построить в одной и той же системе координат кривые намагничивания по полученному аппроксимирующему выражению и заданную табл. 6. Качественно сопоставить построенные кривые.

2. Определить ток источника энергии  $i$  и приложенное к цепи напряжение  $u$ . Построить кривую мгновенных значений тока  $i = i(t)$ .

3. Определить показания приборов, считая, что вольтметр и амперметр имеют электромагнитное измерительное устройство, а ваттметр – электродинамическое.

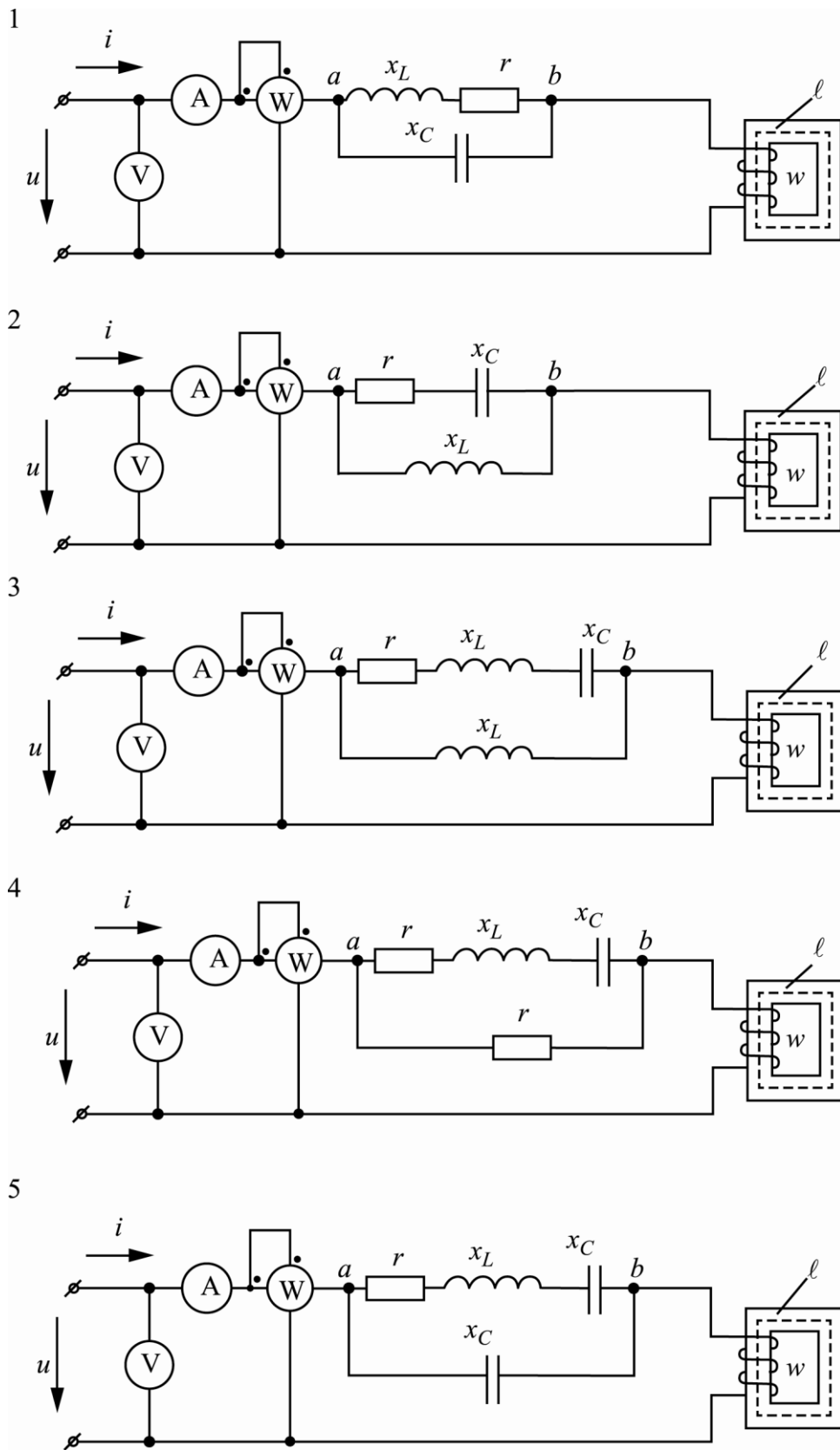


Рис. 2, а

(выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

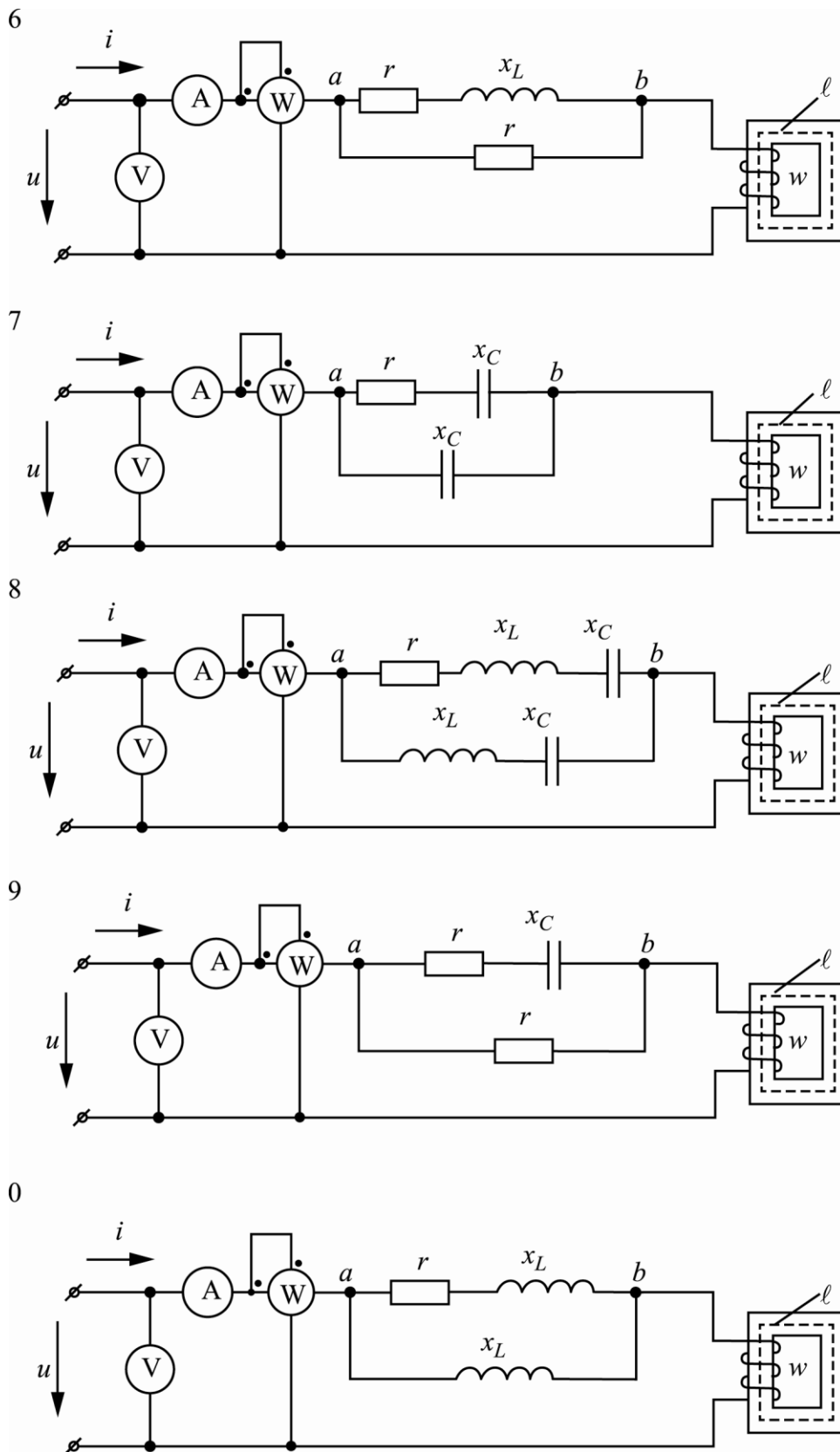


Рис.2, б

а (выбор схемы по последней цифре учебного шифра студента)

Исходные данные

Предпоследняя цифра учебного шифра студента	$r$ , Ом	$x_L$ , Ом	$x_C$ , Ом	Число витков $w$	$\ell$ , см	$S$ , см <sup>2</sup>	$f$ , Гц	$B_m$ , Тл
1	12	30	20	200	40	6	50	1,45
2	15	24	15	500	45	5,5	60	1,7
3	30	42	25	300	35	3,5	400	1,55
4	20	21	15	800	85	4,5	400	1,45
5	40	30	30	500	70	4	60	1,55
6	20	51	20	700	55	4	400	1,65
7	25	30	25	300	70	3	50	1,65
8	40	45	20	900	85	2,5	60	1,7
9	30	54	15	200	65	4,5	50	1,6
0	35	42	30	600	70	3,5	400	1,5

Теоретический материал и примеры расчета приведены в [1; 3].

### Методические указания к задаче № 2

Для расчета нелинейных цепей переменного тока могут быть использованы следующие основные методы:

1. *Графические.* Все необходимые построения и расчеты производятся на основе графиков, связывающих между собой различные параметры как всей цепи, так и отдельных её элементов [1];

2. *Аналитические.* В этом случае характеристики, связывающие между собой различные параметры элементов, с той или иной степенью приближения выражаются аналитически [1].

Применение аналитического метода расчета цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником, а также методика определения коэффициента "а" аппроксимирующего выражения (1) пояснены приведенным ниже примером.

**Пример.** Необходимо рассчитать цепь, схема которой приведена на рис. 3. Значения параметров элементов цепи сведены в табл. 8.

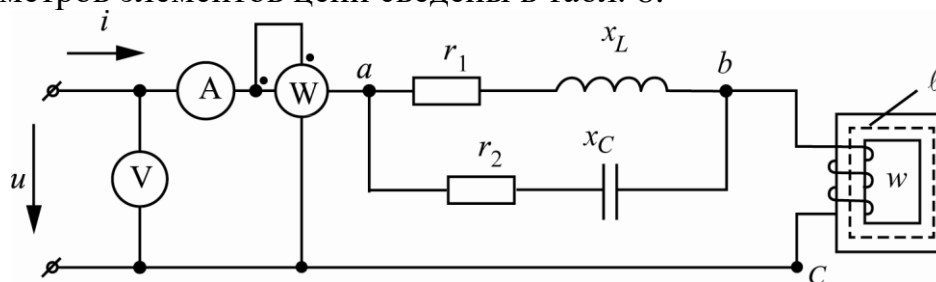


Рис. 3

Исходные данные для рассматриваемого примера

$r$ , Ом	$x_L$ , Ом	$x_C$ , Ом	Число витков $w$	$l$ , см	$S$ , см <sup>2</sup>	$f$ , Гц	$B_m$ , Тл
20	300	100	700	50	6	50	1,2

Магнитная индукция в сердечнике изменяется по синусоидальному закону. Так как в задаче не учитываются явления гистерезиса, рассеяния и вихревые токи, то кривая намагничивания, заданная табл. 6, симметрична относительно начала координат.

### 1. Определение коэффициента "а" аппроксимирующего выражения

$$\dot{I} = a\hat{A}^3$$

Необходимо найти коэффициента "а", при котором кривая  $\dot{I} = a\hat{A}^3$ , проходит как можно ближе к кривой намагничивания, заданной табл. 6. Для определения этого коэффициента используется метод наименьших квадратов, т.е. сумма квадратов отклонений точек заданной кривой намагничивания от искомой кривой будет наименьшей. Таким образом, решение сводится к нахождению экстремума функции.

Обозначим сумму квадратов отклонений аппроксимирующего выражения от заданного через  $S$ , тогда

$$S = \sum_{i=1}^n (aB_i^3 - H_i)^2,$$

где  $n$  – число отсчетов табл. 6 ( $n = 14$ );

$i$  – номер отсчета;

$B_i$ ,  $\dot{I}_i$  – соответствующие номеру отсчета значения индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$  в табл. 6.

Найдем частную производную по  $a$ :

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [(aB_i^3 - H_i) B_i^3].$$

Приравняем ее к нулю:  $\frac{\partial S}{\partial a} = 0$ . Тогда:  $\sum_{i=1}^n [(aB_i^3 - H_i) B_i^3] = 0$ .

$$\text{Откуда } a = \frac{\sum_{i=1}^n H_i B_i^3}{\sum_{i=1}^n B_i^6}. \quad (2)$$

Подставляя в соотношение (2) соответствующие значения  $B_i$  и  $\hat{I}_i$  из табл.6 и считая  $n = 14$ , получим  $\hat{a} = 472$ .

Таким образом, аппроксимирующее выражение для рассматриваемого примера имеет вид:

$$\hat{I} = 472 \hat{A}^3. \quad (3)$$

Коэффициент "a" – величина размерная, но мы будем использовать её численное значение, не указывая размерность, а величины  $B$  и  $H$  выразить в системе СИ, т.е.  $B$  – в Тл,  $H$  – в А/м.

## 2. Определение законов изменения напряжения и тока источника

Магнитная индукция  $\hat{A}$  в сердечнике изменяется по синусоидальному закону

$$\hat{A} = \hat{A}_m \sin \omega t = 1,2 \sin \omega t \quad (\text{Тл}),$$

где  $\omega = 2\pi f = 314$  (рад/с).

Напряжение на катушке  $u_{\hat{e}}$  (между точками  $b$  и  $c$  схемы рис. 3) также изменяется по синусоидальному закону, но опережает магнитный поток (и, следовательно, магнитную индукцию) на  $90^\circ$ , поэтому

$$u_{\hat{e}} = U_{\hat{e}m} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (\text{В}),$$

где  $U_{km}$  – амплитуда напряжения на катушке.

Действующее значение напряжения на катушке определим по формуле, связывающей между собой параметры устройства и его габариты:

$$U_{\hat{e}} = 4,44 \cdot w \cdot f \cdot S \cdot \hat{A}_m = 4,44 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 = 112 \quad (\text{В}),$$

где  $w$  – число витков катушки;

$f$  – частота изменения индукции в сердечнике, Гц;

$S$  – площадь поперечного сечения сердечника, м<sup>2</sup>;

$B_m$  – амплитуда магнитной индукции в сердечнике, Тл.

Амплитудное значение напряжения на катушке, В

$$U_{\hat{e}m} = \sqrt{2} \cdot U_{\hat{e}} = 1,41 \cdot 112 = 158 \quad (\text{В}).$$

Тогда закон изменения напряжения на катушке:

$$u_{\hat{e}} = 158 \sin(\omega t + 90^\circ) (\hat{A}) \quad (4)$$



Мгновенное значение тока катушки находим на основе закона полного тока  $i\omega = \dot{I} \ell$ , откуда

$$i = \frac{H \ell}{\omega},$$

где  $\ell$  – длина средней магнитной линии в сердечнике, м;  
 $H$  – напряженность магнитного поля в сердечнике, А/м.

Используя аппроксимирующее выражение (1), получим:

$$i = \frac{aB^3 \ell}{\omega} = \frac{a\ell}{\omega} \cdot B_m^3 \sin^3 \omega t.$$

Известно, что

$$\sin^3 \alpha = \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{4} \sin 3\alpha.$$

Тогда:

$$i = \frac{1}{4} \cdot \frac{a\ell}{\omega} B_m^3 (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) \quad (5)$$

Из соотношения (5) видно, что в токе катушки появляется составляющая с частотой  $3\omega$ , т.е. третья гармоника. При выбранном способе аппроксимации кривой намагничивания  $B = f(H)$  амплитуда третьей гармоники тока в три раза меньше амплитуды первой (основной) гармоники (с частотой  $\omega$ ).

Подставляя в соотношение (5) данные из табл. 8 и величину коэффициента "а", получим:

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{4} \cdot \frac{472 \cdot 0,5}{700} \cdot 1,2^3 (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) = \\ &= 0,44 \sin \omega t - 0,15 \sin 3\omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Знак "–" перед третьей гармоникой указывает на то, что результирующая кривая тока имеет заостренную форму.

Для определения напряжения на участке  $ab$  рассчитаем комплекс полного сопротивления участка  $ab$  цепи рис. 3 при протекании через этот участок первой и третьей гармоники тока  $i$  в отдельности.

Для первой гармоники:

$$\underline{Z}_{ab(1)} = \frac{(r_1 + jx_L)(r_2 - jx_C)}{r_1 + jx_L + r_2 - jx_C} = \frac{(20 + j40)(20 - j60)}{20 + j40 + 20 - j60} =$$

$$= \frac{44,7 \hat{a}^{j63^\circ} \cdot 63,2 e^{-j72^\circ}}{40 - j20} = \frac{2825 e^{-j9^\circ}}{44,7 e^{-j27^\circ}} = 63 e^{j18^\circ}.$$

Для третьей гармоники:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab(3)} &= \frac{(r_1 + j3x_L)(r_2 - j\frac{x_C}{3})}{r_1 + j3x_L + r_2 - j\frac{x_C}{3}} = \frac{(20 + j3 \cdot 40)(20 - j\frac{60}{3})}{20 + j3 \cdot 40 + 20 - j\frac{60}{3}} = \\ &= \frac{(20 + j120)(20 - j20)}{20 + j120 + 20 - j20} = \frac{122 e^{j81^\circ} \cdot 28 e^{-j45^\circ}}{40 + j100} = \frac{3416 e^{j36^\circ}}{108 e^{j68^\circ}} = 32 e^{-j32^\circ}. \end{aligned}$$

Комплексные амплитуды напряжений на участке  $ab$  цепи рис. 3, соответствующих протекающим через участок  $ab$  первой и третьей гармониками тока  $i$  в отдельности, могут быть на основе закона Ома соответственно представлены:

$$\dot{U}_{mab(1)} = \dot{I}_{m(1)} \cdot \underline{Z}_{ab(1)} = 0,44 \cdot 63 \cdot e^{j18^\circ} = 28 \cdot e^{j18^\circ};$$

$$\dot{U}_{mab(3)} = \dot{I}_{m(3)} \cdot \underline{Z}_{ab(3)} = -0,15 \cdot 32 e^{-j32^\circ} = -5 e^{-j32^\circ}.$$

Поэтому для мгновенных значений напряжений участка  $ab$  первой и третьей гармоник соответственно можно записать:

$$u_{ab(1)} = 28 \sin(\omega t + 18^\circ) \text{ (В);}$$

$$u_{ab(3)} = -5 \sin(3\omega t - 32^\circ) \text{ (В).}$$

Так как участок  $ab$  рассматриваемой цепи содержит только линейные элементы, то можно записать:

$$u_{ab} = u_{ab(1)} + u_{ab(3)} = 28 \sin(\omega t + 18^\circ) - 5 \sin(3\omega t - 32^\circ) \text{ (В).}$$

На основании второго закона Кирхгофа напряжение на входе цепи

$$\begin{aligned} u = u_{\hat{e}} + u_{ab} &= 158 \sin(\omega t + 90^\circ) + 28 \sin(\omega t + 18^\circ) - \\ &- 5 \sin(3\omega t - 32^\circ) \text{ (В)}. \end{aligned}$$

Таким образом, напряжение источника содержит первую и третью гармоники. Для комплексной амплитуды первой гармоники напряжения источника можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{m(1)} &= 158\dot{a}^{j90^\circ} + 28e^{j18^\circ} = j158 + 28\cos 18^\circ + j28\sin 18^\circ = \\ &= j158 + 27 + j9 = 27 + j167 = 169e^{j81^\circ} \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)} \end{aligned}$$

Тогда в окончательном виде для мгновенного значения напряжения источника справедливо соотношение:

$$u = 169 \sin(\omega t + 81^\circ) - 5 \sin(3\omega t - 32^\circ) \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}, \quad (7)$$

где  $\omega = 2\pi f = 314 \text{ рад/с}$ .

Соотношения (6) и (7) и есть искомые соотношения для мгновенных значений тока и напряжения источника.

Далее необходимо в соответствии с заданием, используя соотношение (6), построить в системе координат первую и третью гармоники тока и суммарную кривую  $i = i(t)$ . По оси абсцисс при этом откладывается время  $t$  (с) или изменяемая часть фазы  $\omega t$  (рад.). По оси ординат откладываются в соответствующем масштабе мгновенные значения тока.

### 3. Определение показаний вольтметра, амперметра и ваттметра

Вольтметр электромагнитной системы измеряет действующее значение напряжения:

$$U = \sqrt{U_{(1)}^2 + U_{(3)}^2} = \sqrt{\frac{U_{m(1)}^2}{2} + \frac{U_{m(3)}^2}{2}} = \sqrt{\frac{169^2 + 5^2}{2}} = 120 \hat{\text{A}}.$$

Амперметр электромагнитной системы измеряет действующее значение тока:

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2} = \sqrt{\frac{I_{m(1)}^2}{2} + \frac{I_{m(3)}^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,44^2 + 0,15^2}{2}} = 0,33 \hat{\text{A}}.$$

Ваттметр электродинамической системы измеряет активную мощность, потребляемую цепью:

$$\begin{aligned} P &= P_{(1)} + P_{(3)} = U_{(1)} I_{(1)} \cos \varphi_{(1)} + U_{(3)} I_{(3)} \cos \varphi_{(3)} = \\ &= \frac{169 \cdot 0,44}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot \cos 81^\circ + \frac{5 \cdot 0,15}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot \cos(-32^\circ) = 18,0 + 0,3 = 18,3 \hat{\text{A}}\cdot\hat{\text{A}}. \end{aligned}$$

Здесь:  $\hat{D}$  – активная мощность, потребляемая цепью;

$P_{(1)}, P_{(3)}$  – активная мощность, потребляемая цепью вследствие протекания тока и действия напряжения первых и третьих гармоник соответственно;

$U_{(1)}, U_{(3)}$  – действующие значения напряжения первой и третьей гармоник соответственно;

$I_{(1)}, I_{(3)}$  – действующие значения тока первой и третьей гармоник соответственно;

$\varphi_{(1)}, \varphi_{(3)}$  – углы сдвига фаз между напряжением и током первой и третьей гармоник соответственно.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### *Основная литература*

1. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2/ К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин – СПб.: Питер, 2009 (в ЭБС «Айбукс»).

### *Дополнительная литература*

2. Климентов Н.И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические и магнитные цепи постоянного тока. Учебное пособие. – М.: РГОТУПС, 2010 (в библиот. РОАТ).
3. Серебряков А.С. Нелинейные электрические и магнитные цепи переменного тока. Конспект лекций. – М.: РГОТУПС, 2009 (в библиот. РОАТ).