

**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске**

**Методическое обеспечение дисциплины**

**МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

---

(НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

**Смоленск – 2020 г.**

**Методические материалы составил:**

Доцент кафедры

«Электроники и микропроцессорной техники»

канд. техн. наук, доцент

Амелина Марина Аркадьевна

ФИО

«24» июня 2020 г.

**Заведующий кафедрой «Электроники и микропроцессорной техники»:**

подпись

Якименко Игорь Владимирович

ФИО

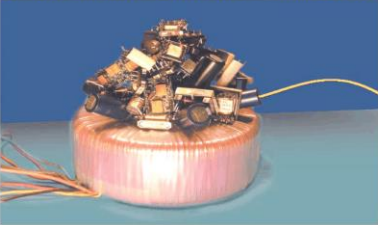



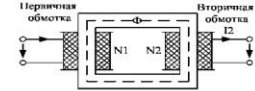
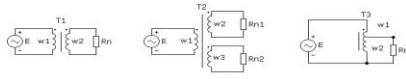
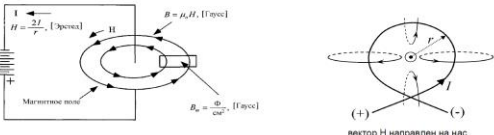
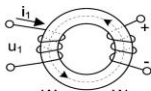


«02» июля 2020 г.

## 1. Методическое обеспечение лекций

Цель лекций – изучение понятийного аппарата, основных теоретических положений и методов изучаемой дисциплины, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

1. Комплект лекций, в формате мультимедийных презентаций, расположен на сайте кафедры: <https://drive.google.com/file/d/0B3u4J7t3fyZ2ZjBjODY3NjQtY2U3OS00ZWY2LWlzMjUtYzgzYmM4MDBmZmQz/view?usp=sharing>

Фрагменты лекций в формате мультимедийной презентации.

<p>С.А. Амелин Слайды к курсу лекций <b>Магнитные элементы электронных устройств</b></p>  <p>Информационные материалы и методические пособия размещены на сайте кафедры: <a href="https://sites.google.com/site/kafeim/">https://sites.google.com/site/kafeim/</a></p>	<p><b>Получение заданной индуктивности участка цепи</b></p>  <p>Катушки индуктивности (а – бескаркасная, б – с каркасом)</p>  <p>Дроссель (а – с разомкнутым сердечником, б – с замкнутым сердечником)</p>																																																															
<p><b>Разновидности дросселей</b></p> <p>Сердечник дросселя может быть кольцевым (тороидальным) или собираться из двух Ш-образных половинок (рис. 1.4). Сердечник, состоящий из двух Ш-образных половинок называется броневым. Обмотки дросселя могут выполняться не только проводом, но и медной фольгой (рис. 1.4, б).</p>  <p>Дроссели с тороидальным сердечником (а) и с броневым сердечником (б)</p>	<p><b>Преобразование уровней переменных токов и напряжений</b></p> <p>Эту функцию выполняет наиболее распространенный магнитный компонент – трансформатор. В простейшем случае трансформатор представляет собой две катушки провода, расположенные на общем сердечнике из ферромагнитного материала.</p>  <p>Трансформатор может содержать несколько вторичных обмоток, с которых будут сниматься различные напряжения. Напряжения на обмотках трансформатора однозначно определяются соотношением числа витков в обмотках (коэффициентом трансформации).</p> 																																																															
<p><b>Основные магнитные величины, единицы магнитных величин</b></p>  <p>Внешнее магнитное поле линейного проводника с током <math>I</math> характеризуется <b>напряженностью магнитного поля</b>:</p> <p>СИ: <math>H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}</math> [А/м]; СГСМ: <math>H = \frac{2I}{r}</math> [Э].</p> <p>где <math>r</math> – расстояние от проводника до точки, в которой определяется напряженность.</p> <p>Напряженность магнитного поля в центре витка с током определяется как:</p> <p>СИ: <math>H = \frac{I}{2 \cdot r}</math> [А/м]; СГСМ: <math>H = \frac{2\pi \cdot I}{r}</math> [Э].</p> <p>где <math>r</math> – радиус витка.</p>	<p><b>Связь между магнитными и электрическими величинами</b></p> <p>Согласно закону полного тока:</p> $F = \sum I_k \cdot W_k$ $H = \frac{\sum I_k \cdot W_k}{l}$ <p>Напряженность поля <math>H</math> в сердечнике однозначно определяется токами в его обмотках.</p> <p>Согласно закону электромагнитной индукции:</p>  <p>Согласно закону электромагнитной индукции:</p> $e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi_2}{dt}, \quad u_1 = e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\psi_1}{dt}, \quad d\Phi = S dB$  $S = h \cdot \frac{D-d}{2}, \quad e_2 = -W_2 \cdot S \frac{dB}{dt}, \quad u_1 = W_1 \cdot S \frac{dB}{dt} \Rightarrow$ $\Delta B = \frac{-\int e_2 dt}{W_2 \cdot S}, \quad \text{или} \quad \Delta B = \frac{\int u_1 dt}{W_1 \cdot S}$ <p><math>\int u_1 dt</math> – вольт-секундная площадь</p> <p><b>Изменение индукции в сердечнике <math>\Delta B</math> пропорционально вольт-секундной площади напряжения, приложенного к обмотке.</b></p>																																																															
<p><b>Динамические потери в магнитных компонентах</b></p> <p><b>Потери из-за вихревых токов</b></p> $P_{\text{вих}} = \xi \frac{f^2 B_{\text{max}}^2 \delta^2 V}{\rho}, \quad \delta \leq \frac{a}{\sqrt{f}}$  <p>Обмотка сердечника</p> <p><math>\delta</math> – основной магнитный поток</p> <p><math>\Phi_0</math> – магнитный поток, создаваемый вихревым током</p> <p>элементарный контур вихр. тока</p> <p>The skin effect</p> <p><math>\Phi_{\delta} = Ba\delta</math> (<math>a</math> – ширина стальной ленты, <math>\delta</math> – толщина)</p> <p>Суммарное сечение <math>\sim 0,5 \cdot \delta \cdot l</math>, где <math>l</math> – длина сердечника</p>	<p><b>Сравнительная характеристика магнитных материалов</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Название материала</th> <th>Состав</th> <th>Начальная магнитная проницаемость <math>\mu_{\text{нач}}</math></th> <th>Магнитная индукция насыщения <math>B_s</math>, Тесла</th> <th>Температура Кюри <math>T_c</math>, °С</th> <th>Коэффициентная сила <math>H_c</math>, А/м</th> <th>Плотность <math>\rho</math>, г/см³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Электротехническая сталь (Magnesi)</td> <td>3% Si 97% Fe</td> <td>1500</td> <td>1.5–1.8</td> <td>750</td> <td>30–50</td> <td>7.3</td> </tr> <tr> <td>Пермаллой (Supermendur)</td> <td>49% Co 49% Fe 2% V</td> <td>800</td> <td>1.9–2.2</td> <td>940</td> <td>12–28</td> <td>8.15</td> </tr> <tr> <td>Низколегированный пермаллой (Ortholloy)</td> <td>50% Ni 50% Fe</td> <td>2000</td> <td>1.42–1.58</td> <td>500</td> <td>8–16</td> <td>8.24</td> </tr> <tr> <td>Высоколегированный пермаллой с ППГ (Sq. Permalloy)</td> <td>79% Ni 17% Fe 4% Mo</td> <td>12000–100000</td> <td>0.66–0.82</td> <td>460</td> <td>1.6–3.2</td> <td>8.73</td> </tr> <tr> <td>Высоколегированный пермаллой (Supermalloy)</td> <td>78% Ni 17% Fe 5% Mo</td> <td>10000–50000</td> <td>0.65–0.82</td> <td>460</td> <td>0.5–0.64</td> <td>8.76</td> </tr> <tr> <td>Аморфный 2605-SC</td> <td>81% Fe 13.5% B 3.5% Si</td> <td>3000</td> <td>1.5–1.6</td> <td>370</td> <td>2.4–6.4</td> <td>7.32</td> </tr> <tr> <td>Аморфный 2714A</td> <td>66% Co 15% Si 4% Fe</td> <td>20000</td> <td>0.5–0.58</td> <td>205</td> <td>0.25–1.6</td> <td>7.59</td> </tr> <tr> <td>Ферриты</td> <td>MnZn</td> <td>750–15000</td> <td>0.3–0.5</td> <td>100–300</td> <td>3.2–20</td> <td>4.8</td> </tr> </tbody> </table>	Название материала	Состав	Начальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$	Магнитная индукция насыщения $B_s$ , Тесла	Температура Кюри $T_c$ , °С	Коэффициентная сила $H_c$ , А/м	Плотность $\rho$ , г/см³	Электротехническая сталь (Magnesi)	3% Si 97% Fe	1500	1.5–1.8	750	30–50	7.3	Пермаллой (Supermendur)	49% Co 49% Fe 2% V	800	1.9–2.2	940	12–28	8.15	Низколегированный пермаллой (Ortholloy)	50% Ni 50% Fe	2000	1.42–1.58	500	8–16	8.24	Высоколегированный пермаллой с ППГ (Sq. Permalloy)	79% Ni 17% Fe 4% Mo	12000–100000	0.66–0.82	460	1.6–3.2	8.73	Высоколегированный пермаллой (Supermalloy)	78% Ni 17% Fe 5% Mo	10000–50000	0.65–0.82	460	0.5–0.64	8.76	Аморфный 2605-SC	81% Fe 13.5% B 3.5% Si	3000	1.5–1.6	370	2.4–6.4	7.32	Аморфный 2714A	66% Co 15% Si 4% Fe	20000	0.5–0.58	205	0.25–1.6	7.59	Ферриты	MnZn	750–15000	0.3–0.5	100–300	3.2–20	4.8
Название материала	Состав	Начальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$	Магнитная индукция насыщения $B_s$ , Тесла	Температура Кюри $T_c$ , °С	Коэффициентная сила $H_c$ , А/м	Плотность $\rho$ , г/см³																																																										
Электротехническая сталь (Magnesi)	3% Si 97% Fe	1500	1.5–1.8	750	30–50	7.3																																																										
Пермаллой (Supermendur)	49% Co 49% Fe 2% V	800	1.9–2.2	940	12–28	8.15																																																										
Низколегированный пермаллой (Ortholloy)	50% Ni 50% Fe	2000	1.42–1.58	500	8–16	8.24																																																										
Высоколегированный пермаллой с ППГ (Sq. Permalloy)	79% Ni 17% Fe 4% Mo	12000–100000	0.66–0.82	460	1.6–3.2	8.73																																																										
Высоколегированный пермаллой (Supermalloy)	78% Ni 17% Fe 5% Mo	10000–50000	0.65–0.82	460	0.5–0.64	8.76																																																										
Аморфный 2605-SC	81% Fe 13.5% B 3.5% Si	3000	1.5–1.6	370	2.4–6.4	7.32																																																										
Аморфный 2714A	66% Co 15% Si 4% Fe	20000	0.5–0.58	205	0.25–1.6	7.59																																																										
Ферриты	MnZn	750–15000	0.3–0.5	100–300	3.2–20	4.8																																																										

## 2. Методическое обеспечение лабораторных работ

Цель лабораторных работ – закрепление лекционного материала, привитие навыков применения теоретических знаний для решения научно-исследовательских задач, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

Задания и методические указания к лабораторным работам расположены по ссылке:

Отдельные ЛР: <https://drive.google.com/drive/folders/1GN2LrPMTwWZyyUIAzyodUFboN-sjA3dn?usp=sharing>

Пример задания на лабораторную работу.

*Задание на лабораторную работу 1 «Применение магнитных компонентов в узлах электронных устройств»*

### 1. Получение необходимой индуктивности участка цепи

В качестве примера используется генератор синусоидальных колебаний, который называют генератор Колпитца или ёмкостная трехточка (рис. 1). В этом генераторе индуктивность катушки L1 задает частоту генерации (наряду с емкостями конденсаторов C2 и C3).

1.1. Нарисовать в схемном редакторе схему рис. 1.

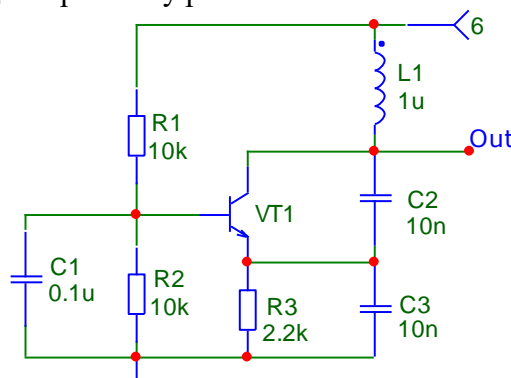


Рисунок 1 – Генератор синусоидальных колебаний (генератор Колпитца, ёмкостная трехточка)

1.2. Выполнить анализ Transient и получить график напряжения в точке Out. Время расчета 5 мкс. Максимальный шаг расчета 5 нс. Флажок Operating point убран. Масштаб автоматический. Убедиться, что генератор формирует синусоидальное напряжение, определить его частоту. И далее расчетные и исследовательские пункты.

### 2. Создание реактивного сопротивления в цепи переменного тока

Для задания определенной величины переменного тока может использоваться дроссель с заданной индуктивностью. В качестве примера рассматривается дроссель, ограничивающий ток через люминесцентную лампу (рис. 2). Лампа моделируется резистором R1.

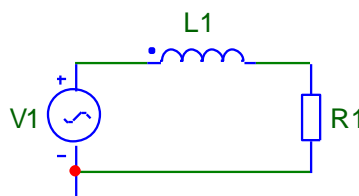


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема включения люминесцентной лампы

2.1. Дано: действующее напряжение сети  $U_{RMS}=230$  В, частота  $f=50$  Гц. Мощность лампы  $P_{R1}=40$  Вт. Напряжение на люминесцентной лампе  $U_{R1}=100$  В. Рассчитать индуктивность дросселя L1, обеспечивающую номинальный режим работы люминесцентной лампы. Основные формулы для расчета:

$$P_{R1} = U_{R1} \cdot I_{R1} ; \quad I_{V1} = I_{L1} = I_{R1} = \frac{U_{RMS}}{Z} ; \quad Z = \sqrt{X_{L1}^2 + R1^2} ; \quad X_{L1} = \omega \cdot L1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L1$$

2.2. Нарисовать в схемном редакторе схему рис. 2. Задать в источнике напряжения V1 амплитуду синусоидального сигнала A, соответствующую действующему значению  $U_{RMS}=230$  В. Индуктивность дросселя L1 и сопротивление резистора R1 установить в соответствии с расчетом п. 2.1. Далее исследовательские пункты с помощью моделирования в среде программы Micro-Cap.

### 3. Формирование линейно-нарастающего тока

Если к катушке индуктивности приложить постоянное положительное напряжение, то ток будет линейно нарастать, если отрицательное напряжение, то ток будет линейно спадать. Для примера можно рассмотреть ток в катушке, подключенной к источнику импульсов (рис. 3).

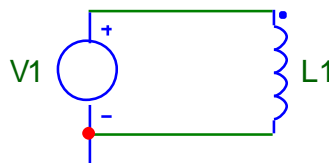


Рисунок 3 – формирователь треугольного тока

3.1. Дано: источник V1 формирует разнополярные импульсы амплитудой 10 В, длительностью 1 мс и периодом 2 мс (рис. 4)

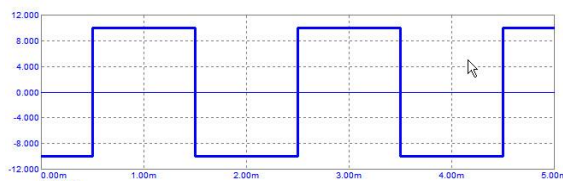


Рисунок 4 – Импульсы напряжения с источника V1

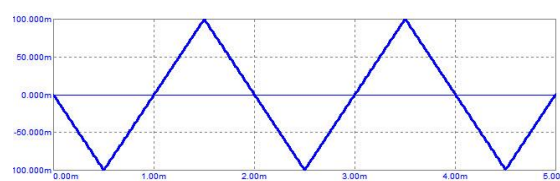


Рисунок 5 – Импульсы тока в катушке L1

3.2. Рассчитать индуктивность катушки L1 для получения треугольного тока, амплитудой 100 мА (рисунок 5).

Далее исследовательские пункты с помощью моделирования в среде программы Micro-Cap.

### 4. Накопление электрической энергии

Дроссель является накопителем энергии. Если к дросселю подключить источник напряжения, то в нем начнет накапливаться энергия. При этом ток через дроссель будет линейно нарастать. Если источник отключить, а подключить нагрузку, то энергия, накопленная в дросселе, будет создавать в нагрузке ток, пока вся накопленная энергия не передается от дросселя к нагрузке.

Меняя время, в течение которого накапливается энергия в дросселе, и оставляя частоту неизменной, можно регулировать мощность, передаваемую в нагрузку (рис. 7). На основе этого же принципа работает инвертирующий преобразователь постоянного напряжения.

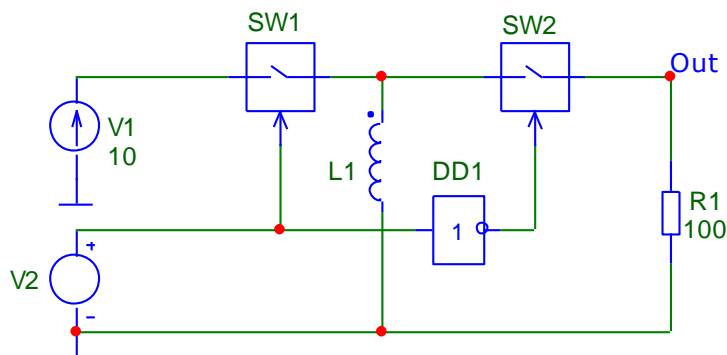


Рисунок 7 – Импульсный регулятор мощности в нагрузке

4.1. Дано: источник V1 формирует прямоугольные импульсы амплитудой 10 В, длительностью 4 мс и периодом 10 мс. Рассчитать индуктивность дросселя L1 для передачи в нагрузку  $R1=100$  Ом мощности  $P_{R1}=0.8$  Вт

Основные формулы для расчета:

Энергия, накопленная в индуктивности:  $W_L = \frac{L \cdot I_L^2}{2}$ .

Мощность, отдаваемая в нагрузку:  $P_{R1} = W_L \cdot f$ .

Последняя формула справедлива только в том случае, если за время, пока замкнут ключ SW2, ток дросселя спадает до нуля, т.е. вся накопленная дросселем энергия отдается в нагрузку.

4.2. Нарисовать в схемном редакторе схему рис. 7. Ключ SW и инвертор DD1 находятся в разделе «Функциональные блоки».

Задать в источнике напряжения V1 начальное значение напряжения V1=0, максимальное значение V2=10 В, задержку TD=0, время фронта и время среза TR=TD=10 мкс, длительность импульса PW=4 мс, период PER=10 мс. Задать индуктивность катушки в соответствии с расчетом п. 4.1.

Далее исследовательские пункты с помощью моделирования в среде программы Micro-Cap.

### 3. Методическое обеспечение расчетно-графической работы

Цель расчетно-графической работы – закрепление лекционного материала, привитие навыков применения теоретических знаний для самостоятельного решения инженерных задач, необходимых для освоения закрепленных компетенций.

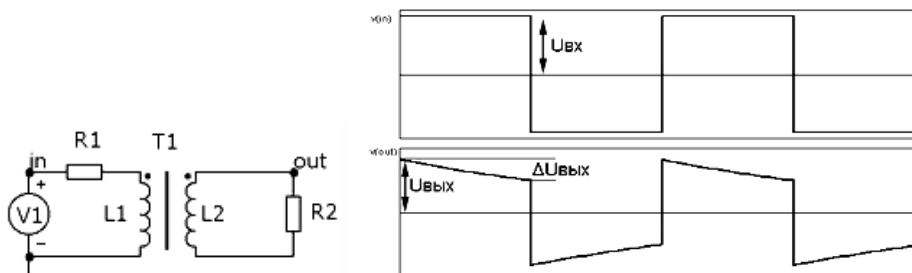
Задания и методические указания на расчетно-графическую работу расположены по ссылке:

<https://drive.google.com/drive/folders/1bvw6unMFZH4eCFvH9rbnKQLSAqi-vHn-?usp=sharing>

Пример задания на расчётно-графическую работу.

#### Задание на РГР

Рассчитать параметры импульсного трансформатора, предназначенного для передачи прямоугольных импульсов заданной частоты  $f$ . Искажения вершины не должны превышать заданные значения  $\Delta U_{\text{вых}}$ . Емкостью обмоток пренебречь.



Для трансформатора T1:

1. Рассчитать индуктивность первичной обмотки трансформатора.
2. Рассчитать индуктивность вторичной обмотки трансформатора.
3. Проверить полученные результаты путем моделирования в Micro-Cap при использовании трансформатора с линейным сердечником.
4. Рассчитать конструктивные параметры трансформатора (число витков, диаметр провода) для обеспечения полученной ранее индуктивности и заданного тока при использовании кольцевого ферритового сердечника из материала M2500HM2. Плотность тока считать равной 5А/кв. мм, магнитную проницаемость считать неизменной и равной 2500.
5. Проверить возможность изготовления трансформатора с полученными параметрами. В случае невозможности изготовления трансформатора повторить расчет для ферритового кольца большего типоразмера. Предельное заполнение окна сердечника принять равным 0.4

6. Проверить полученные результаты путем моделирования в Micro-Cap при использовании трансформатора с нелинейным сердечником из материала M2500HM2 (MS=390.689711K A=54.009657 C=9.832682M K=17.92692)

Варианты заданий

Номер в журнале	U <sub>вх</sub> , В	U <sub>вых</sub> , В	ΔU <sub>вых</sub> , В	R1, Ом	R2, Ом	f, кГц
1	10	10	0.1	1	100	1
2	20	10	1	1	100	5
3	30	30	0.3	1	100	10

И далее все 30 вариантов.

**4. Методическое обеспечение проведения зачета с оценкой:**

Зачет с оценкой является заключительным этапом изучения дисциплины и имеет цель оценить уровень теоретических знаний обучаемых, их навыки и умения применять полученные знания при решении практических задач, а также оценить уровень освоения компетенций, закрепленных за дисциплиной.

Пособие с грифом УМО по МЭЭУ:

[https://drive.google.com/file/d/1YgR\\_ORjcuANUMlbjsgN75qFMKNCYmWi6/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1YgR_ORjcuANUMlbjsgN75qFMKNCYmWi6/view?usp=sharing)

Вопросы для подготовки к зачету расположены по ссылке:

<https://drive.google.com/file/d/1BfoQr1nC9IPEvTWANjnUMlNX5iemDbtp/view?usp=sharing>

Все методические материалы по предмету МЭЭУ размещены в папке облачного хранилища по открытой ссылке:

<https://drive.google.com/drive/folders/1PHUtq865RS9LoJEM4Y3PLcSZwmKGmNGB?usp=sharing>