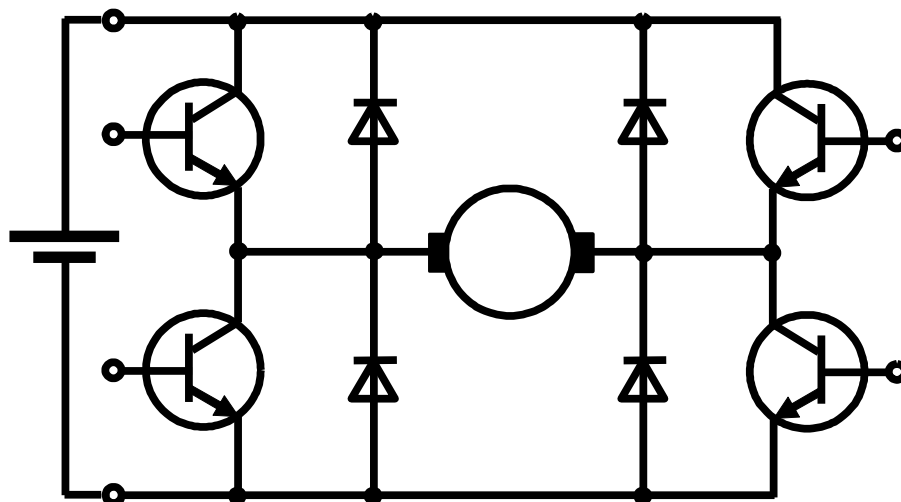


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

## **ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ**

### **ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ**

**Учебно-методическое пособие по практическим занятиям**  
**и самостоятельной работе студентов**



**Томск**  
**2023**

УДК 621.314  
ББК 32.859  
3-179

**Рецензент:**

**Коцубинский В.П.**, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУР, канд. техн. наук

**Зайченко, Татьяна Николаевна**

3-179    Электропитание электронных устройств и систем: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе студентов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2023. – 35 с.

Приводятся описания девяти практических занятий и содержание двух индивидуальных заданий дисциплин «Электропитание электронных устройств и систем», «Электропитание радиоэлектронных систем», «Устройства электропитания РЭС» и т.п.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения направлений подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Радиоэлектронные системы и комплексы», «Управление и автоматизация бортовых комплексов» и т.п.

Для студентов высших учебных заведений технических направлений подготовки.

Одобрено на заседании каф. КСУП протокол № 4 от 29.11.2023

УДК 621.314  
ББК 32.859

© Зайченко Т.Н., 2023  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1. Основные показатели источников электропитания. Подготовка к контрольной работе № 1 .....	4
Практическое занятие № 2. Расчет показателей источников электропитания. Контрольная работа № 1 .....	7
Практическое занятие № 3. Электромашинные генераторы и электрические двигатели. Семинар № 1 .....	17
Практическое занятие № 4. Магнитные элементы источников электропитания. Подготовка к контрольной работе № 2 .....	18
Практическое занятие № 5. Расчет допустимых электромагнитных нагрузок трансформатора. Контрольная работа № 2 .....	25
Практическое занятие № 6. Расчет однофазного двухобмоточного трансформатора. Защита ИЗ1 .....	27
Практическое занятие № 7. Расчет однофазного выпрямителя. Защита ИЗ2 .....	30
Практическое занятие № 8. Выпрямители и инверторы напряжения. Семинар № 2 .....	32
Практическое занятие № 9. Преобразователи постоянного напряжения и стабилизаторы. Семинар № 3 .....	34

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

### ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ. ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 1 (2 часа)

**1.1. Цель работы:** формирование навыков расчета основных показателей источников электропитания, которые понадобятся в дальнейшем при изучении теоретического материала по дисциплине

**1.2. Содержание занятия:** обсуждение методики решения задач из контрольной работы № 1.

#### 1.3. Краткие сведения из теории

Основной характеристикой источника электропитания, так же как и его отдельного функционального узла, является внешняя характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения от выходного тока:

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВЫХ}}).$$

В общем случае внешняя характеристика нелинейна (рис. 1.1). Номинальные значения напряжения  $U_{\text{НОМ}}$  и тока  $I_{\text{НОМ}}$  находятся в пределах линейного участка характеристики. Крайние точки характеристики соответствуют режимам холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ).

Изменения выходного напряжения, вызываемые колебаниями тока нагрузки, определяются **внутренним (выходным) сопротивлением** источника электропитания (функционального узла). При нелинейной внешней характеристике это сопротивление является дифференциальным и определяется в каждой рабочей точке как:

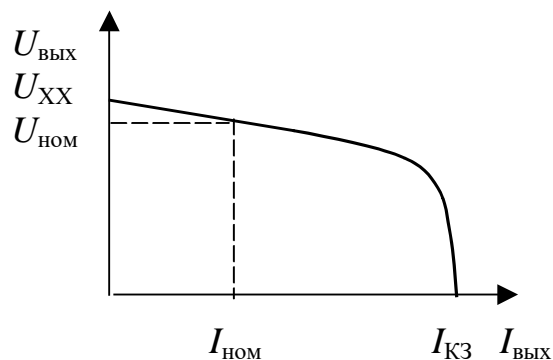


Рис. 1.1 – Внешняя характеристика

$$R_{\text{ВЫХ}} = -\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Основными энергетическими показателями источников электропитания и их функциональных узлов является *коэффициент полезного действия* (КПД):

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} 100\% = \frac{P_{\text{ВХ}} - \Delta P}{P_{\text{ВХ}}} 100\% = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} + \Delta P} 100\% ,$$

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  – выходная мощность, отдаваемая в нагрузку;  $P_{\text{ВХ}}$  – входная потребляемая мощность;  $\Delta P$  – потери мощности.

Основными параметрами функциональных узлов источника электропитания являются интегральные величины – действующие и средние значения.

Действующим (эффективным) значением периодической функции  $x(t)$  (напряжения, тока, индукции и т.д.) называется среднеквадратическое значение этой функции за период  $T$ :

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T x^2(t) dt} .$$

Среднее значение периодической функции  $x(t)$  равно:

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T/2} \int_{T/2} x(t) dt, \text{ если } x(t) \text{ – переменная (двунаправленная)}$$

функция;

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt, \text{ если } x(t) \text{ – постоянная (однонаправленная).}$$

Для упрощения интегрирования для функций вида  $x(\omega t)$  осуществляется переход к функции  $x(\nu)$ , где  $\nu = \omega t$ , тогда:

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi} x(\nu) d\nu, \text{ если } x(\nu) \text{ – переменная (двунаправленная)}$$

функция;

$$X_{\text{cp}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(\nu) d\nu, \text{ если } x(\nu) - \text{постоянная (однонаправленная)}.$$

Отношение действующего и среднего значений представляет собой коэффициент формы  $k_{\phi}$ :

$$k_{\phi} = \frac{X}{X_{\text{cp}}}.$$

При передаче электроэнергии на большие расстояния используется переменный ток. Мощность в трехфазной системе переменного тока

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}UI \cos \phi \text{ [Вт]},$$

где  $\cos \phi$  – коэффициент мощности.

Отсюда ток  $I$ , передаваемый по линии

$$I = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3}UI \cos \phi}.$$

Потери мощности  $\Delta P$  в линии с общим активным сопротивлением  $R_{\text{л}}$

$$\Delta P = I^2 R_{\text{л}} \text{ [Вт]}.$$

Потери электроэнергии за  $t$  часов работы  $\Delta W$

$$\Delta W = \Delta P t \text{ [Вт}\cdot\text{ч]}.$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1 (2 часа)

**2.1. Цель работы:** закрепление навыков расчета основных показателей источников электропитания, которые понадобятся в дальнейшем при изучении теоретического материала по дисциплине

**2.2. Содержание занятия:** решение задач.

**Задача 1.** Дана внешняя характеристика источника электропитания.

1. Определить напряжение холостого хода источника электропитания.

2. Рассчитать внутреннее сопротивление источника электропитания на линейном участке характеристики, соответствующем работе источника в режиме источника напряжения.

3. Рассчитать (**не определять по графику**) с использованием законов Ома и Кирхгофа сопротивления потребителя при токах  $I_1$  и  $I_2$ .

4. Рассчитать (**не определять по графику**) изменение напряжения на нагрузке (в процентах от номинального) при изменении тока нагрузки в пределах  $\pm\Delta_I$  от номинального.

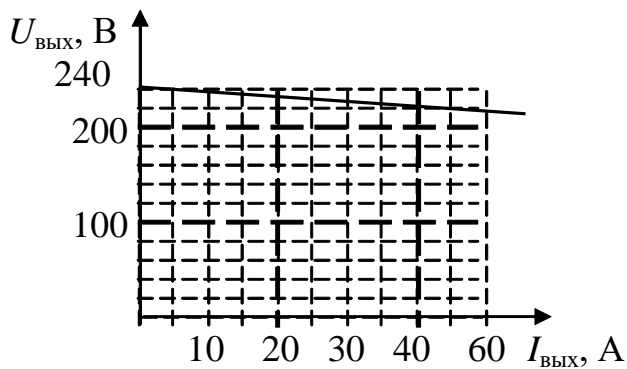
В качестве номинального тока принять ток в середине линейного участка внешней характеристики.

5. Рассчитать коэффициент полезного действия источника электропитания в номинальном режиме.

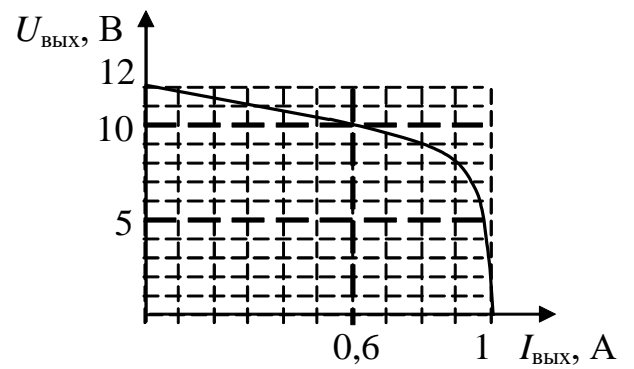
Исходные данные выбрать в соответствии с вариантом из таблицы.

### Исходные данные для задачи 1

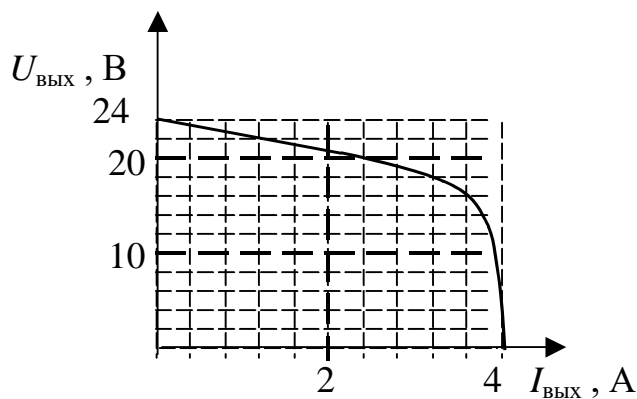
№ варианта	$I_1, A$	$I_2, A$	$\Delta I, \%$
<b>1</b>	20	40	5
<b>2</b>	0,2	0,5	10
<b>3</b>	1	2	15
<b>4</b>	5	15	20
<b>5</b>	2	4	5
<b>6</b>	3	7	10
<b>7</b>	3	11	15
<b>8</b>	0,2	0,4	20
<b>9</b>	2	4	5
<b>10</b>	10	30	10



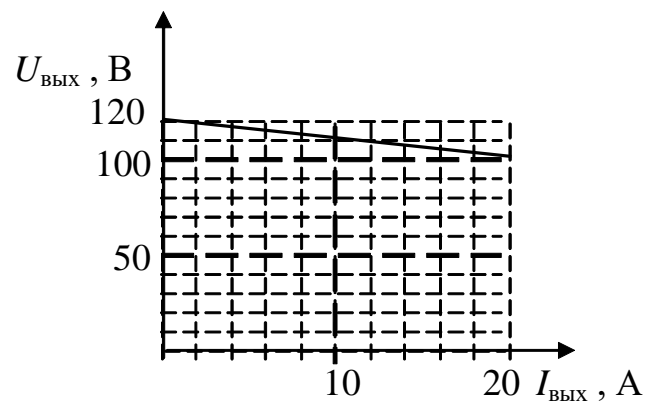
Вариант 1



Вариант 2



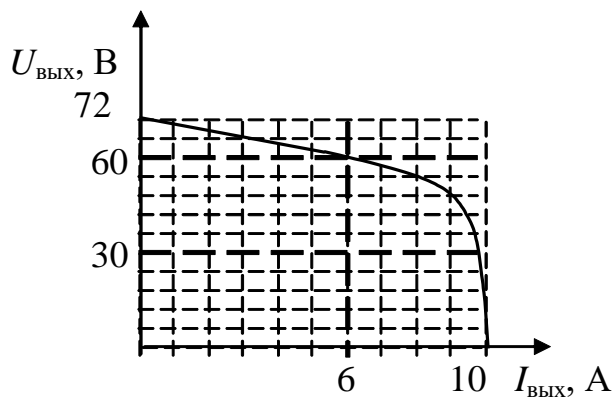
Вариант 3



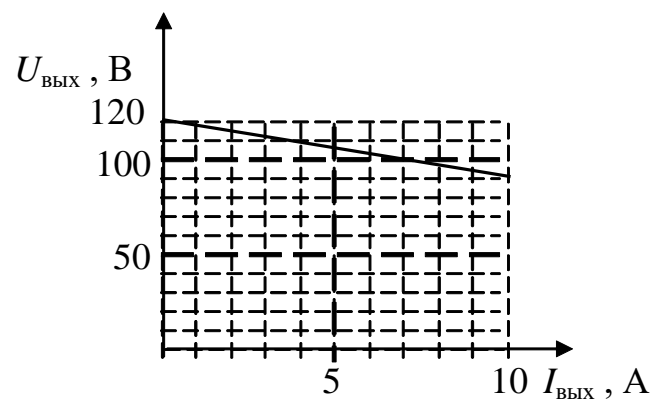
Вариант 4

Рис. 2.2. Внешние характеристики источника электропитания

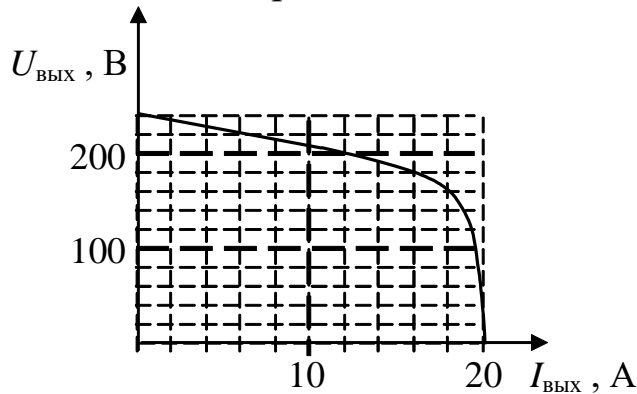




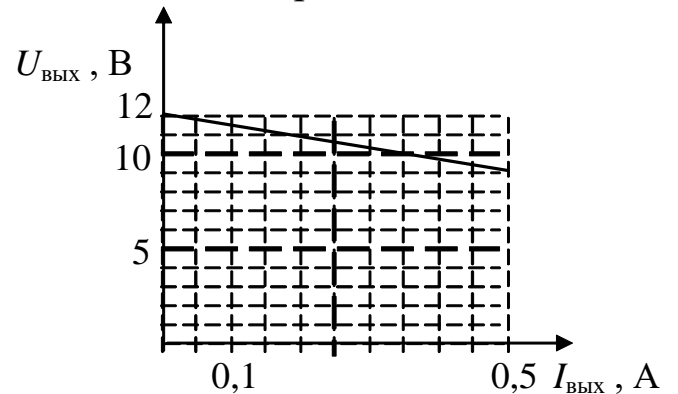
Вариант 5



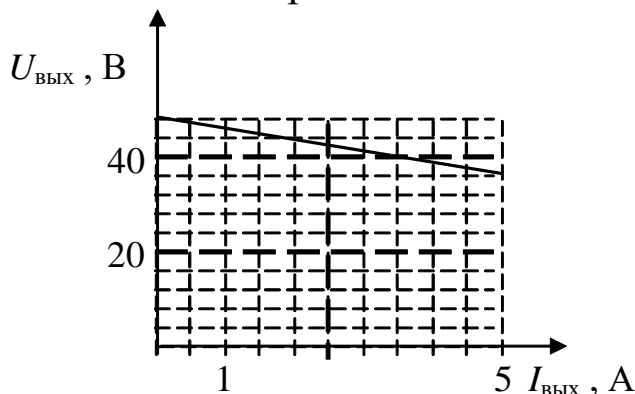
Вариант 6



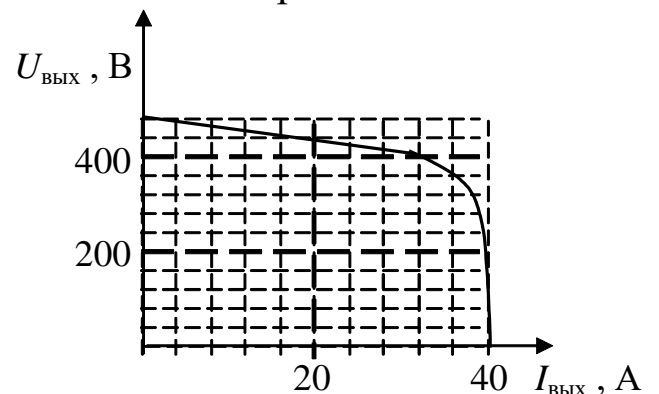
Вариант 7



Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10

Рис. 2.2 (продолжение). Внешние характеристики источника электропитания

**Задача 2.** При номинальном токе нагрузки  $I_H$  номинальное напряжение на нагрузке составляет  $U_H$ . Внутреннее сопротивление источника напряжения постоянно и равно  $R_{вн}$ .

Определить напряжение холостого хода и ток короткого замыкания источника электропитания.

Исходные данные выбрать в соответствии с вариантом из таблицы.

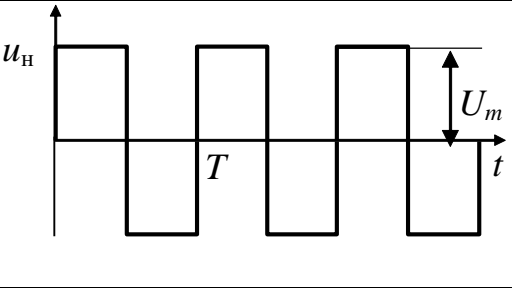
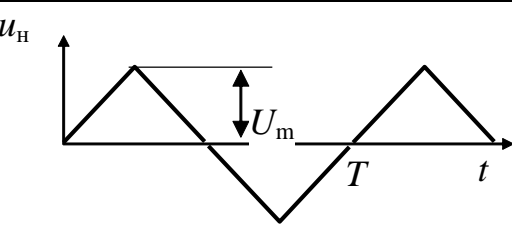
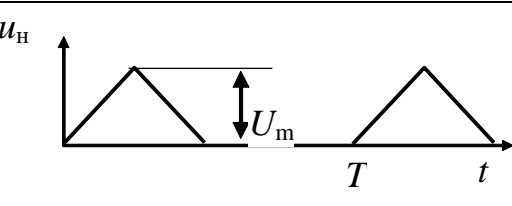
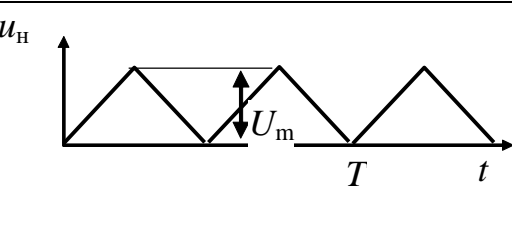
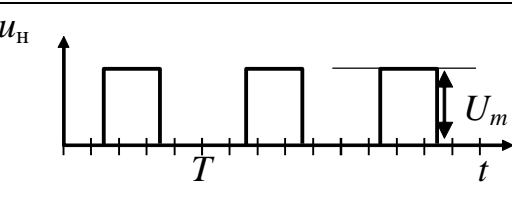
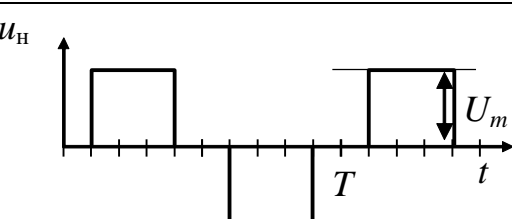
### Исходные данные для задачи 2

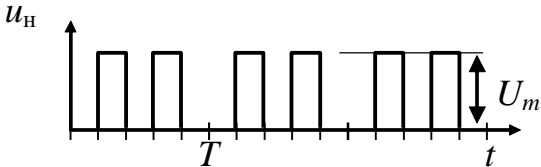
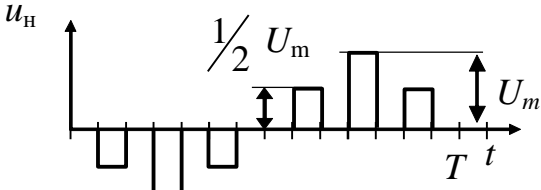
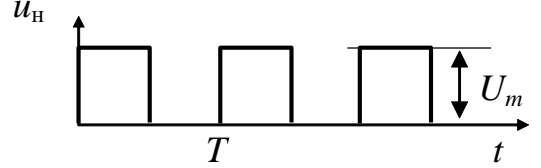
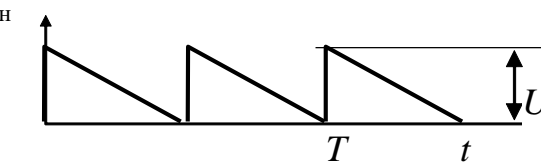
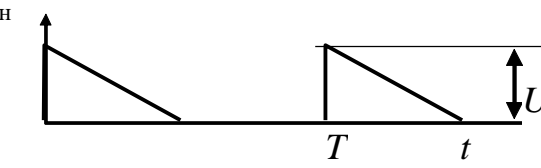
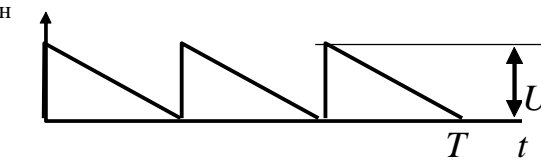
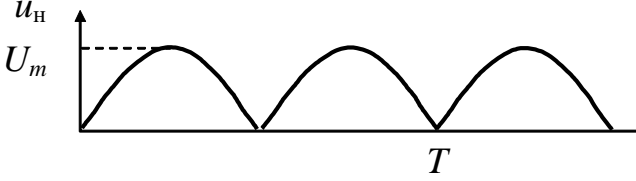
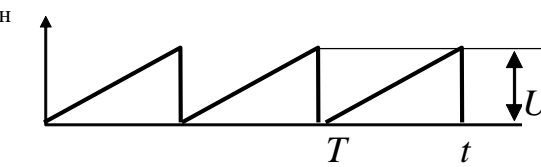
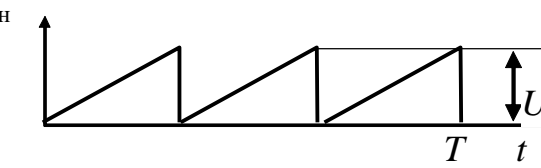
№ варианта	$I_H, A$	$U_H, B$	$R_{BH}, Ом$
<b>1</b>	1	9	5
<b>2</b>	2	12	4
<b>3</b>	3	48	3
<b>4</b>	4	100	2
<b>5</b>	5	120	1
<b>6</b>	6	160	8
<b>7</b>	7	200	7
<b>8</b>	8	220	6
<b>9</b>	9	380	5
<b>10</b>	10	400	4
<b>11</b>	11	48	3
<b>12</b>	12	100	2
<b>13</b>	13	120	1
<b>14</b>	14	160	1
<b>15</b>	15	200	2
<b>16</b>	16	220	3
<b>17</b>	17	380	4
<b>18</b>	18	400	5
<b>19</b>	19	48	1
<b>20</b>	20	100	2
<b>21</b>	21	120	3
<b>22</b>	22	160	4
<b>23</b>	23	200	5
<b>24</b>	24	220	6
<b>25</b>	25	380	7

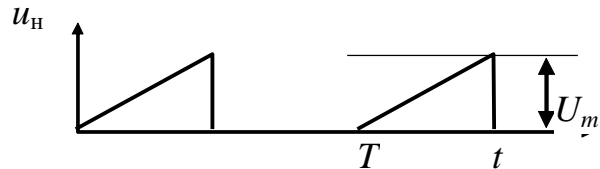
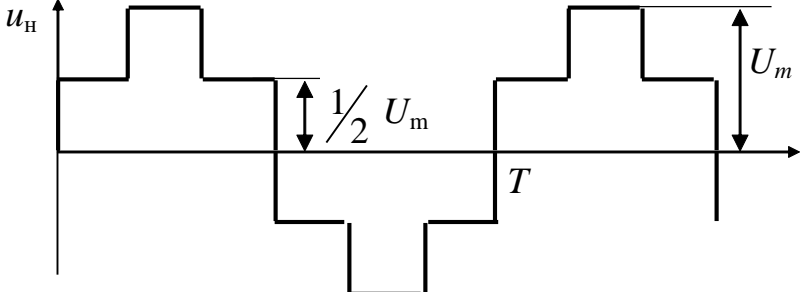
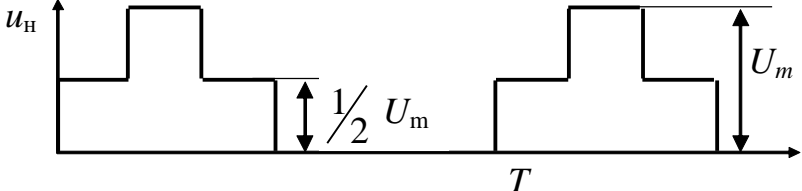
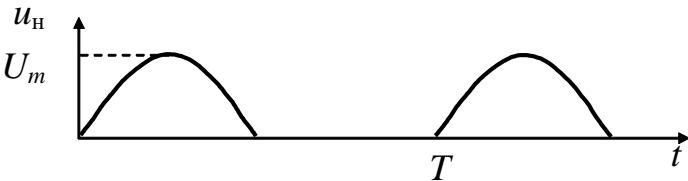
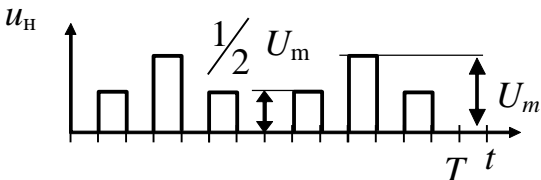
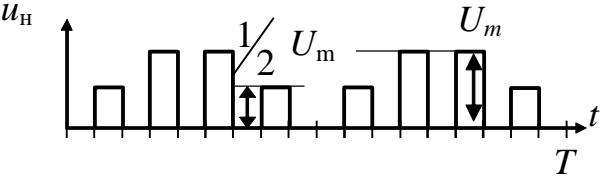
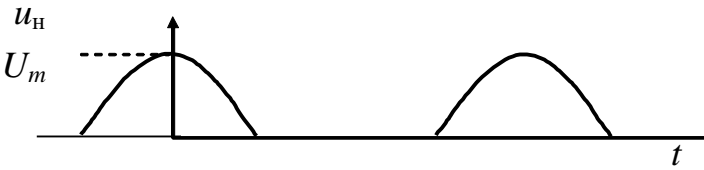
**Задача 3.** Определить среднее и действующее значения напряжения и коэффициент формы.

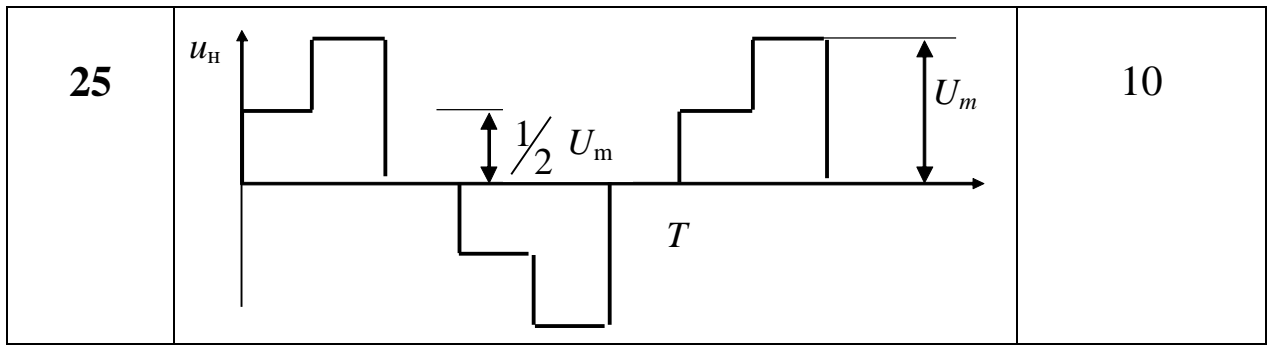
Для всех вариантов принять частоту напряжения равной 50 Гц.

Исходные данные для задачи 3

№ варианта	Временная диаграмма напряжения	Амплитуда напряжения $U_m$
1	$u(t) = U_m \sin(\omega t)$	5
2	 <p>A square wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of rectangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	10
3	 <p>A triangular wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of triangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	20
4	 <p>A triangular wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of triangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	50
5	 <p>A triangular wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of triangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	100
6	$u(t) = U_m \cos(\omega t)$	1
7	 <p>A pulse-width modulated square wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of rectangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	2
8	 <p>A pulse-width modulated square wave voltage diagram. The vertical axis is labeled <math>u_H</math> and the horizontal axis is labeled <math>t</math>. The waveform consists of a series of rectangular pulses. The amplitude of each pulse is <math>U_m</math>, and the period of the waveform is <math>T</math>.</p>	5

9		10
10		100
11		10
12		20
13		50
14		100
15	<p data-bbox="596 1384 957 1424" style="text-align: center;"><math>u(t) =  U_m \sin(\omega t) </math></p> 	1
16		5
17		10

18		20
19		50
20		100
21	<p data-bbox="518 947 1045 992"><math>u(t) =  U_m \sin(\omega t) </math> на <math>0,5T</math></p> 	220
22		100
23		100
24	<p data-bbox="518 1641 1045 1686"><math>u(t) =  U_m \cos(\omega t) </math> на <math>0,5T</math></p> 	50



**Примечание:**

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C;$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C; \quad \int \sin^2 x dx = \frac{x}{2} - \frac{1}{4} \sin 2x + C;$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C; \quad \int \cos^2 x dx = \frac{x}{2} + \frac{1}{4} \sin 2x + C.$$

**Задача 4.** Для электропитания цепей электронного устройства малой мощности используется один источник напряжения величиной  $U_0$  и делитель напряжения на два значения.

Необходимо: предложить схему и определить параметры делителя напряжения.

Исходные данные для задачи 4

Вариант	$U_0, \text{ В}$	Потребитель А		Потребитель В		Потребитель С	
		$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$
1	<b>3</b>	<b>3</b>	1	<b>2,5</b>	2	<b>2</b>	3
2	<b>5</b>	<b>5</b>	2	<b>2</b>	3	<b>4</b>	4
3	<b>6</b>	<b>6</b>	3	<b>4</b>	4	<b>3</b>	5
4	<b>9</b>	<b>9</b>	4	<b>5</b>	5	<b>8</b>	6
5	<b>10</b>	<b>10</b>	5	<b>4</b>	6	<b>9</b>	7
6	<b>12</b>	<b>12</b>	6	<b>6</b>	7	<b>10</b>	8
7	<b>15</b>	<b>15</b>	7	<b>10</b>	8	<b>6</b>	9
8	<b>20</b>	<b>20</b>	8	<b>18</b>	9	<b>10</b>	10
9	<b>24</b>	<b>24</b>	9	<b>10</b>	10	<b>20</b>	11
10	<b>30</b>	<b>30</b>	10	<b>20</b>	11	<b>25</b>	12
11	<b>36</b>	<b>36</b>	11	<b>6</b>	12	<b>35</b>	13
12	<b>40</b>	<b>40</b>	12	<b>30</b>	13	<b>20</b>	14
13	<b>48</b>	<b>48</b>	13	<b>44</b>	14	<b>8</b>	15
14	<b>50</b>	<b>50</b>	14	<b>40</b>	15	<b>20</b>	16

15	<b>60</b>	<b>60</b>	15	<b>50</b>	16	<b>25</b>	17
16	<b>70</b>	<b>70</b>	16	<b>6</b>	17	<b>66</b>	18
17	<b>72</b>	<b>72</b>	17	<b>6</b>	18	<b>70</b>	19
18	<b>80</b>	<b>80</b>	18	<b>8</b>	19	<b>70</b>	20
19	<b>90</b>	<b>90</b>	19	<b>9</b>	20	<b>80</b>	21
20	<b>100</b>	<b>100</b>	20	<b>72</b>	21	<b>50</b>	22
21	<b>3</b>	<b>3</b>	21	<b>1</b>	22	<b>2,5</b>	23
22	<b>5</b>	<b>5</b>	22	<b>4</b>	23	<b>3</b>	24
23	<b>6</b>	<b>6</b>	23	<b>5</b>	24	<b>2</b>	25
24	<b>9</b>	<b>9</b>	24	<b>8</b>	25	<b>3</b>	1
25	<b>10</b>	<b>10</b>	25	<b>3</b>	1	<b>9</b>	2

**Задача 5.** Электроэнергия мощностью  $P_{3\phi}$  передается в трехфазной системе переменного тока по линиям с общим активным сопротивлением  $R_{л}$  при коэффициенте мощности  $\cos \Phi$  и напряжениях  $U_1$  и  $U_2$ .

Необходимо определить:

1. Ток в линиях при  $U_1$  и  $U_2$ .
2. Потери мощности в линиях при  $U_1$  и  $U_2$ .
3. Падение напряжения на проводах линии.
4. Напряжение на конце линии.
5. Потери электроэнергии за 1 час работы линии.
6. На сколько изменятся потери мощности и электроэнергии в линиях при увеличении напряжения.

**Таблица исходных данных для задачи 5**

Вариант	$P_{3\phi}$ , МВт	$R_{л}$ , Ом	$\cos \Phi$	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ
<b>1</b>	1	0,5	0,65	1	100
<b>2</b>	2	0,5	0,7	2	110
<b>3</b>	3	0,5	0,75	3	120
<b>4</b>	4	0,5	0,8	4	130
<b>5</b>	5	0,5	0,65	5	140
<b>6</b>	6	1	0,7	6	150
<b>7</b>	7	1	0,75	7	160
<b>8</b>	8	1	0,8	8	170
<b>9</b>	9	1	0,65	9	190
<b>10</b>	10	1	0,7	10	230

### Максимальный рейтинг задач

Номер задачи	Максимальное количество баллов
1	4
2	1
3	3
4 или 5 по выбору студента	2
Итого	10



## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3**

### **ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ. СЕМИНАР № 1**

**3.1. Цель работы:** формирование знаний по электромашинным генераторам как основным источникам первичного электропитания.

**3.2. Содержание занятия:** опрос по теме.

#### **3.4. Контрольные вопросы**

1. Общие вопросы электрических машин – принципы действия, конструктивное исполнение, классификация, применение электрических машин в устройствах связи и системах электропитания.

2. Условные графические обозначения электрических машин на схемах электрических принципиальных и схемах энергоснабжения.

3. Электромашинный генератор постоянного тока: принцип действия, паспортные данные, схемы включения (с независимым возбуждением и самовозбуждением), основные эксплуатационные (рабочие) характеристики; вид рабочих характеристик для различных схем включения и методика их снятия.

4. Электромашинные генераторы переменного тока с подвижным якорем: конструктивное исполнение, принцип действия, достоинства и недостатки.

5. Электромашинные генераторы переменного тока с неподвижным якорем: конструктивное исполнение, принципы действия трехфазных генераторов, схемы включения, основные эксплуатационные характеристики.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

### МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ. ПОДГОТОВКА К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 2 (2 часа)

**4.1. Цель работы.** Изучение конструктивного исполнения электромагнитных элементов, основных расчетных соотношений для геометрических показателей и электромагнитных величин, методики расчета допустимых электромагнитных нагрузок. Анализ зависимости габаритной мощности от частоты питающего напряжения.

#### 4.2. Содержание занятия:

Решение п.1 контрольной работы № 2 из практического занятия № 5.

#### 4.3. Краткие сведения из теории

В источниках вторичного электропитания используются три основных типа конструкций ЭМЭ: бронева (БК), стержневая (СК) (рис. 4.1) и тороидальная (ТК) (рис. 4.2), каждая из которых реализуется на определенном типе и количестве ферромагнитных сердечников (ФМС).

Линейными размерами сердечника являются его ширина  $a_c$ , толщина  $b_c$ , высота окна  $h$  и ширина окна  $c$  (см. рис. 4.1, рис. 4.2).

В состав формул для расчета электромагнитных величин ЭМЭ входят геометрические показатели магнитопровода ЭМЭ, к которым относятся:

- линейные размеры магнитопровода – ширина  $a$ , толщина  $b$ , высота окна  $h$  и ширина окна  $c$ ;
- длина средней силовой линии  $L_c$ ;
- площади сечений магнитопровода  $S_c$  и его окна  $S_{ок}$ ;
- площадь поверхности охлаждения  $\Pi_{oc}$  и объем  $V_c$ .

При этом ширина и толщина магнитопровода определяются размерами той части магнитопровода, где расположена катушка и замыкается основной магнитный поток ЭМЭ. У элементов ТК параметр высота окна отсутствует. Например, в случае двух сердечников ширина и толщина магнитопровода будут равны:

- $a = 2a_c, b = b_c$  для ЭМЭ броневых типа;
- $a = a_c; b = 2b_c$  для ЭМЭ стержневого типа.

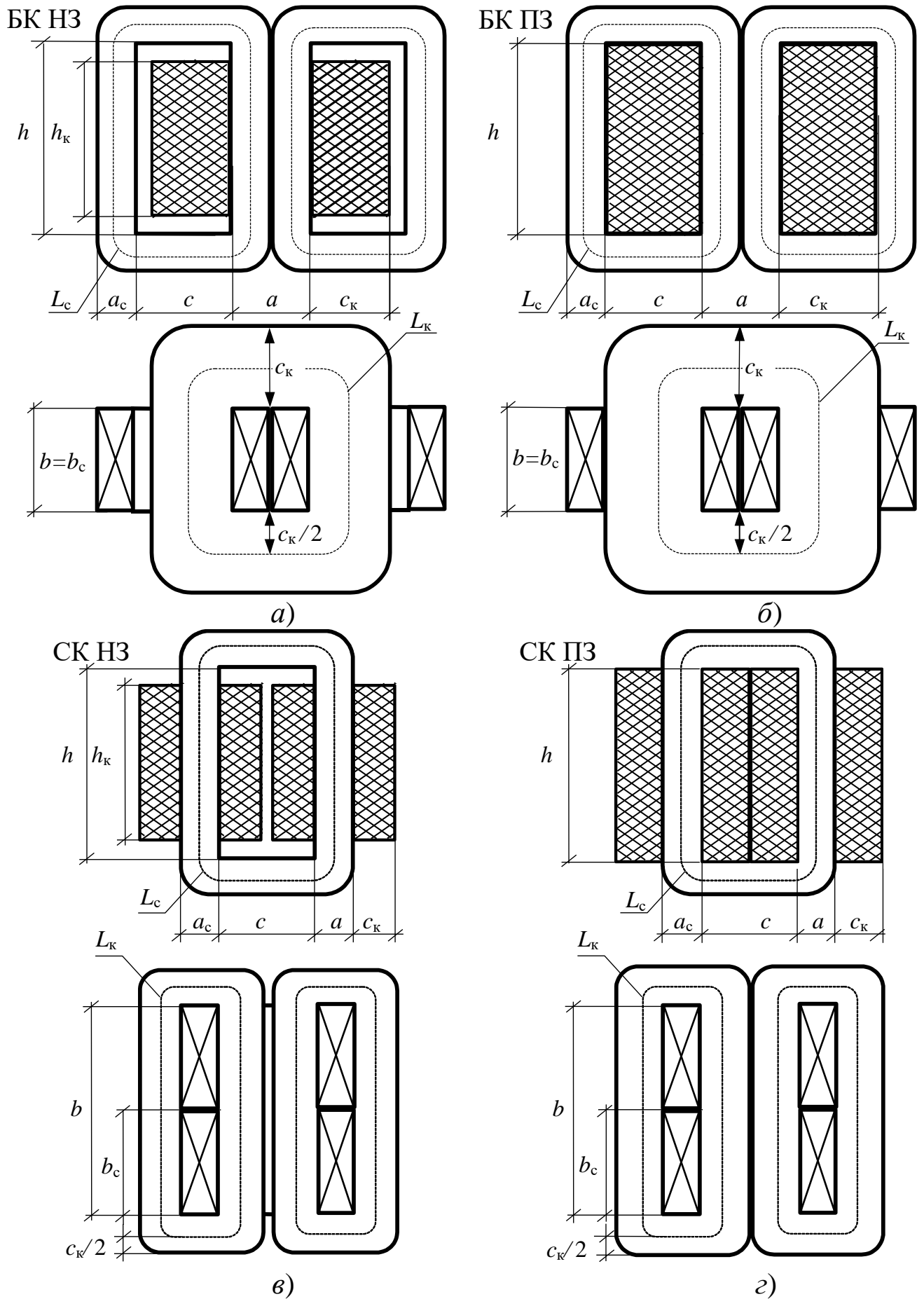


Рис. 4.1 – Броневая (а), (б) и стержневая (в), (г) конструкции ЭМЭ

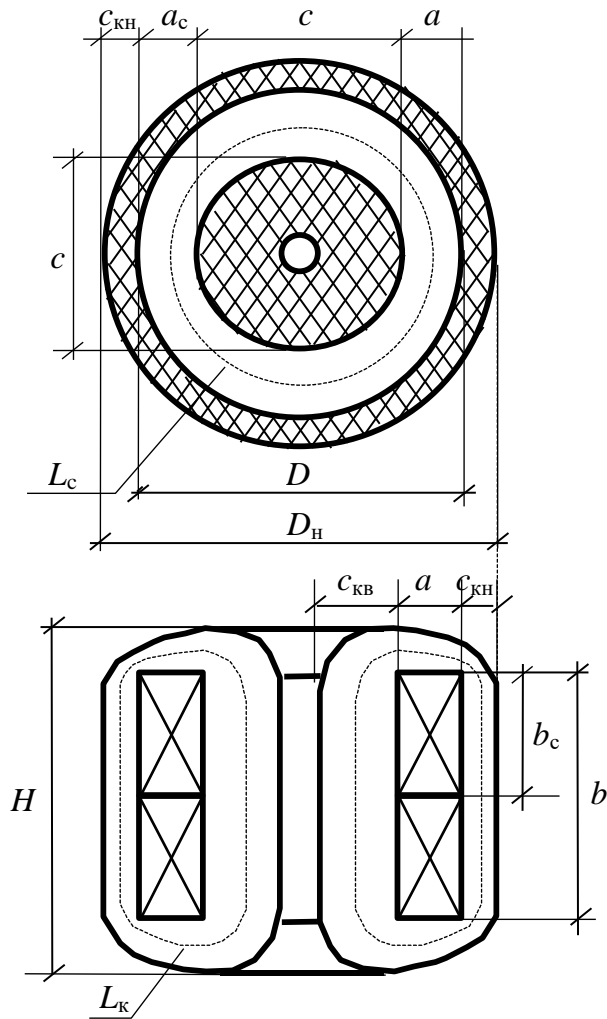


Рис. 4.2 – Торoidalная конструкция ЭМЭ

Геометрическими показателями катушек являются связанные с параметрами магнитопровода:

- ширина  $c_k$  и высота  $h_k$  катушки;
- средняя длина витка катушки  $L_k$ ;
- площадь поверхности охлаждения катушек  $\Pi_{ок}$ ;
- объем катушек  $V_k$ .

Инженерные методики проектирования ЭМЭ базируются на следующих расчетных соотношениях, связанных с геометрическими показателями ЭМЭ.

### 1. Габаритная мощность ЭМЭ:

$$P_{\Gamma} = 4k_{\phi}n_0K_{зс}K_{зк}S_cS_kjB_{mf}, \quad (4.1)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент формы напряжения;  $n_0$  – коэффициент, показывающий какую часть окна магнитопровода занимает первичная обмотка ( $n_0 = 0,5$  для трансформатора;  $n_0 = 1$  для дросселя);  $K_{зс}$  – коэффициент заполнения сердечника;  $K_{зк}$  – коэффициент заполнения катушек (площади сечения катушек) обмоточным материалом;  $S_c, S_k$  – площади сечения магнитопровода и катушки;  $j$  – плотность тока;  $B_m, f$  – рабочие индукция и частота.

## 2. Потери мощности в магнитопроводе (сердечнике):

$$\Delta P_c = G_c \rho_{c0} \left( \frac{B_m}{B_0} \right)^\alpha \left( \frac{f}{f_0} \right)^\gamma, \quad (4.2)$$

где  $G_c$  – масса магнитопровода;  $\rho_{c0}$  – удельные потери мощности в магнитопроводе при индукции  $B_0$  и частоте  $f_0$ ;  $\alpha$  – коэффициент влияния индукции на потери ( $\alpha = 1,3 \dots 2,6$ ; среднерасчетное  $\alpha = 2$ );  $\gamma$  – коэффициент влияния частоты на потери ( $\gamma = 1,1 \dots 1,6$ ; среднерасчетное  $\gamma = 1,5$ ).

Массы магнитопровода и катушек равны:

$$G_c = V_c g_c K_{зс}; \quad G_k = V_k g_k K_{зк},$$

где  $g_c, g_k$  – плотность (удельный вес) сердечника и обмоточного материала (катушек).

## 3. Потери мощности в катушках:

$$\Delta P_k = j^2 \rho_k V_k K_{зк}, \quad (4.3)$$

где  $\rho_k$  – удельное сопротивление;  $V_k$  – объем катушек.

Потери мощности в катушках:

$$\Delta P_k = \tau \sigma \Pi_{ок} B, \quad (4.4)$$

где  $\tau$  – перегрев;  $\sigma$  – коэффициент теплоотдачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  ( $\sigma = 10$  для естественного охлаждения;  $\sigma = 30$  для принудительного охлаждения);  $\Pi_{\text{ок}}$  – площадь поверхности охлаждения катушек;

$$\begin{aligned}
 B &= \left( 1 + \beta \sqrt{\frac{\nu + 0,6}{1 + 0,2 \beta \nu}} \right); \\
 \beta &= \frac{\Pi_{\text{ос}}}{\Pi_{\text{ок}}}; \\
 \nu &= \frac{\Delta P_{\text{с}}}{\Delta P_{\text{к}}};
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

где  $\nu$  – соотношение потерь мощности в магнитопроводе и катушках ( $\nu = 1 \dots 1,1$  для стержневой и броневой конструкций;  $\nu = 0,8$  для тороидальной);  $\Pi_{\text{ос}}$  – площадь поверхности охлаждения магнитопровода.

#### 4. Фактический перегрев

$$\tau_{\text{ф}} = \frac{\Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{к}}}{\sigma \Pi_{\text{ок}} B}.
 \tag{4.6}$$

#### 5. Расчетные соотношения для геометрических показателей.

Основные расчетные соотношения для геометрических показателей магнитопровода и катушек приведены в табл. 4.1.

Размеры катушек (ширина  $c_{\text{к}}$  и высота  $h_{\text{к}}$ ) связаны с размерами окна магнитопровода (шириной  $c$  и высотой  $h$ ):

$$c_{\text{к}} = n_{\text{с}} c, \quad h_{\text{к}} = n_{\text{h}} h,$$

где  $n_{\text{с}}$ ,  $n_{\text{h}}$  – коэффициенты, которые в инженерных расчетах определяются по табл. 4.2.

Таблица 4.1

Основные геометрические показатели  
магнитопровода и катушек ЭМЭ

Показатель	Броневая конструкция	Стержневая конструкция	Тороидальная конструкция
Показатели магнитопровода			
Площадь сечения магнитопровода	$S_c = a b$		
Площадь сечения окна	$S_{ок} = c h$		$S_{ок} = \frac{\pi c^2}{4}$
Усредненная длина силовой линии	$L_c = 2h + 2c + \pi a / 2$	$L_c = 2h + 2c + \pi a$	$L_c = \pi (a + c)$
Объем	$V_c = L_c S_c$		
Площадь поверхности охлаждения	$\Pi_{окНЗ} =$ $= 4\left(\frac{a}{2} + b\right)(L_c - h_k);$ $\Pi_{окПЗ} =$ $= 2(a+b)(L_c - h)$	$\Pi_{окНЗ} =$ $= 2(a+b)(L_c - 2h_k);$ $\Pi_{окПЗ} =$ $= 2\left(a + \frac{b}{2}\right)(L_c - 2h)$	0
Показатели катушек			
Средняя длина витка	$L_k = 2a + 2b + 2\pi \frac{c_k}{2}$		
Площадь сечения	$S_k = 2c_k h_k$		$S_k = c_k L_k$
Объем	$V_k = S_k L_k$	$V_k = S_k L_k$	$V_k = S_k L_c$
Площадь поверхности охлаждения	$\Pi_{окНЗ} =$ $= (2c_k + h_k) L_k;$ $\Pi_{окПЗ} =$ $= (2c + h)(L_k - 2b)$	$\Pi_{окНЗ} =$ $= 2(2c_k + h_k) L_k;$ $\Pi_{окПЗ} =$ $= 2(c + h)(L_k - b)$	$\Pi_{ок} = 2 \frac{\pi D_i^2}{4} + \pi D_H H,$ где $D_H = c + 2a + 2c_{кН};$ $H = b + 2c_{кВ};$ $c_{кВ} = 0,3 c; c_{кН} = 0,1 c$

Примечание. В таблице приняты обозначения линейных размеров магнитопровода:  $a$  – ширина,  $b$  – толщина,  $h$  – высота окна;  $c$  – ширина окна.

Таблица 4.2

Значения коэффициентов  $n_c$ ,  $n_h$ 

Тип конструкции	$n_c$		$n_h$	
	НЗ	ПЗ	НЗ	ПЗ
Броневая	0,8	1	0,8	1
Стержневая	0,4	0,5	0,8	1
Тороидальная	–	0,2	–	

Примечание: НЗ – неполное заполнение; ПЗ – полное заполнение.

**Методика определения допустимых электромагнитных нагрузок**, используемая при выполнении контрольной работы, состоит из следующих этапов:

1. Расчет геометрических показателей магнитопровода и катушек (см. табл. 4.1, 4.2); расчет массы.

2. Расчет допустимых потерь мощности в катушках (4.4) и в магнитопроводе (4.5).

3. По величине допустимых потерь мощности в катушках из (4.3) определить допустимую плотность тока. По величине допустимых потерь мощности в магнитопроводе из (4.2) определить допустимую индукцию.

Следует обратить внимание, что получившаяся величина магнитной индукции не должна быть больше индукции насыщения; если расчетное значение индукции получилось больше, чем индукция насыщения это свидетельствует об ошибке и требует проверки предыдущих расчетов.

4. Расчет максимальной входной мощности по (4.1) и перегрева.

При расчете мощности в (4.1) подставляются допустимые значения плотности тока и индукции.

#### 4.4. Литература

1. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. – 125 с.

2. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Руководство к организации самостоятельной работы для студентов специальности 210106 «Промышленная электроника». Учебное пособие / В. П. Обрусник. – Томск : ТУСУР, 2006. – 61 с.



## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

### РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК ТРАНСФОРМАТОРА. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2 (2 часа)

**5.1. Цель занятия:** закрепление навыков расчета геометрических и электромагнитных показателей электромагнитных элементов.

#### **5.2. Содержание занятия**

Выполнение контрольной работы.

#### **5.3. Задача контрольной работы**

Имеется  $n$  ферромагнитных сердечников указанного (О-образного либо тороидального) типа с размерами  $a_c$ ,  $b_c$ ,  $c$ ,  $h$ .

Технические показатели материала сердечников характеризуются параметрами:

коэффициент заполнения;

удельный вес;

удельные потери мощности при заданных индукции и частоте;

индукция насыщения.

На указанных сердечниках выполнен однофазный трансформатор (**броневой, стержневой либо тороидальный**) с обмотками из **меди** (либо **алюминия**), допускающий работу с заданным перегревом (не более 40 либо 50 градусов по Цельсию) на указанной частоте.

Обмоточный материал имеет параметры:

коэффициент заполнения;

удельный вес;

удельное сопротивление.

Дополнительные условия:

заполнение окна – полное либо неполное;

охлаждение – естественное либо воздушное.

1. Требуется определить:

1.1. Объемы, веса, поверхности охлаждения магнитопровода и катушек.

1.2. Допустимые потери мощности

1.3. Допустимые плотность тока и индукцию.

- 1.4. Максимальную входную мощность и фактический перегрев.
2. Привести эскиз трансформатора.

### **Максимальный рейтинг задачи**

Пункт задачи	Максимальное количество баллов
1.1	4
1.2	2
1.3	2
1.4	1
2	1
Итого	10

### **5.4. Литература**

1. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. – 125 с.

2. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Руководство к организации самостоятельной работы для студентов специальности 210106 «Промышленная электроника». Учебное пособие / В. П. Обрусник. – Томск : ТУСУР, 2006. – 61 с.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

### РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. ЗАЩИТА ИЗ1

(2 часа)

**6.1. Цель занятия:** защита индивидуального задания (ИЗ) ИЗ1, контроль изучения теоретического материала.

#### 6.2. Содержание ИЗ1

#### Расчет однофазного двухобмоточного трансформатора

Рассчитать двухобмоточный трансформатор с *медными* обмотками на *броневом* (стержневом или тороидальном) магнитопроводе, работающий в условиях *естественного* (либо принудительного) охлаждения.

Трансформатор должен удовлетворять критерию *минимального веса* (минимального объема, минимальной стоимости, компромиссной геометрии) на единицу входной мощности при номинальных данных.

первичное напряжение, В.....

вторичное напряжение, В.....

вторичный ток, А.....

частота сети питания, кГц.....

коэффициент мощности, не менее .....0,95

КПД, не менее .....0,95

Рассчитать массогабаритные показатели и привести чертеж трансформатора.

Примечание. В таблице исходных данных приняты обозначения:

КГ – компромиссная геометрия;

МС – минимум стоимости;

МО – минимум объема;

МВ – минимум веса.

**Таблица исходных данных к ИЗ № 1 на тему  
«Расчет однофазного трансформатора напряжения»**

Конструктивное исполнение трансформатора			Охлаждение	Параметры трансформатора				
				Первичное напряжение $U_1$ , В	Частота $f$ , Гц	Вторичное напряжение $U_2$ , В	Ток $I_2$ , А	Критерий
Броневой	Стержневой	Тороидальный						
Варианты (1, 2 ... 45)								
<b>1</b>	<b>16</b>	<b>31</b>	Принудительное	220	50	12	6	КГ
<b>2</b>	<b>17</b>	<b>32</b>	Естественное	220	400	24	4	МС
<b>3</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	Принудительное	220	1000	36	5	МО
<b>4</b>	<b>19</b>	<b>34</b>	Естественное	220	2000	48	8	МВ
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>35</b>	Принудительное	220	2500	60	5	КГ
<b>6</b>	<b>21</b>	<b>36</b>	Естественное	220	5000	100	8	МС
<b>7</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	Принудительное	220	50	320	3	МО
<b>8</b>	<b>23</b>	<b>38</b>	Естественное	220	400	500	2	МВ
<b>9</b>	<b>24</b>	<b>39</b>	Принудительное	220	50	600	1,5	КГ
<b>10</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	Естественное	220	400	800	1	МС
<b>11</b>	<b>26</b>	<b>41</b>	Принудительное	220	10 000	60	8	МО
<b>12</b>	<b>27</b>	<b>42</b>	Естественное	220	15 000	48	6	МВ
<b>13</b>	<b>28</b>	<b>43</b>	Принудительное	220	20 000	36	10	КГ
<b>14</b>	<b>29</b>	<b>44</b>	Естественное	220	25 000	60	8	МС
<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	Принудительное	220	20 000	48	10	МО

## Максимальный рейтинг ИЗ1 – 10 баллов

### 6.3. Литература

1. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Руководство к организации самостоятельной работы для студентов специальности 210106 «Промышленная электроника». Учебное пособие / В. П. Обрусник. – Томск : ТУСУР, 2012. – 61 с.

2. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2012.– 125 с.

### 6.4. Контрольные вопросы

1. Принципы построения системы электроснабжения предприятий телекоммуникаций. Способы обеспечения бесперебойной работы оборудования.

2. Источники первичного электропитания РЭС.

3. Источники вторичного электропитания. Основные структурные схемы источников вторичного электропитания РЭС.

4. Электромашинные генераторы. Пояснить принцип действия и привести основные эксплуатационные характеристики.

5. Химические источники тока РЭС – классификация, гальванические элементы и аккумуляторы, основные технические показатели и схемы соединений.

6. Электромагнитные элементы и их применение в системах электроснабжения и электропитания РЭС. Записать выражение для габаритной мощности электромагнитного элемента, пояснить входящие в него величины.

7. Обоснование целесообразности использования звена повышенной частоты в источниках вторичного электропитания РЭС.

8. Электромагнитные дроссели и их применение в источниках вторичного электропитания. Индуктивность дросселя.

9. Принцип действия трансформатора напряжения. Записать выражение для коэффициента трансформации трансформатора, связывающее напряжения, токи и число витков обмоток.

10. Основы расчета силовых трансформаторов питания РЭС.

11. Нарисовать условные графические обозначения однофазных и трехфазных трансформаторов.

12. Пояснить отличие дросселя и дросселя насыщения.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

### РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ. ЗАЩИТА ИЗ № 2 (2 часа)

**7.1. Цель занятия:** Защита ИЗ2, контроль изучения теоретического материала.

#### 7.2. Содержание ИЗ2

##### Расчет однофазного выпрямителя

Рассчитать *мостовую* (нулевую) схему выпрямления для *однофазной* сети переменного тока, работающую на фильтр, начинающийся с *емкости*.

Номинальные данные выпрямителя:

напряжение, В .....

ток, А .....

коэффициент пульсаций, % .....

Номинальные данные питающего напряжения:

напряжение, В .....

частота, Гц .....

Привести принципиальную схему и характерные временные диаграммы токов и напряжений. Построить внешнюю характеристику выпрямителя.

Рассчитать КПД.

**Максимальный рейтинг ИЗ2 – 10 баллов**

#### 7.3. Литература

1. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов. - М: Радио и связь, 1993. – 229 с.

**Таблица исходных данных к ИЗ № 2 на тему  
«Расчет однофазного выпрямителя со сглаживающим фильтром»**

Номинальные данные питающего напряжения					Номинальные данные выпрямителя			
Напряжение, В	220	220	127	127	Напряжение, В	Ток, А	Коэффициент пульсаций, %	Тип схемы
Варианты (1, 2 ... 60)								
	<b>1</b>	<b>16</b>	<b>31</b>	<b>46</b>	3	0,7	10	нулевая
	<b>2</b>	<b>17</b>	<b>32</b>	<b>47</b>	6	0,25	15	мостовая
	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	<b>48</b>	9	0,8	20	нулевая
	<b>4</b>	<b>19</b>	<b>34</b>	<b>49</b>	12	0,3	30	мостовая
	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	15	0,9	10	нулевая
	<b>6</b>	<b>21</b>	<b>36</b>	<b>51</b>	20	0,4	15	мостовая
	<b>7</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	<b>52</b>	24	1	20	нулевая
	<b>8</b>	<b>23</b>	<b>38</b>	<b>53</b>	27	0,5	30	мостовая
	<b>9</b>	<b>24</b>	<b>39</b>	<b>54</b>	30	0,6	10	нулевая
	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>55</b>	36	0,6	15	мостовая
	<b>11</b>	<b>26</b>	<b>41</b>	<b>56</b>	40	0,7	20	нулевая
	<b>12</b>	<b>27</b>	<b>42</b>	<b>57</b>	48	0,25	30	мостовая
	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>43</b>	<b>58</b>	60	0,8	10	нулевая
	<b>14</b>	<b>29</b>	<b>44</b>	<b>59</b>	72	0,5	15	мостовая
	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	80	0,9	20	нулевая

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

### ВЫПРЯМИТЕЛИ И ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ. СЕМИНАР № 2. (2 часа)

**8.1. Цель занятия:** Закрепление и контроль изучения теоретического материала.

#### **8.2. Содержание занятия**

Ответы на вопросы, поставленные преподавателем.

#### **Максимальный рейтинг занятия**

Вид работы	Максимальное количество баллов
Ответы на вопросы по темам 5 – 7 дисциплины	5 вопросов x 1 балл/вопрос = 5
Итого	<b>5</b>

#### **8.3. Контрольные вопросы**

1. Привести схему и характерные временные диаграммы однофазного мостового выпрямителя при работе на активную нагрузку.

2. Привести схему и пояснить характерные временные диаграммы однофазного выпрямителя с выводом нулевой точки при работе на активную нагрузку.

3. Привести схему и пояснить характерные временные диаграммы выпрямителя при работе на активно-индуктивную нагрузку.

4. Привести схему и пояснить характерные временные диаграммы выпрямителя при работе на активно-емкостную нагрузку.

5. Привести схему и пояснить характерные временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевой точкой при работе на активную нагрузку.

6. Привести схему и пояснить характерные временные диаграммы трехфазного выпрямителя Ларионова при работе на активную нагрузку.

7. Вывести основные расчетные соотношения, связывающие действующие значения напряжения и тока вторичной обмотки



трансформатора со средневывпрямленными значениями напряжения и тока нагрузки в одной из однофазных схем выпрямления.

8. Привести и пояснить временные диаграммы токов и напряжений выпрямителя с трансформаторным и бестрансформаторным входом.

9. Критерии выбора диодов при расчете схем выпрямления.

10. Однофазные инверторы напряжения с выходным напряжением прямоугольно-ступенчатой формы. Пояснить принцип действия и привести характерные временные диаграммы сигналов управления и выходного напряжения.

11. Однофазные инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией систем бесперебойного электропитания. Пояснить принцип действия и привести характерные временные диаграммы сигналов управления и выходного напряжения.

12. Трехфазные инверторы напряжения. Принцип действия, временная диаграмма выходного напряжения.

13. Однофазный инвертор с самовозбуждением.

#### **8.4. Литература**

1. Обрусник В.П., Шадрин Г.А. Стабилизированные источники питания радиоэлектронных средств. - Томск: Томск, гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 280 с.

2. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учеб. для вузов по спец «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.

3. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов/ А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.А. Жерненко и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.; Радио и связь, 1998 - 328 с.

4. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов. - М: Радио и связь, 1993. – 229 с.

6. Зайченко Т.Н. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств: Учебное пособие. Часть 1. Преобразователи параметров электрической энергии. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2012. – 177 с.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СТАБИЛИЗАТОРЫ. СЕМИНАР № 3. (2 часа)

**9.1. Цель занятия:** Закрепление и контроль изучения теоретического материала.

#### **9.2. Содержание занятия**

Ответы на вопросы, поставленные преподавателем.

#### **Максимальный рейтинг занятия**

Вид работы	Максимальное количество баллов
Ответы на контрольные вопросы	5 вопросов x 1 балл/вопрос = 5
Итого	<b>5</b>

#### **9.3. Список контрольных вопросов**

1. Параметрические стабилизаторы. Принцип действия. Коэффициент стабилизации стабилизатора.

2. Компенсационные стабилизаторы напряжения. Принцип действия. Перечислить преимущества компенсационных стабилизаторов по сравнению с параметрическими.

3. Импульсные стабилизаторы. Привести пример функциональной схемы системы управления регулирующим элементом импульсного стабилизатора постоянного напряжения и соединить ее с силовой частью. Представить характерные диаграммы сигналов управления, токов и напряжений силовой части.

4. Однотактный преобразователь напряжения с гальванической связью входа и выхода понижающего типа. Пояснить принцип действия и привести выражение, устанавливающее связь между входным и выходным напряжением. Представить характерные диаграммы сигналов управления, токов и напряжений силовой части.

5. Однотактный преобразователь напряжения с гальванической связью входа и выхода повышающего типа. Пояснить принцип действия и привести выражение, устанавливающее связь между входным и выходным напряжением. Представить характерные диаграм-

мы сигналов управления, токов и напряжений силовой части.

6. Однотактный преобразователь напряжения с гальванической связью входа и выхода полярно-инвертирующего типа. Пояснить принцип действия и привести выражение, устанавливающее связь между входным и выходным напряжением. Представить характерные диаграммы сигналов управления, токов и напряжений силовой части.

#### **9.4. Литература**

1. Обрусник В.П., Шадрин Г.А. Стабилизированные источники питания радиоэлектронных средств. - Томск: Томск, гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 280 с.

2. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учеб. для вузов по спец «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.

3. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов/ А.А. Бокуняев, В.М. Бушуев, А.А. Жерненко и др.; Под ред. Ю.Д. Козляева. – М.; Радио и связь, 1998 - 328 с.

4. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов. - М: Радио и связь, 1993. – 229 с.

5. Зайченко Т. Н. Электропитание и элементы электромеханики: учебное пособие для вузов. – Томск: ТМЦДО, 2001. – 247 с.

6. Зайченко Т.Н. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств: Учебное пособие. Часть 1. Преобразователи параметров электрической энергии. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2012. – 177 с.