

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= E_0 \\ e_1 &= E_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ e_2 &= E_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \end{aligned} \right\} . \quad (11)$$

Если задача поставлена иначе: заданы не ЭДС, а токи несинусоидальных источников тока, то принцип решения задачи остаётся тем же. Источник несинусоидального тока всегда можно представить в виде параллельного соединения ряда источников тока. Если к узлам ветви или выходам двухполюсника подводится несинусоидальный ток

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2), \quad (12)$$

то источник такого тока действует подобно параллельному соединению трёх источников:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= I_0 \\ i_1 &= I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \\ i_2 &= I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2) Применяв принцип наложения, и, рассмотрев действие каждой составляющей ЭДС в отдельности, можно найти составляющие токов на всех участках цепи.

При рассмотрении каждой составляющей спектра необходимо учитывать, что для различных частот индуктивные и ёмкостные сопротивления неодинаковы:

$$x_{L_k} = k \cdot \omega \cdot L = k \cdot x_{L_1}; \quad (14) \quad x_{C_k} = \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C} = \frac{x_{C_1}}{k}. \quad (15)$$

3) Мгновенные значения тока в любой ветви электрической цепи можем определить на основании принципа наложения:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2). \quad (16)$$

Зная мгновенное значение тока, можем определить действующее:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2}}. \quad (17)$$

Мощность при несинусоидальных напряжениях и токах

Под активной мощностью (Р, Вт) несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной мощности за период первой гармоники:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt. \quad (18)$$

$$P = I_0 \cdot U_0 + U_1 \cdot I_1 \sin \phi_1 + U_2 \cdot I_2 \sin \phi_2 + U_3 \cdot I_3 \sin \phi_3 + \dots + U_K \cdot I_K \sin \phi_K, \quad (19)$$

где  $\phi_K$  - угол между  $U_K$  и  $I_K$ .

Таким образом, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник.

Аналогично выводится понятие реактивной мощности ( $Q$ , ВАр):

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \phi_k. \quad (20)$$

Полная мощность ( $S$ , ВА) равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения на действующее значение несинусоидального тока:

$$S = U \cdot I, \quad (21)$$

$$\text{где } U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2}; \quad I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}.$$

В цепях с несинусоидальными токами в отличие от синусоидальных цепей

$$S^2 > P^2 + Q^2; \quad S^2 = P^2 + Q^2 + T^2, \quad (22)$$

так как в них действует мощность искажения ( $T$ , ВАр), обусловленная наличием высших гармоник:

$$T^2 = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (23)$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I}. \quad (24)$$

Для синусоидальных цепей  $\lambda = \cos \phi$ , но в несинусоидальных цепях появляется коэффициент искажения  $K_u$

$$\lambda = \frac{I_1}{I} \cos \phi = K_u \cos \phi$$

### Задания:

#### Задание №1

Фазное напряжение работающего вхолостую генератора, соединенного звездой, со-

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

держит персональные данные из гармоник.

Найти действующие значения напряжений этих гармоник по известным показани-

ниям вольтметров фазного  $U_\phi = 125 \text{ В}$  и линейного напряжений  $U_\lambda = 210 \text{ В}$ .

2. Какова погрешность расчета, если в напряжении содержится еще и 5-я гармоника, составляющая не более 10% основной?

### Задание №2

Симметричный генератор с фазным напряжением  $u_A(\omega t) = 310 \cdot \sin(\omega t - 30^\circ) + 93 \cdot \sin(3\omega t + 45^\circ)$  В питает соединённую звездой несимметричную нагрузку с сопротивлением фаз для тока основной гармоники  $Z_A^{(1)} = 15 \text{ Ом}$ ,  $Z_B^{(1)} = j15 \text{ Ом}$ ,  $Z_C^{(1)} = -j15 \text{ Ом}$  (рис. 6.16); сопротивление нейтрали  $Z_N^{(1)} = 2 + j2 \text{ Ом}$ . Определить показания приборов электромагнитной системы для случаев:

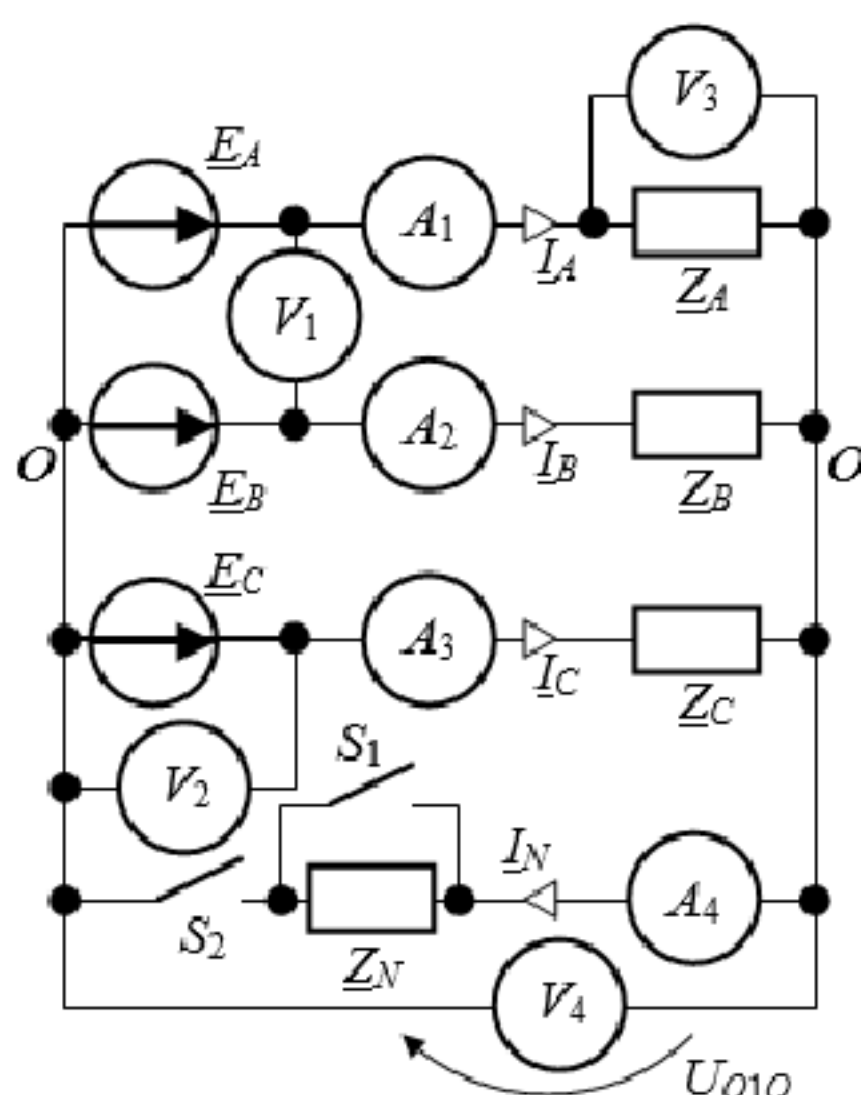


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №3

ЭДС одной фазы симметричного трехфазного генератора, соединенного звездой,  $e = 20 \cdot \sin(\omega t) + 5 \cdot \sin(3\omega t - 20^\circ)$  В.

Нагрузка соединена тоже звездой: в фазе А – сопротивление  $r$ , в фазе В – индуктивность  $L$  и в фазе С – емкость  $C$ , причем  $r = \omega L = 1/\omega C = 2 \text{ Ом}$ .

Определить ток в фазе А и напряжение между нейтралями нагрузки и генератора.

### Задание №4

Симметричный трехфазный генератор соединен треугольником и питает симметричную нагрузку, соединенную звездой. Ток в одной из фаз генератора (от В к А)  $i_{BA} =$

$100 \cdot \sin(\omega t) + 20 \cdot \sin(3\omega t) + 10 \cdot \sin(5\omega t)$  А. Определить мгновенное значение тока в фазе С

**Контрольные вопросы:**

1. Системы напряжений (ЭДС, токов) какой последовательности в трехфазных цепях образуют гармоники порядка  $k = (3n+1)$ ,  $(3n-1)$ ,  $3n$ ? Каким свойством обладают эти симметричные системы?
2. Почему в линейных напряжениях генератора при соединении его обмоток звездой отсутствуют гармоники, кратные трем?
3. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и приемников треугольником?
4. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом?
5. Почему при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом ток нулевого провода содержит только гармоники, кратные трем?
6. Почему при соединении нагрузки звездой без нулевого провода линейные токи не содержат гармоник, кратных трем?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## ***Практическая работа №16. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом***

**Цель:** Приобрести практические навыки расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.

### **Основы теории:**

Если электрическая цепь достаточно долго сохраняла неизменный вид, то в ней создаётся так называемый установившийся (принуждённый) режим. Последнему соответствуют определённые законы изменения энергии электрических полей конденсаторов и магнитных полей индуктивностей цепи. В случае изменения схемы при переключениях, которые будем называть коммутациями, энергия полей должна измениться, а для этого требуется некоторое время. Процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, называется переходным.

На протяжении ПП электрическая цепь может быть описана системой динамических уравнений, которая может быть сведена относительно одной электрической величины (тока или напряжения) к дифференциальному уравнению  $n$ -го порядка, причём его порядок определяется количеством накопителей энергии (к ним относятся индуктивности и ёмкости). Возникающее дифференциальное уравнение является линейным, неоднородным, с постоянными коэффициентами.

Общее решение полученного неоднородного линейного дифуравнения представляет собой сумму двух величин: частного решения неоднородного уравнения, выражающего принуждённый режим, задаваемый источниками, и решения соответствующего однородного дифуравнения, выражающего свободный режим.

В соответствии с этим для любого тока или напряжения можно записать:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}, u = u_{\text{пр}} + u_{\text{св}},$$

где  $i_{\text{пр}}, u_{\text{пр}}$  – принуждённые составляющие тока и напряжения;

$i_{\text{св}}, u_{\text{св}}$  – свободные составляющие тока и напряжения.

Метод нахождения электрических величин в виде суммы двух рассмотренных составляющих называется классическим.

Принуждённые составляющие рассчитываются любыми ранее изученными мето-

дами, а свободные составляющие зависят от числа и вида корней характеристического

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1 способ. По имеющемуся дифференциальному уравнению:

$$K_n \cdot \frac{d^n i}{dt^n} + K_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} i}{dt^{n-1}} + \dots + K_1 \cdot \frac{di}{dt} + K_0 \cdot i = f(t).$$

$n$ -я производная заменяется на  $p^n$ ;  $\dots$ ; первая производная на  $p$ ; сама величина – 1; правая часть – 0, то есть

$$K_n \cdot p^n + K_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + K_1 \cdot p + K_0 = 0.$$

2 способ. Путём записи входного сопротивления в операторной форме:

1. Источники заменяются их внутренними сопротивлениями, а ключ показывается в послекоммутационном состоянии.

2. Цепь размыкается в любом месте. Рекомендуется разрывать в ветви с конденсатором, а при его отсутствии – в ветви с индуктивностью.

3. Относительно полученных зажимов записывается входное сопротивление в комплексной форме  $Z(j\omega)$  (индуктивное сопротивление –  $j\omega L$ , а ёмкостное –  $1/(j\omega C)$ ).

4. Производится замена  $j\omega = p$ . Получаем входное сопротивление  $Z(p)$  в операторной форме.

5. Полученное сопротивление приравниваем к нулю, т.е.  $Z(p) = 0$ . Это и есть характеристическое уравнение.

3 способ. Используя систему динамических уравнений цепи:

1. Составляется система динамических уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационного состояния цепи.

2. Полученная система алгебраизируется (из дифференциальных уравнений превращаются в алгебраические в операторной форме).

3. Определитель системы приравнивается к нулю и получается характеристическое уравнение.

Если корень характеристического уравнения один (обязательно отрицательный), свободная составляющая имеет вид:  $i_{св}(t) = A \cdot e^{pt}$ ,

где  $A$  – постоянная интегрирования;

Если корней два, оба действительные, отрицательные, разные, причём  $|p_1| < |p_2|$ , то

$$i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}.$$

Если корней два – действительные, отрицательные, равные ( $p_1 = p_2 = p$ ), то  $i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{pt} + A_2 \cdot t \cdot e^{pt}$ ,

где  $A_1$  и  $A_2$  – две постоянные интегрирования;

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН**

**ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

$i_{св}(t) = A \cdot e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi)$ ,

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

где  $A$  и  $\psi$  – постоянные интегрирования.

Количество корней характеристического уравнения определяет число постоянных интегрирования и равно количеству накопителей энергии в цепи после коммутации.

Постоянные интегрирования находятся из начальных условий (значения электрических величин и их производных в начальный момент после коммутации), которые делятся на независимые и зависимые. К независимым относятся значения в момент коммутации потокосцепления и тока индуктивности, заряда и напряжения конденсатора. Остальные начальные условия считаются зависимыми.

Высказанные выше положения о том, что запас энергии магнитного или электрического поля может изменяться только плавно, без скачков, выражают принцип непрерывности во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда ёмкости и называются законами коммутации.

Первый закон коммутации: в индуктивном элементе ток и магнитный поток непосредственно после коммутации сохраняют значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, и дальше начинают изменяться

именно с этих значений:  $\Psi(0_+) = \Psi(0_-)$ ,  $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ ,

где  $t = 0_+$  – момент сразу после коммутации,

$t = 0_-$  – момент непосредственно перед коммутацией.

Второй закон коммутации: на ёмкостном элементе напряжение и заряд сохраняют в момент коммутации те значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, и в дальнейшем изменяются, начиная с этих значений:

$$q(0_+) = q(0_-), u_C(0_+) = u_C(0_-).$$

При нулевых начальных условиях ( $i_L(0_-) = 0$ ,  $u_C(0_-) = 0$ ) индуктивность в начальный момент после коммутации равносильна разрыву цепи, а ёмкость – короткому замыканию. В случае ненулевых начальных условий ( $i_L(0_-) \neq 0$ ,  $u_C(0_-) \neq 0$ ) индуктивность в момент  $t = 0_+$  равносильна источнику тока, а ёмкость – источнику ЭДС.

В зависимости от порядка дифференциальных уравнений различают цепи первого, второго и более высокого порядка.

Однако применен нерациональный порядок расчёта. Рекомендуется следующий порядок расчёта ПП:

1. Анализом цепи до коммутации определение независимых начальных условий.

2. **ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ** электрических величин (токов и напряжений) в виде суммы

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

3. **Расчёт принуждённых составляющих.**

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Вид свободных составляющих зависит от числа и вида корней характеристического уравнения. Поэтому тем или иным способом составляется и решается характеристическое уравнение.
5. Запись свободных составляющих с учётом вида корней.
6. Определение тем или иным способом необходимых начальных условий.
7. Нахождение постоянных интегрирования из начальных условий.
8. Запись искомых величин в окончательной форме.

### Задания:

#### Задание №1

Определить ток и напряжение катушки при переключении её на добавочное сопротивление  $r_d$ , если  $U = 200 \text{ В}$ ,  $r_k = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = 25 \text{ мГн}$ ,  $r_d = 40 \text{ Ом}$ .

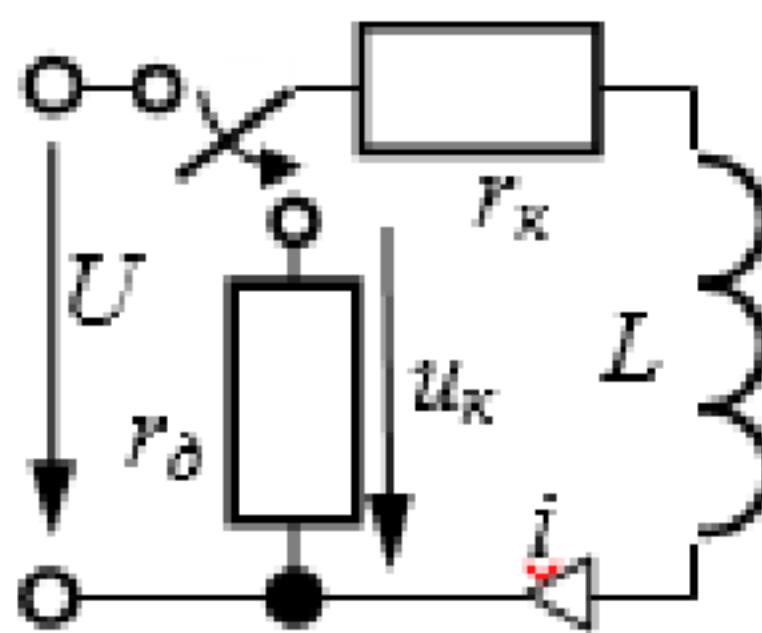


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

#### Задание №2

Рассчитать ток переходного процесса при включении катушки на синусоидальное напряжение  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$  (рис. 7.9), если  $U_m = 200 \text{ В}$ ,  $\omega = 1000 \text{ рад/с}$ ,  $\psi_u = -30^\circ$ ,  $r_k = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = 25 \text{ мГн}$ . Построить график  $i(t)$ .

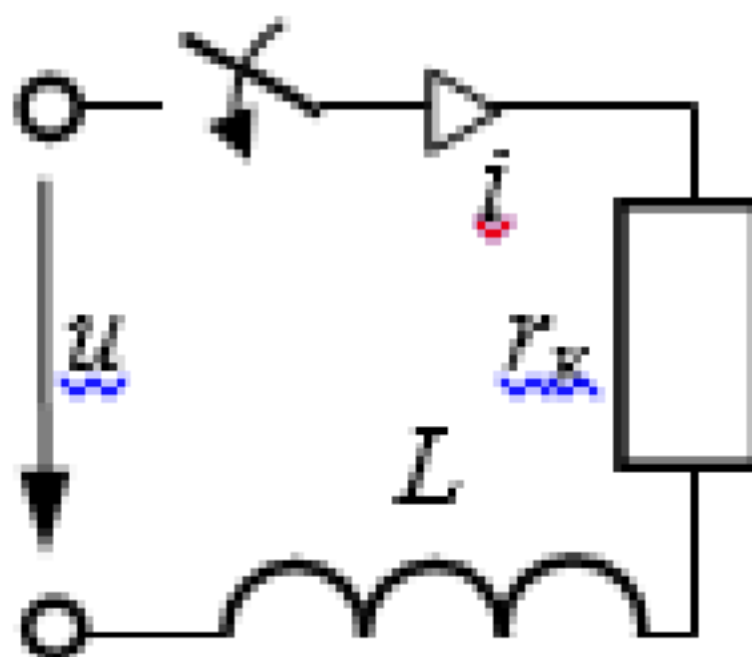


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №3

Определить ток и напряжение на ёмкости при переключении на добавочное сопротивление  $r_d$ , если  $U = 200 \text{ В}$ ,  $r = 100 \text{ Ом}$ ,  $C = 100 \text{ мкФ}$ ,  $r_d = 400 \text{ Ом}$ .

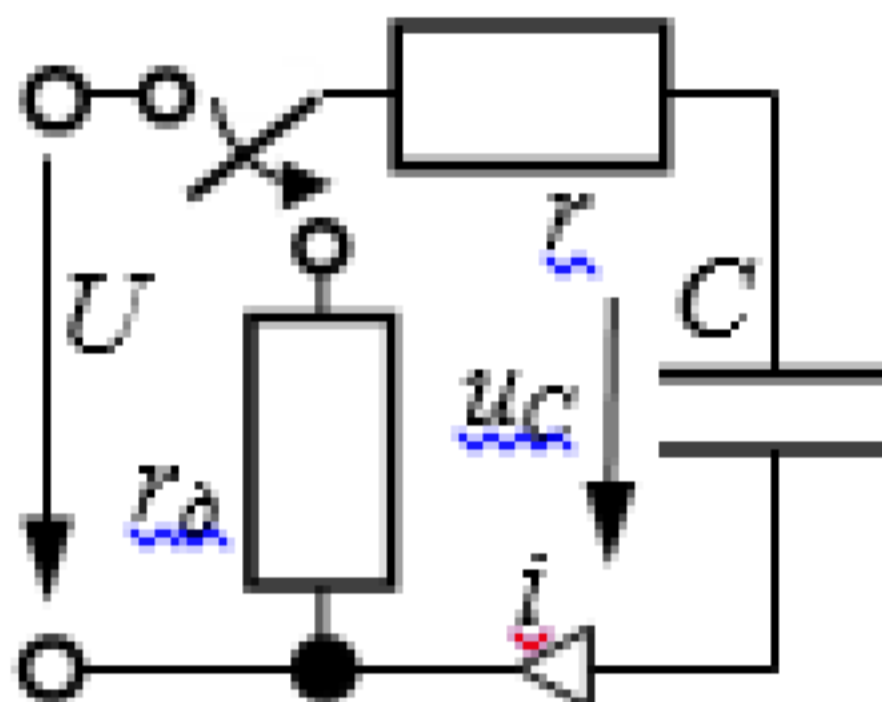


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №4

Рассчитать токи переходного процесса и напряжение на индуктивности в схеме если  $E = 150 \text{ В}$ ,  $r_1 = r_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = r_4 = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 20 \text{ мГн}$ . Построить графики  $i_2(t)$ ,  $u_L(t)$ .

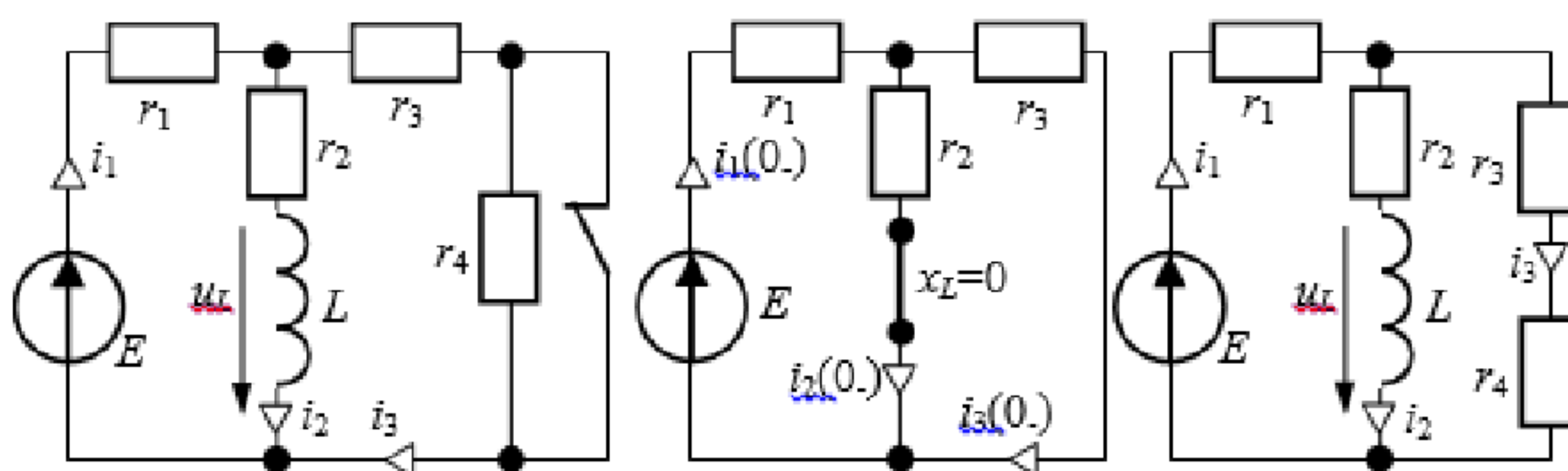
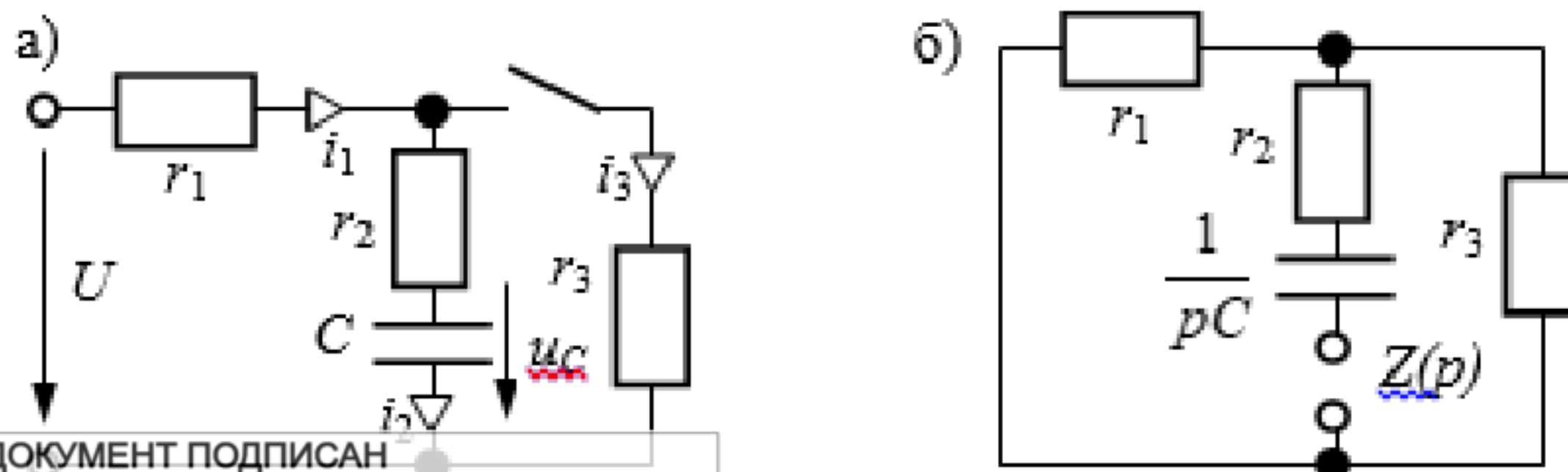


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №5

В схеме рассчитать токи переходного процесса классическим методом. Параметры цепи:  $U = 50 \text{ В}$ ,  $r_1 = r_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 50 \text{ Ом}$ ,  $C = 100 \text{ мкФ}$ .



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №6

Рассчитать переходный ток  $i_1(t)$  в схеме рис. 7.58 со следующими числовыми данными:  $E_1 = 36 \text{ В}$ ,  $E_2 = 6 \text{ В}$ ,  $r_1 = 300 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = r_3 = 600 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 300 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 200 \text{ мкФ}$ .

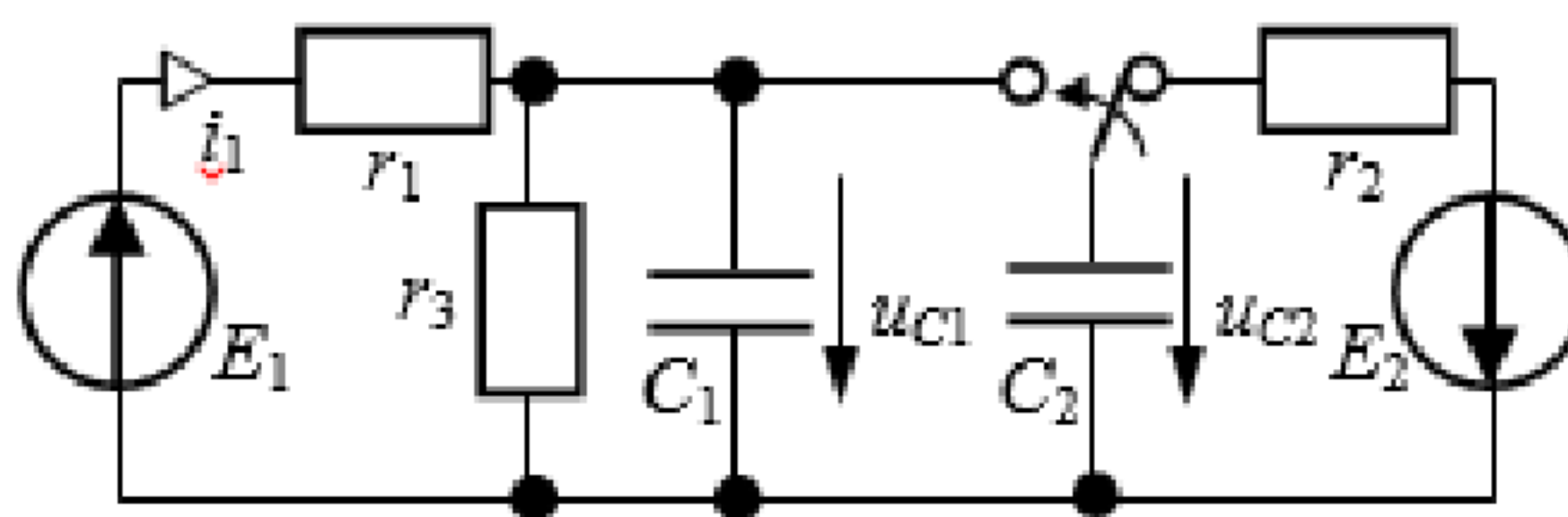


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче

### Контрольные вопросы:

1. Что такое переходной процесс?
2. Что называется коммутацией?
3. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
4. Как читаются законы коммутации?
5. Что понимают под начальными значениями?
6. Чем обусловлены свободный и принужденный режимы?
7. Какие начальные условия называются зависимыми и независимыми?
8. Что называется коэффициентом затухания и постоянной времени переходного процесса?
9. Как определяются независимые и зависимые начальные условия?
10. Чем опасны переходные процессы?
11. В чем заключается сущность классического метода расчета переходных процессов?
12. Какие виды корней может иметь характеристическое уравнение второй степени?
13. Какой характер переходного процесса соответствует каждой паре корней характеристического уравнения второй степени?
14. Какие вы знаете способы составления характеристического уравнения?
15. Чем определяется число корней характеристического уравнения?

**Практическая работа №17. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом**

**Цель:** Изучить методику расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом

**Основы теории:**

Сущность операторного метода заключается в том, что от некоторой функции вещественного переменного (например, времени  $t$ ), называемой *оригиналом*  $f(t)$ , переходят к функции комплексного переменного  $F(p)$ , называемой *изображением*. При этом дифференциальные уравнения относительно оригиналов превращаются в алгебраические уравнения относительно изображений, решение которых проще.

Изображение и оригинал функции связывают формулой прямого преобразования Лапласа

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt.$$

В справочной литературе имеются таблицы оригиналов и соответствующих им изображений. Изображения наиболее характерных оригиналов приведены в табл. 7.3.

Таблица

| Оригинал функции                                        | Изображение по Лапласу                                                                                    |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_0, J_k, u_C(0)$                                      | $\frac{U_0}{p}, \frac{J_k}{p}, \frac{u_C(0)}{p}$                                                          |
| $U_0 \cdot e^{\pm \alpha t}, 1 - 1 \cdot e^{-\alpha t}$ | $\frac{U_0}{p \mp \alpha}, \frac{\alpha}{p(p + \alpha)}$                                                  |
| $1 \cdot t, t^n, t \cdot e^{-\alpha t}$                 | $\frac{1}{p^2}, \frac{n!}{p^{n+1}}, \frac{1}{(p + \alpha)^2}$                                             |
| $e^{j(\omega t + \psi)}$                                | $\frac{e^{j\psi}}{p - j\omega}$                                                                           |
| $\sin(\omega t + \psi)$                                 | $Im \left( \frac{e^{j\psi}}{p - j\omega} \right) = \frac{p \sin \psi + \omega \cos \psi}{p^2 + \omega^2}$ |
|                                                         | $Re \left( \frac{e^{j\psi}}{p - j\omega} \right) = \frac{p \cos \psi - \omega \sin \psi}{p^2 + \omega^2}$ |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|                                          |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| Теорема дифференцирования, $f'(t)$       | $pF(p) - f(0)$   |
| Теорема интегрирования $\int_0^t f(t)dt$ | $\frac{F(p)}{p}$ |

Закон Ома для последовательного участка R-L-C:

$$I(p) = \frac{U(p) + L \cdot i_L(0) - \frac{u_C(0)}{p}}{Z(p)},$$

где  $Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}$  – операторное сопротивление этого участка.

В числителе кроме изображения напряжения на зажимах участка  $U(p)$

фигурируют внутренние операторные ЭДС  $L i_L(0)$  и  $\frac{u_C(0)}{p}$ , учитывающие незави-

симые начальные условия.

I закон Кирхгофа: для любого узла  $\sum \pm I(p) = 0$ .

II закон Кирхгофа: для любого контура

$$\sum_{k=1}^n I_k(p) Z_k(p) = \sum_{k=1}^n \left( E_k(p) + L_k i_k(p) - \frac{u_{Ck}(0)}{p} \right).$$

Поскольку законы Ома и Кирхгофа в операторной форме имеют такой же вид, как и в цепях постоянного тока (ЦПТ), то все методы анализа ЦПТ, основанные на этих законах, могут быть применены для анализа операторных схем с учётом независимых начальных условий.

По изображениям искомых величин, полученным в результате анализа операторной схемы, находят оригиналы искомых величин. Для этого применяют обратное преобразование Лапласа или используют таблицу преобразований Лапласа, или пользуются теоремой разложения. В последнем случае изображение искомой величины приводят к виду:

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \quad \text{или} \quad \frac{F_1(p)}{p F_2(p)},$$

где  $F_1(p)$  и  $F_2(p)$  – степенные многочлены:

$$F_1(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0, \quad F_2(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0,$$

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Оригинал определяется по формулам:

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \rightarrow f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} \quad \text{или} \quad \frac{F_1(p)}{pF_2(p)} \rightarrow f(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_2'(p_k)} e^{p_k t},$$

где  $p_k$  – корни уравнения  $F_2(p) = 0$ , а  $n$  – число корней этого уравнения,

$F_1(p_k)$  и  $F_2'(p_k)$  – значения многочлена  $F_1(p)$  и производной от многочлена  $F_2(p)$  при  $k$ -м корне.

В случае пары комплексных сопряжённых корней можно использовать следующие формулы:

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \rightarrow f(t) = 2\operatorname{Re} \left( \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} \right)$$

$$\frac{F_1(p)}{pF_2(p)} \rightarrow f(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + 2\operatorname{Re} \left( \frac{F_1(p_1)}{p_k F_2'(p_1)} e^{p_1 t} \right).$$

Рекомендуемая последовательность расчёта ПП операторным методом.

1. Расчётом цепи до коммутации определяют независимые начальные условия  $i_L(0)$ ,  $u_C(0)$  и записывают величины внутренних операторных ЭДС  $L i_L(0)$  и  $\frac{u_C(0)}{p}$ .
2. Для цепи после коммутации составляется эквивалентная операторная схема.
3. Любым методом анализа ЦПТ определяют изображения требуемых токов и напряжений, приводя затем их к виду рациональной дроби.
4. По теореме разложения или с помощью обратных преобразований Лапласа находят оригиналы искомых токов и напряжений переходного процесса.

### Задания:

#### Задание №1

Напряжение, приложенное к цепи изменяется по закону  $u(t) = 30t^2 + 18t + 10$  В. Параметры цепи:  $r_1 = r_2 = 100$  Ом,  $C = 10$  мкФ. Рассчитать ток конденсатора.

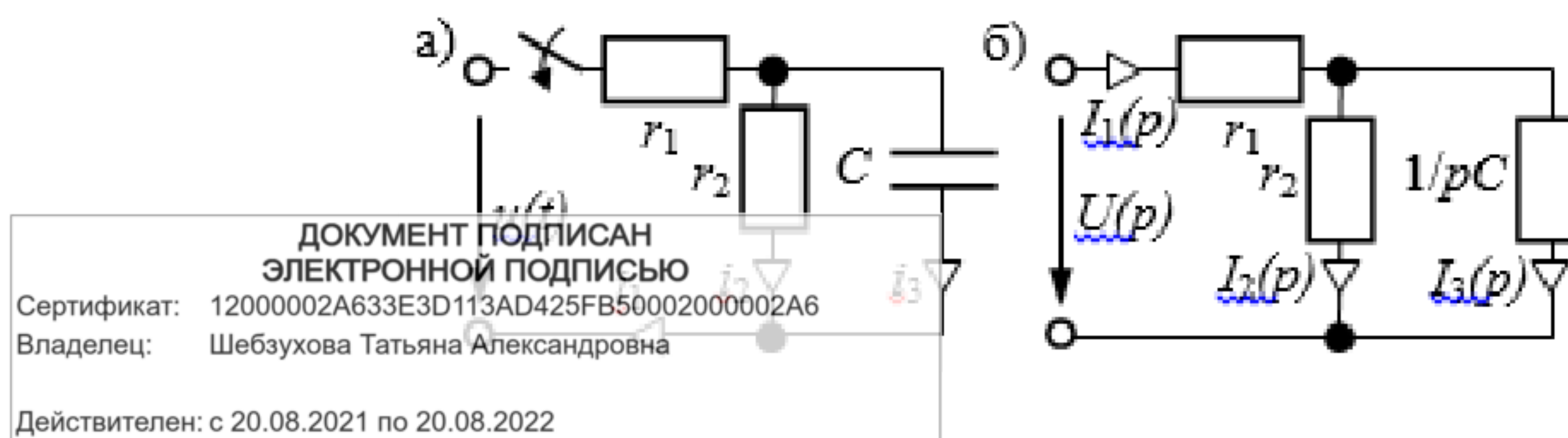


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №2

В приведенной на рис. схеме рассчитать напряжение и ток индуктивности. Числовые значения:  $U = 24 \text{ В}$ ,  $L = 0,25 \text{ Гн}$ ,  $R_1 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ .

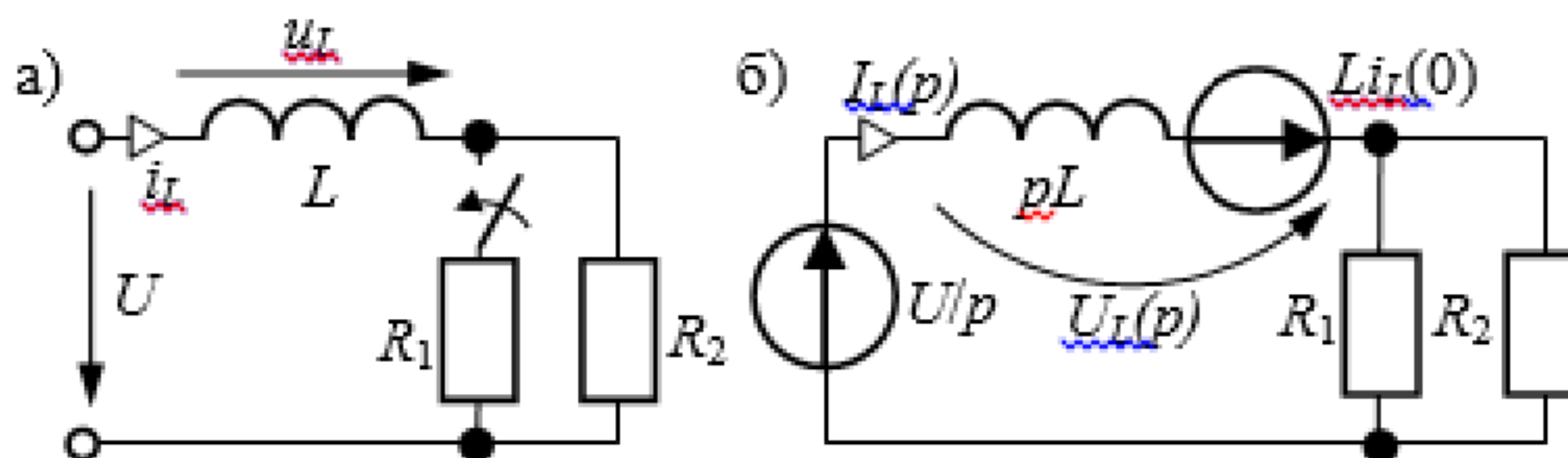


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №3

В схеме рис. 7.70,а рассчитать ток  $i_2(t)$  и напряжение на ёмкости  $u_C(t)$ , если  $U = 240 \text{ В}$ ,  $E_3 = 100 \text{ В}$ ,  $R_1 = R_3 = 50 \text{ Ом}$ ,  $C = 1000 \text{ мкФ}$ .

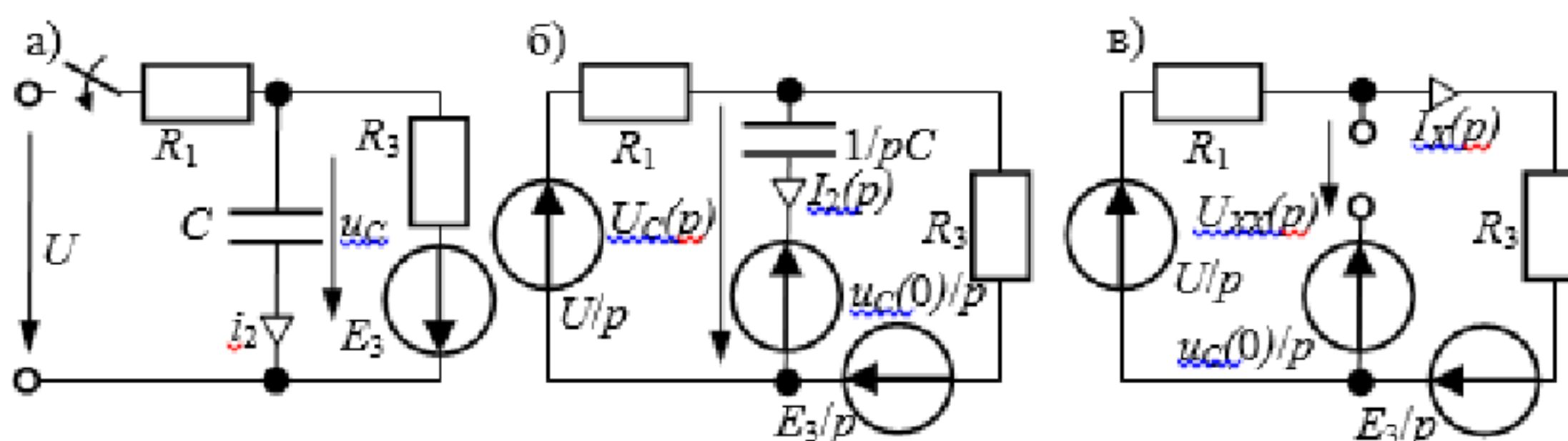
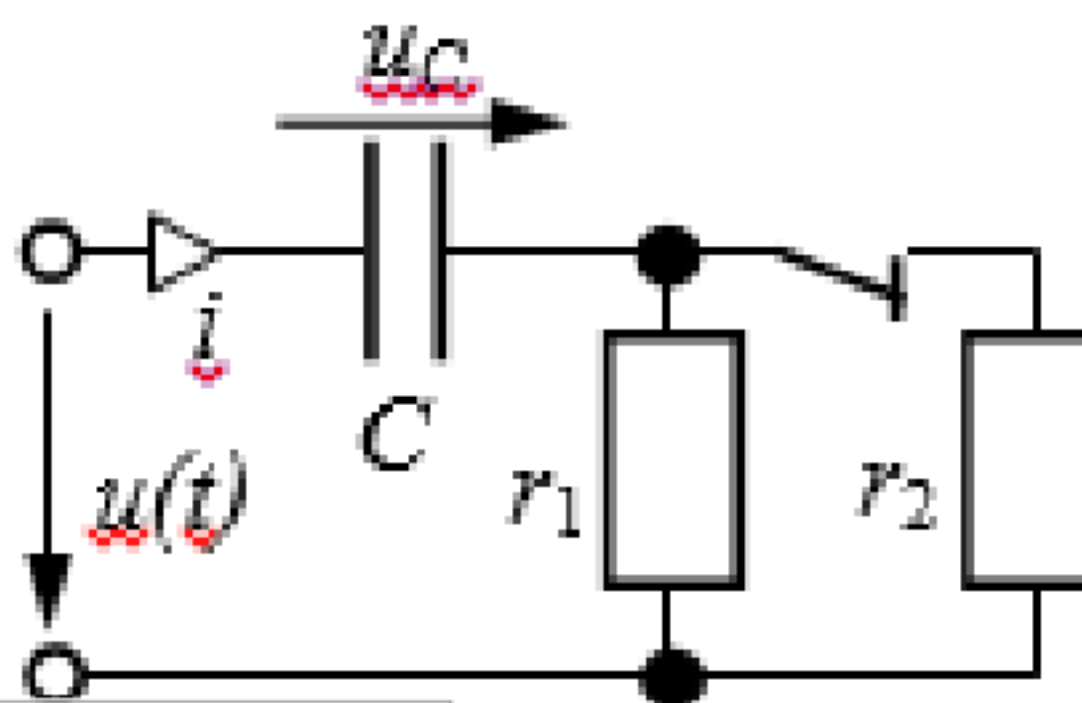


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №4

Рассчитать переходный процесс в схеме операторным методом:  $u(t) = 100 \cdot \sin(200t + 90^\circ) \text{ В}$ ,  $r_1 = r_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C = 50 \text{ мкФ}$ .



***Контрольные вопросы:***

1. Что такое переходной процесс?
2. Что называется коммутацией?
3. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
4. Как читаются законы коммутации?
5. Чем опасны переходные процессы?
6. Сущность операторного метода расчета переходных процессов.
7. Как определить операторное сопротивление цепи?
8. Записать закон Ома в операторной форме.
9. Записать второй закон Кирхгофа в операторной форме.
10. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник катушки индуктивности в операторной схеме замещения?
11. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник конденсатора в операторной схеме замещения?
12. Как определить оригинал с помощью таблицы соответствия?
13. Как определить оригинал с помощью теоремы разложения?
14. Зарисовать операторную схему замещения для катушки индуктивности.
15. Зарисовать операторную схему замещения для конденсатора.
16. Как составить операторную схему замещения для свободного процесса?
17. Как составить операторную схему замещения для переходного процесса?

## **Практическая работа №18. Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях**

**Цель:** Освоить методику расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях

### **Основы теории:**

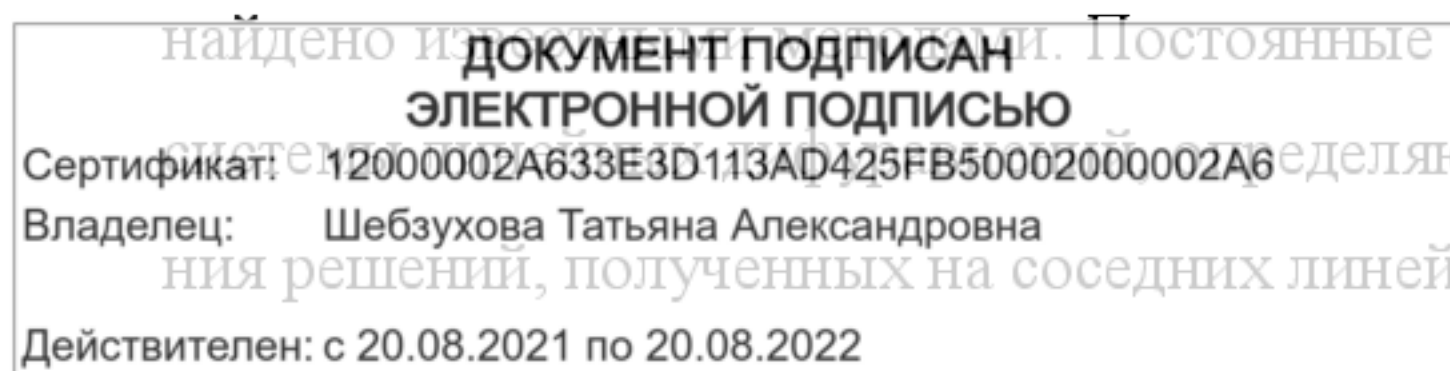
Переходные процессы (ПП) в нелинейных электрических цепях носят значительно более сложный и многообразный характер, чем в линейных, так как нелинейность характеристик элементов может приводить как к чисто количественным изменениям показателей ПП, так и к возникновению качественно новых явлений, принципиально недостижимых в линейных цепях. ПП в нелинейных цепях описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Поскольку не найдено общего метода решения таких уравнений, то нельзя указать общего аналитического метода расчета ПП в нелинейной цепи произвольной конфигурации. Существует много частных методов, направленных на решение конкретных задач расчета ПП в нелинейных цепях. Перечислим наиболее распространенные из них и обозначим их сущность.

1. Метод условной линеаризации. Его суть заключается в том, что характеристика нелинейного элемента (НЭ) заменяется прямой линией, проходящей через начальную и конечную точки переходного процесса на характеристике НЭ. Уравнение этой прямой подставляется в дифуравнение, описывающее ПП, в результате чего оно становится линейным и его решение большого труда не представляет.

2. Метод аналитической аппроксимации. Сущность метода заключается в приближенном выражении характеристики НЭ некоторой аналитической функцией, которая подставляется в дифуравнение, описывающее ПП, и производится его решение. Успешность применения этого метода зависит не только от того, насколько точно выражена характеристика НЭ, но еще и от того, насколько просто находится решение полученного дифуравнения.

3. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Его сущность заключается в замене характеристики НЭ отрезками прямых линий (ломаной), уравнения которых подставляются в нелинейные дифуравнения, описывающие ПП. При этом системе исходных нелинейных соответствует совокупность систем линейных дифуравнений, решение которых может быть

найденно известными методами. Постоянные интегрирования, появляющиеся при решении систем дифуравнений, определяются путем «припасовывания», т.е. согласования решений, полученных на соседних линейных участках.



4. Метод последовательных интервалов. Сущность метода основана на предложенном Эйлером приближенном способе решения нелинейного дифференциального уравнения. При этом время ПП разбивается на ряд достаточно малых интервалов  $t$ , которыми заменяется  $dt$ , имеющееся в уравнении. Это позволяет на каждом интервале определять приращение одной из величин, характеризующих НЭ. Допущение о том, что другая величина, характеризующая НЭ, имеет значение, соответствующее предыдущему участку, позволяет осуществлять переход от одного интервала к другому и произвести расчет ПП от начального состояния до его практического завершения.

5. Метод графического интегрирования. Его сущность: в исходном дифференциальном уравнении нужно разделить переменные, выразив производную одной из них, например, по времени  $t$  в виде некоторой функции. Тогда ответ для этой переменной будет представлять собой интеграл от указанной функции. Поскольку значение интеграла равно площади, ограниченной подынтегральной функцией, то, задаваясь различными значениями верхнего предела интеграла, можно каждый раз определять соответствующее значение искомой переменной и получить зависимость между этими величинами в течение всего переходного процесса.

### Задания:

#### Задание №1

В схеме методом графического интегрирования рассчитать ток  $i$  переходного процесса в катушке со сталью, построить его график, если в цепи действует источник постоянного тока  $J = 10 \text{ А}$ ,  $r = 1 \text{ Ом}$ , длина средней магнитной линии  $l = 50 \text{ см}$ , сечение сердечника (сталь 1512)  $S = 100 \text{ см}^2$ , а число витков катушки  $w = 490$ . Поток рассеяния и потерями в стали пренебречь.

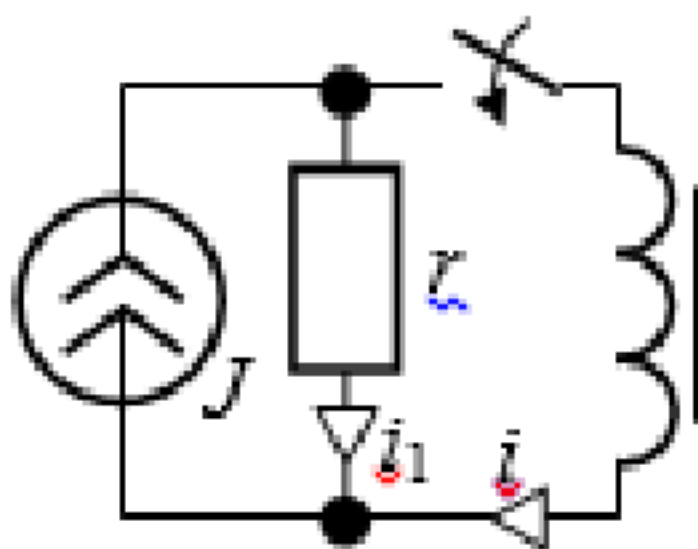
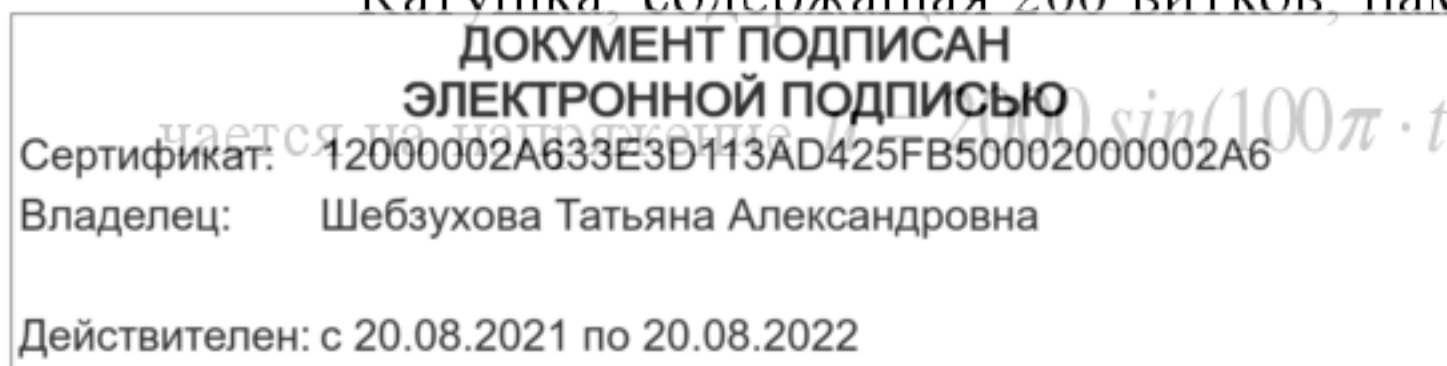


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

#### Задание №2

Катушка, содержащая 200 витков, намотанных на сердечнике из стали 1512, вклю-



$\sin(100\pi \cdot t) \text{ В}$ . Длина средней магнитной линии состав-

ляет  $50 \text{ см}$ , а сечение сердечника  $200 \text{ см}^2$ . Активное сопротивление провода обмотки составляет  $1 \text{ Ом}$ . Требуется: пренебрегая потерями в стали и потоком рассеяния, рассчитать потокосцепление и ток переходного процесса, построить их графики; определить степень превышения максимальным током переходного процесса амплитуды тока установившегося режима.

***Контрольные вопросы:***

1. В чем заключаются особенности расчета переходных процессов в нелинейных цепях?
2. В чем состоит сущность метода условной линеаризации? С чем связана его невысокая точность?
3. В чем заключается основное преимущество метода аналитической аппроксимации?
4. Следует ли применять метод кусочно-линейной аппроксимации для расчета переходных процессов в цепях с питанием от источника переменного напряжения?

## **Практическая работа №19. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме**

**Цель:** Изучить методику расчета электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.

Устройства или электрические цепи, в которых токи  $i(x,t)$  и напряжения  $u(x,t)$  являются функциями не только времени  $t$ , но и зависят от координаты  $x$ , называют длинными линиями или линиями с распределёнными параметрами (ЛРП). Факторами, которые обуславливают распределённость параметров, являются значительная протяжённость устройства в пространстве, высокое напряжение, высокая частота. Примерами ЛРП являются: линии электропередач напряжением 110 кВ и выше, короткие линии связи у микрофона, кабель телеантенны, сами антенны радио и телепередатчиков, устройства задержки сигналов, гирлянды изоляторов.

Исходными характеристиками или первичными параметрами длинных линий являются:

- $r_0$ , Ом/м – продольное сопротивление линии на единице длины;
- $g_0$ , См/м – поперечная проводимость линии, причём  $g_0 \neq r_0^{-1}$ ;
- $L_0$ , Гн/м и  $C_0$ , Ф/м, соответственно, – индуктивность и емкость линии на единице длины.

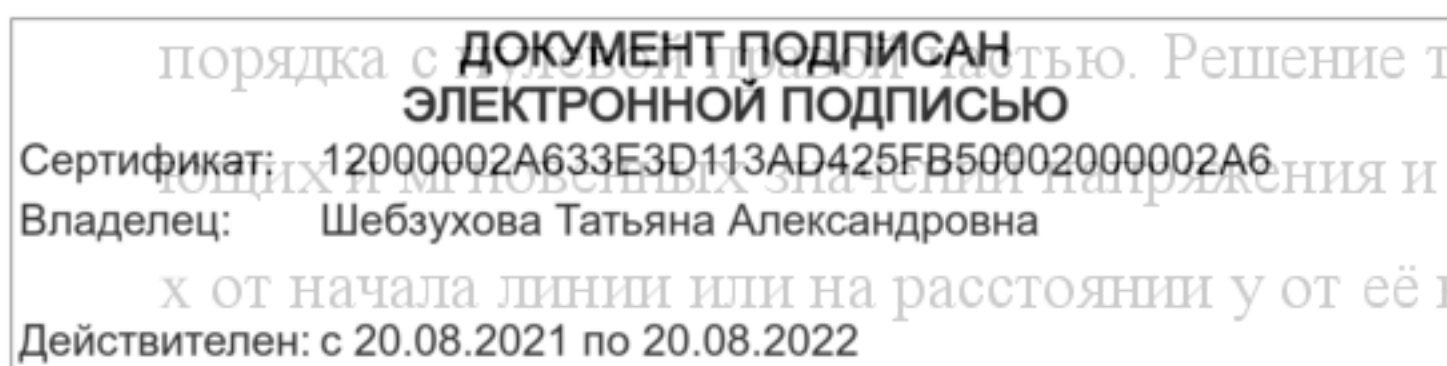
Если параметры  $r_0$ ,  $g_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  одинаковы по всей длине линии, то линия называется однородной. В справочной литературе существуют формулы, по которым можно рассчитать первичные параметры линии по известным конструктивным параметрам.

Наиболее общие уравнения двухпроводной линии, которые справедливы для любого режима работы, имеют вид:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 \cdot i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 \cdot u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned}$$

Если же линия работает при синусоидальных токах и напряжениях, то уравнения упрощают, сводя их в комплексной форме к одному дифференциальному уравнению второго

порядка с действительными частотой. Решение таких уравнений можно записать для действующих и мгновенных значений напряжения и тока в любой точке, отстоящей на расстоянии  $x$  от начала линии или на расстоянии  $y$  от её конца:



$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{A}_1 e^{\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{-\underline{\gamma}x} = \underline{U}_{обр} + \underline{U}_{пр}; \\ \underline{I}(x) = -\frac{1}{\underline{Z}_0} \cdot \frac{d\underline{U}}{dx} = -\frac{1}{\underline{Z}_0} [\underline{\gamma}\underline{A}_1 e^{\underline{\gamma}x} - \underline{\gamma}\underline{A}_2 e^{-\underline{\gamma}x}] = -\underline{I}_{обр} + \underline{I}_{пр}; \end{cases}$$

$$u(x,t) = \sqrt{2} A_1 e^{\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{обр} + \beta x) + \sqrt{2} A_2 e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{пр} - \beta x);$$

$$i(x,t) = -\sqrt{2} \frac{A_1}{Z_C} e^{\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{обр} - \varphi_C + \beta x) + \sqrt{2} \frac{A_2}{Z_C} e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{пр} - \varphi_C - \beta x);$$

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \underline{\gamma}x - \underline{Z}_C \underline{I}_1 \operatorname{sh} \underline{\gamma}x; \\ \underline{I}(x) = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \underline{\gamma}x + \underline{I}_1 \operatorname{ch} \underline{\gamma}x; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma}y + \underline{Z}_C \underline{I}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma}y; \\ \underline{I}(y) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \underline{\gamma}y + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma}y. \end{cases}$$

Здесь:  $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$ , Ом/км,  $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ , См/км;

$\underline{Z}_C = Z_C \cdot e^{j\varphi_C} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$ , Ом – характеристическое (волновое) сопротивление линии;

$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta$ , 1/км – коэффициент распространения волны в линии;

$\alpha$ , Нп/км – коэффициент затухания волны;

$\beta$ , рад/км – коэффициент изменения фазы волны в линии;

$A_1, A_2, \psi_{пр}, \psi_{обр}$  – постоянные интегрирования;

$U_1, U_2, I_1, I_2$  – напряжение и ток, соответственно, в начале и в конце линии.

Величины  $\underline{Z}_C$  и  $\underline{\gamma}$  называют вторичными параметрами линии, их можно рассчитать через первичные параметры линии  $r_0, g_0, L_0, C_0$ , и наоборот.

Из уравнений (8.3) для мгновенных значений следует, что в любом сечении линии ток и напряжение есть наложение двух встречных затухающих синусоид-волн – прямой (падающей) и обратной (отражённой). Иными словами: в линии имеют место волновые процессы, причём:

$$u(x,t) = u_{пр} + u_{обр}; \quad i(x,t) = i_{пр} - i_{обр}$$

Бегущую электромагнитную волну можно охарактеризовать напряжением, током, длиной волны  $\lambda$  и фазовой скоростью её распространения  $v$ :

$$\lambda = 2\pi/\beta = v/f, \quad v = \omega/\beta.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Постоянный коэффициент фазы  $\beta$  выражается через  $\omega, \underline{Z}_0, \underline{Y}_0$ , то длина волны и скорость её распространения зависят от частоты и параметров самой линии.

Для воздушных линий характерно:

$$Z_C > 150 \text{ Ом}, \quad v \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} = c = 300 \cdot 10^3 \text{ км/с},$$

для кабельных линий обычно:  $Z_C < 120\text{-}150 \text{ Ом}, \quad v \approx \frac{1}{2}c = 150 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$

Входное сопротивление и параметры линии могут быть определены по её конструктивным параметрам (по справочным данным) или по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания ( $Z_H$  – сопротивление нагрузки,  $l$  – длина линии):

$$\underline{Z}_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_C \cdot \text{th} \underline{\gamma} l}{\underline{Z}_H \cdot \text{th} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_C} = \underline{Z}_{XX} \cdot \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{XX}}; \quad \underline{Z}_{XX} = \frac{\underline{Z}_C}{\text{th} \underline{\gamma} l}; \quad \underline{Z}_{K3} = \underline{Z}_C \cdot \text{th} \underline{\gamma} l.$$

Через сопротивления  $\underline{Z}_{XX}$  и  $\underline{Z}_{K3}$  вторичные, а затем и первичные параметры линии определяются по выражениям:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}_{XX} \cdot \underline{Z}_{K3}}; \quad \text{th} \underline{\gamma} l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_{XX}}}; \quad \frac{1 + \text{th} \underline{\gamma} l}{1 - \text{th} \underline{\gamma} l} = e^{2\alpha l} \cdot e^{j2\beta l};$$

$$\underline{\gamma} \cdot \underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} \cdot \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0; \quad \underline{\gamma} / \underline{Z}_C = \underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0.$$

Отношение напряжения падающей волны в конце линии к напряжению отражённой волны в конце линии называется коэффициентом отражения волны:

$$K = \frac{\underline{A}_1 e^{\underline{\gamma} l}}{\underline{A}_2 e^{-\underline{\gamma} l}} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_C}.$$

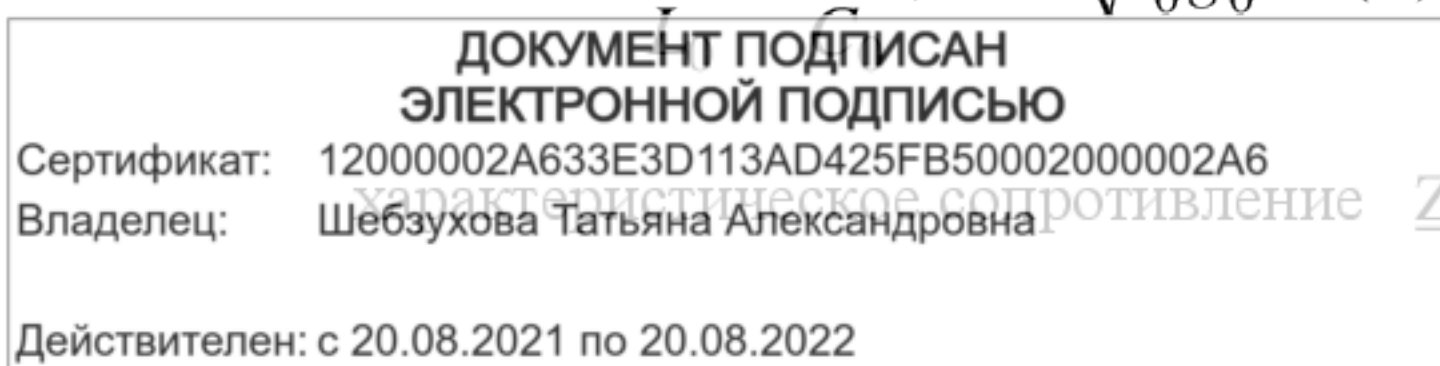
Соотношения для линий при согласованной нагрузке  $\underline{Z}_H = \underline{Z}_C$ :

$$\underline{Z}_{BX} = \underline{Z}_C; \quad \eta = e^{-2\alpha l}; \quad \begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 e^{\underline{\gamma} y} = \underline{U}_2 \cdot e^{\alpha y} \cdot e^{j\beta y}; \\ \underline{I}(y) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot e^{\underline{\gamma} y} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot e^{\alpha y} \cdot e^{j\beta y}. \end{cases}$$

В технике связи, где возможны сигналы широкого диапазона частот, выделяют понятия линии без искажений сигналов (ЛБИ), в которой сигналы на всех частотах распространяются с одинаковой скоростью и затухают в равной степени, и линии без потерь (ЛБП), в которой  $\omega L_0 \gg r_0$ ,  $\omega C_0 \gg g_0$  и величинами  $r_0$ ,  $g_0$  можно пренебречь.

Соотношения для ЛБИ:

$$\frac{r_0}{L_0} = \frac{g_0}{C_0}; \quad \alpha = \sqrt{r_0 g_0} \neq f(\omega), \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \neq f(\omega),$$



$$\underline{Z}_C = \sqrt{L_0 / C_0} \text{ резистивное.} \quad (8.11)$$

Соотношения для ЛБП:  $r_0 = 0, \quad g_0 = 0; \quad \alpha = 0 \neq f(\omega), \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0};$

$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \neq f(\omega);$  ЛБП является частным случаем ЛБИ;

характеристическое сопротивление  $\underline{Z}_C = \sqrt{L_0 / C_0}$  резистивное;

основные уравнения ЛБП:

$$\begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{Z}_C \underline{I}_2 \sin \beta y; \\ \underline{I}(y) = j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \sin \beta y + \underline{I}_2 \cos \beta y; \end{cases}$$

входное сопротивление ЛБП:

$$\underline{Z}_{ВХ} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\underline{Z}_H + j \underline{Z}_C \cdot \operatorname{tg} \beta l}{\underline{Z}_H \cdot j \operatorname{tg} \beta l + \underline{Z}_C}, \quad \underline{Z}_{ХХ} = -j \frac{\underline{Z}_C}{\operatorname{tg} \beta l}; \quad \underline{Z}_{КЗ} = j \underline{Z}_C \cdot \operatorname{tg} \beta l.$$

В курсе ТОЭ основы теории ЛРП рассматриваются применительно к однородным двухпроводным линиям, работающим при синусоидальных токах и напряжениях. Все расчетные соотношения могут быть распространены на симметричные трехфазные линии с учётом одной фазы, а также на линии постоянного тока. Линиям постоянного тока индуктивность  $L_0$  и ёмкость  $C_0$  также присущи, но не проявляют себя. Здесь учитываются лишь параметры  $r_0, g_0$ .

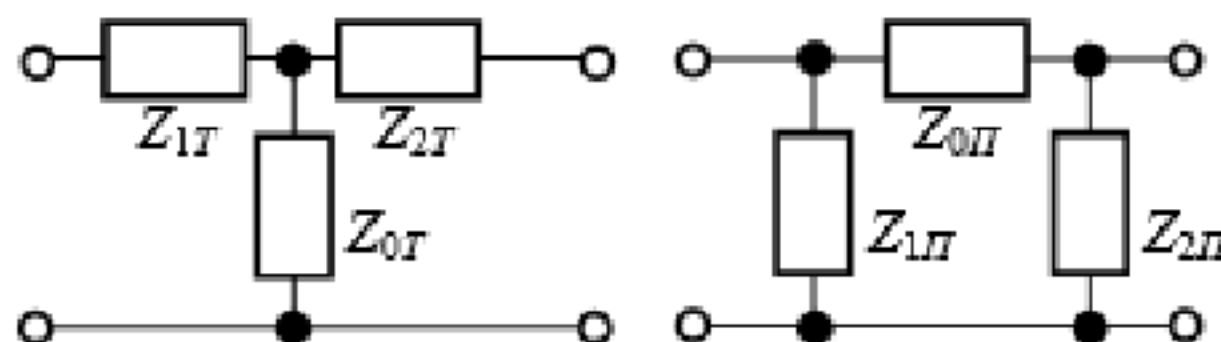
Линия с распределёнными параметрами является симметричным четырёхполюсником. Поэтому, сопоставляя уравнения ЛРП (8.4) при  $y = l$  с уравнениями четырёхполюсника формы А (см. /1/, разд. 5)

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2,$$

получаем следующие соотношения:

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} \gamma l, \quad \underline{B} = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \gamma l, \quad \underline{C} = \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\underline{Z}_C}.$$

ЛРП как четырёхполюсник может быть представлена Т- или П- эквивалентной схемой (рис. 8.1), сопротивления которых вычисляются по формулам:



$$\underline{Z}_{0T} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} = \frac{1}{\frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\underline{Z}_C}} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\operatorname{ch} \gamma l - 1}{\operatorname{sh} \gamma l}; \quad \underline{Z}_{0П} = \frac{1}{\underline{C}} = \frac{\underline{Z}_C}{\operatorname{sh} \gamma l};$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$Z_{1\Pi} = Z_{2\Pi} = \frac{\underline{B}}{\underline{D} - 1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l - 1}; \quad Z_{0\Pi} = \underline{B} = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \gamma l.$$

### Задания:

#### Задание №1

Для определения параметров линии связи длиной 160 км на частоте 1000 Гц поставлены опыты холостого хода и короткого замыкания, в результате которых получено:  $\underline{Z}_{\text{ХХ}} = 887 \cdot e^{-j35^\circ} \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{\text{КЗ}} = 540 \cdot e^{j21^\circ} \text{ Ом}$ . Определить первичные и вторичные параметры линии.

#### Задание №2

Из опытов холостого хода и короткого замыкания для линии связи длиной  $l = 120 \text{ км}$  на частоте 800 Гц найдено:  $\underline{Z}_{\text{ХХ}} = 182 e^{j3,55^\circ} \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{\text{КЗ}} = 209 e^{-j22,1^\circ} \text{ Ом}$ . Требуется определить вторичные и первичные параметры линии, а также вычислить входное сопротивление линии, если её нагрузить на  $\underline{Z}_H = 2\underline{Z}_C$ .

#### Задание №3

Экспериментальным путём удалось получить некоторые параметры линии связи длиной  $l = 140 \text{ км}$ , работающей на частоте  $f = 1500 \text{ Гц}$ :  $\underline{Z}_C = 710 \cdot e^{-j9^\circ} \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_0 = 19,2 \cdot e^{j70^\circ} \text{ Ом/км}$ . Требуется рассчитать первичные и вторичные параметры, определить входное сопротивление в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания.

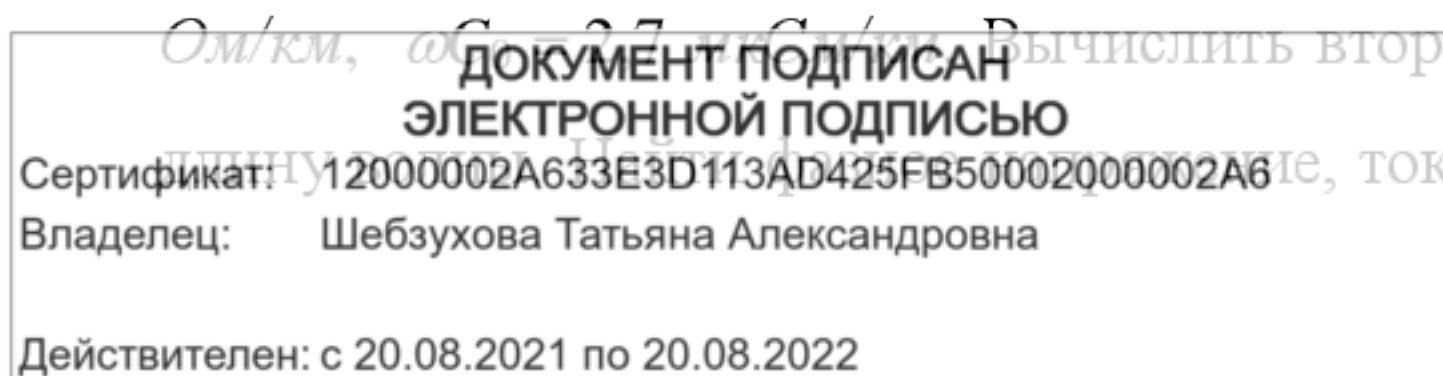
#### Задание №4

Для двухпроводной воздушной линии связи известны вторичные параметры на частоте 50 Гц:  $\underline{Z}_C = 440 \cdot e^{-j10^\circ} \text{ Ом}$ ,  $\gamma = (4 + j18) \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}$ . Эта линия работает на постоянном токе и питает нагрузку  $r_H = 400 \text{ Ом}$ . Напряжение на входе линии  $U_1 = 600 \text{ В}$ . Определить  $U_2$  и  $I_1$ , если длина линии  $l = 200 \text{ км}$ . Определить сопротивления Т- и П-схем замещения ЛРП длиной  $l = 400 \text{ км}$  с параметрами:  $\underline{Z}_C = 391 e^{-j3,75^\circ} \text{ Ом}$  и  $\gamma = (0,187 + j1,058) \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}$ .

#### Задание №5

Трёхфазная сталеалюминиевая воздушная линия электропередачи длиной 300 км имеет следующие параметры (на фазу):  $r_0 = 0,08 \text{ Ом/км}$ ,  $g_0 = 3,75 \cdot 10^{-8} \text{ См/км}$ ,  $\omega L_0 = 0,42$

$\text{Ом/км}$ ,  $\omega C_0 = 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$ . Вычислить вторичные параметры линии, фазовую скорость и КПД, и активную мощность в начале линии, КПД, ток и активную мощность в начале линии, КПД,



если на приёмном конце линейное напряжение  $330 \text{ кВ}$ , активная мощность  $300 \text{ МВт}$  и коэффициент мощности нагрузки равен  $0,92$ . Вычислить комплексы напряжения падающей и отражённой волн в начале и в конце ЛЭП.

### Задание №6

Для трёхфазной ЛЭП, согласованной с нагрузкой, известны комплексы фазного напряжения в начале линии  $\underline{U}_1 = 100 \text{ кВ}$  и фазного тока в конце линии  $\underline{I}_2 = 190e^{-j90^\circ} \text{ А}$ . Определить КПД линии, если её характеристическое сопротивление  $\underline{Z}_C = 500e^{-j10^\circ} \text{ Ом}$ .

### Задание №7

Двухпроводная линия длиной  $100 \text{ км}$  нагружена на повторное сопротивление  $\underline{Z}_C = 410e^{-j30^\circ} \text{ Ом}$ . Напряжение на входе линии –  $u_1(t) = 220\sqrt{2} \sin(314t + 120^\circ) \text{ В}$ , на выходе –  $u_2(t) = 188,7\sqrt{2} \sin(314t + 79,9^\circ) \text{ В}$ . Определить ток и напряжение, записать их мгновенные значения в точке  $A$  в  $20 \text{ км}$  от конца линии.

### Задание №8

Линия длиной  $25 \text{ км}$  получает питание от источника ЭДС  $e_1 = 141,4 \sin 5000t \text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $r_{BH} = 100 \text{ Ом}$ . Параметры линии:  $\underline{Z}_C = 335,5 - j497,4 \text{ Ом}$ ,  $\gamma = (3,48 + j19,70) \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}$ ,  $\underline{Z}_H = \underline{Z}_C$ . Определить токи, напряжения, мощности на входе и в конце линии, найти КПД линии.

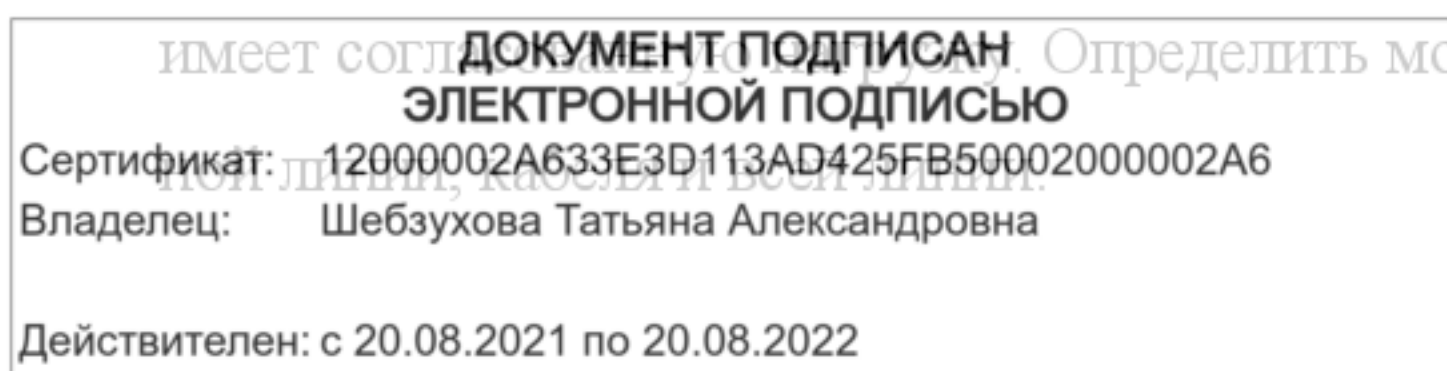
### Задание №9

Линия длиной  $l = 20 \text{ км}$  и вторичными параметрами  $\underline{Z}_C = 1350e^{-j24^\circ} \text{ Ом}$  и  $\gamma = 0,0175 + j0,039 \text{ 1/км}$  нагружена на сопротивление, равное волновому. Определить мощность  $P_2$ , передаваемую в нагрузку, и мощность  $P_1$ , подводимую к линии, если напряжение  $U_1 = 10 \text{ В}$

### Задание №10

Генератор постоянного тока с напряжением  $10 \text{ кВ}$  питает последовательно соединённые воздушную линию и кабельную. Параметры воздушной ЛРП:  $l_1 = 20 \text{ км}$ ,  $r_{01} = 4 \text{ Ом/км}$ ,  $g_{01} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ . Параметры кабеля:  $l_2 = 40 \text{ км}$ ,  $r_{02} = 0,5 \text{ Ом/км}$ ,  $g_{02} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ . Кабель

имеет согласованную нагрузку. Определить мощность генератора и приёмника, КПД воздуш-



### **Задание №11**

По силовой ЛЭП длиной 50 км передаются сигналы автоматики и телемеханики. На частоте сигнала коэффициент затухания  $\alpha = 96 \text{ мНп/км}$ , а  $Z_c = 640e^{-j10^\circ} \text{ Ом}$ . На частоте сигнала приёмник согласован с линией. Уровень сигнала в начале линии (по мощности) равен 4,6 Нп. Определить напряжение сигнала на приёмном устройстве.

### **Задание №12**

Мощность передающего устройства 1 мВт. На приёмник, согласованный с линией, имеющей  $\alpha = 0,02 \text{ Нп/км}$ , необходимо передать сигнал мощностью не менее 1 мкВт.

Определить допустимую дальность связи и соотношение напряжений  $U_1/U_2$  сигнала на входе и на выходе линии.

### **Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается разница между цепями с сосредоточенными и распределенными параметрами?
2. По какому критерию цепь относят к классу цепей с распределенными или сосредоточенными параметрами?
3. Нарисуйте схему замещения длинной линии.
4. Объясните понятия прямой и обратной бегущих волн.
5. Что такое согласованный режим работы цепи с распределенными параметрами, чем он характеризуется?

## Практическая работа №20. Расчет переходных процессов в длинных линиях

**Цель:** Приобрести навыки расчета и анализа переходных процессов в длинных линиях.

### Основы теории:

При анализе переходных процессов в ЛРП делаются следующие допущения:

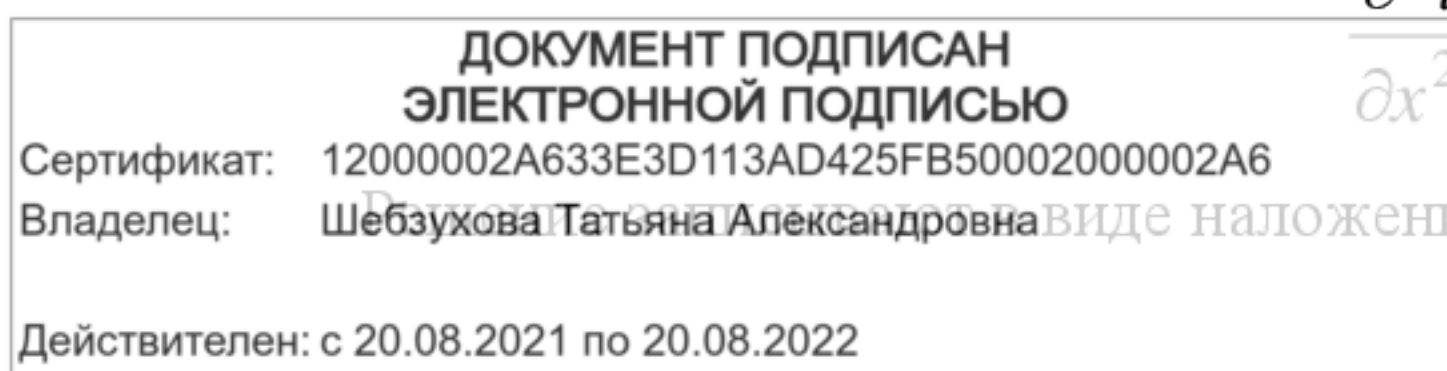
- рассматриваются переходные процессы, возникающие только в результате коммутаций;
- при анализе переходных процессов в ЛРП не требуется высокая точность, что позволяет сделать нижеприведенные допущения;
- пренебрегают резистивными элементами ЛРП  $r_0$  и  $g_0$ , то есть рассматриваются только линии без потерь. В этом случае расчёт упрощается, поскольку в ЛБП волны распространяются без затухания, а характеристическое сопротивление является чисто резистивным, благодаря чему не искажается фронт волны при её движении;
- в течение переходного процесса источники считаются постоянными, поскольку длительность пробега волны вдоль линии почти всегда значительно меньше периода переменного источника;
- при рассмотрении многократных отражений в линиях ограничиваются только резистивными цепями. Если источники считаются постоянными, то в линии будут только волны с прямоугольным фронтом.

Исходными для расчётов являются уравнения линии без потерь в частных производных:

$$\begin{aligned}-\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t}.\end{aligned}$$

Уравнения (8.13) сводятся к виду дифференциальных уравнений второго порядка без правой части

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}.\end{aligned}$$



наложения двух встречных волн, прямой и обратной:

$$u(x;t) = \varphi_1(t - \frac{x}{v}) + \varphi_2(t + \frac{x}{v}) = u_{np} + u_{обр};$$

$$i(x;t) = \frac{1}{Z_C} \cdot [\varphi_1(t - \frac{x}{v}) - \varphi_2(t + \frac{x}{v})] = i_{np} - i_{обр}$$

Поскольку линии без потерь имеют чисто активное волновое сопротивление, то закон Ома в пределах каждой из волн (но не для результирующих  $u$ ,  $i$ ) применим и к мгновенным значениям величин:

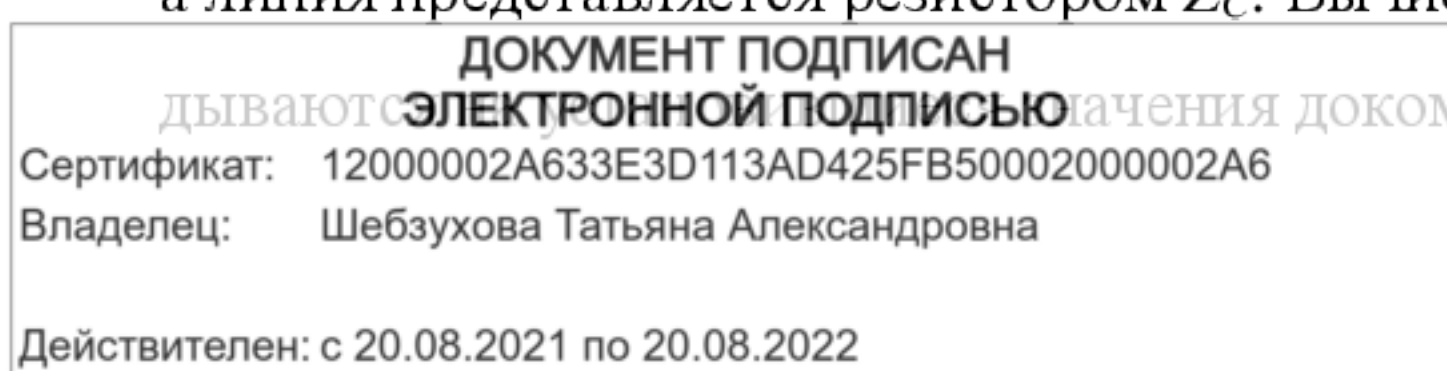
$$u_{np} = Z_C \cdot i_{np}; \quad u_{обр} = Z_C \cdot i_{обр}; \quad u \neq Z_C \cdot i.$$

Уравнения для тока и для напряжения волны совершенно одинаковы, причём, в них производные по координате пропорциональны производным по времени от тех же величин. Это означает, что в переходном процессе достаточно найти зависимость либо тока, либо напряжения от времени при фиксированной координате, а затем, для получения зависимости от координаты для фиксированного момента времени, перейти к аргументу  $[t_{\phi} - x/v]$ .

*Началом* линии будем называть место подключения к линии источника, а *концом* линии – место, где подключается нагрузка. Волны, движущиеся от начала линии к концу (в направлении возрастания координаты  $x$ , отсчитываемой от начала линии), называются *прямыми*. Волны, движущиеся обратно (в направлении возрастания координаты  $y$ , отсчитываемой от конца линии), называются *обратными*. Возникающую в результате коммутации волну назовём *падающей*, а возникшую в результате отражения падающей – *отражённой*. Таким образом, если коммутация происходит в начале линии, падающая волна является прямой, а отражённая обратной. В случае коммутации в конце линии обратная волна есть падающая, а прямая – отражённая.

Расчёт как возникающих волн, так и отражённых и преломлённых, выполняется по схемам замещения, составленным для сечений линии, где эти волны возникают. Если волна вызвана коммутацией в произвольном сечении линии, то её расчёт на основании принципа наложения сводится к рассмотрению переходного процесса *от включения* соответствующей пассивной цепи *на эквивалентный источник ЭДС*  $e_{экс} = u_{руб}$  (при замыкании рубильника, см. задачи 8.30-8.33) или *тока*  $j_{экс} = i_{руб}$  (при размыкании рубильника, см. задачи 8.34-8.36). Здесь  $u_{руб}$  – напряжение на разомкнутом рубильнике,  $i_{руб}$  – ток через замкнутый рубильник в докоммутационном режиме. В схему замещения для соответствующего сечения линии включаются все элементы с сосредоточенными параметрами, имеющиеся в данном сечении, а линия представляется резистором  $Z_C$ . Вычисленные в переходном процессе  $i(t)$ ,  $u(t)$  накла-

дываются к значениям докоммутационного режима.



Расчёт переходного процесса, возникающего в результате прихода падающей волны в конец линии (в узел неоднородности 2-2'), нагруженной на произвольное сопротивление  $Z$  (рис. 8.2,а), выполняется по эквивалентной схеме с сосредоточенными параметрами (рис. 8.2,б) при нулевых независимых начальных условиях. Далее, из формул  $i_{22'} = i_{nad} - i_{omp}$  и  $u_{22'} = u_{nad} + u_{omp}$ , основанных на принципе наложения, зная параметры падающей волны, можно рассчитать напряжение и ток отражённой волны в функции времени  $t$  для нулевой координаты  $y = 0$ . Сопротивление  $Z$  может включать в себя другие линии, представленные своими характеристическими сопротивлениями. Рассчитанные для них токи и напряжения по схеме 8.2,б являются параметрами преломлённых волн, записанные в функции времени для нулевой координаты  $x = 0$  (см. задачи 8.44-8.48).

При анализе многократных отражений расчет последующих волн ведётся через коэффициенты отражения от внутренних цепей источника ( $n_1$ ) и от нагрузки ( $n_2$ ):

$$n_1 = \frac{R_{BH} - Z_C}{R_{BH} + Z_C}; \quad n_2 = \frac{R_H - Z_C}{R_H + Z_C};$$

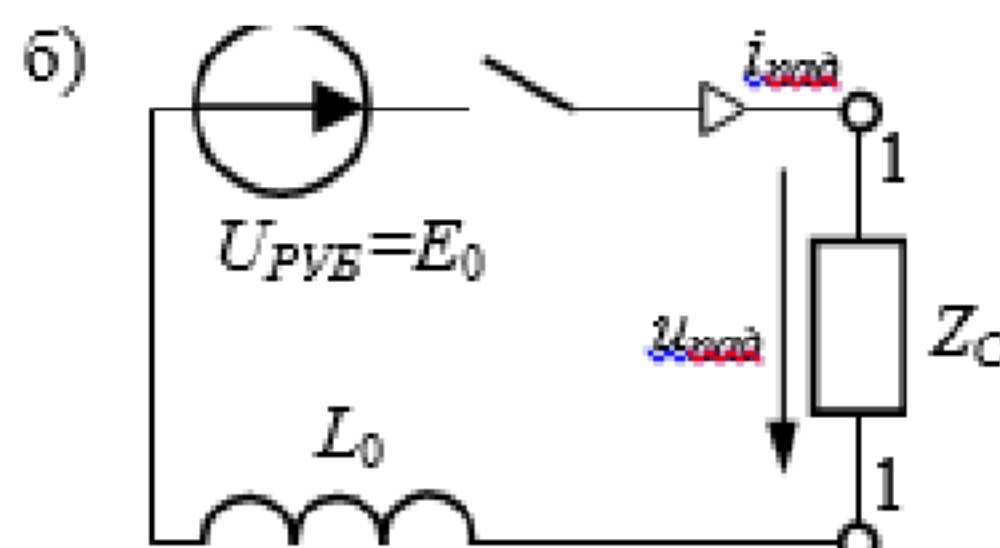
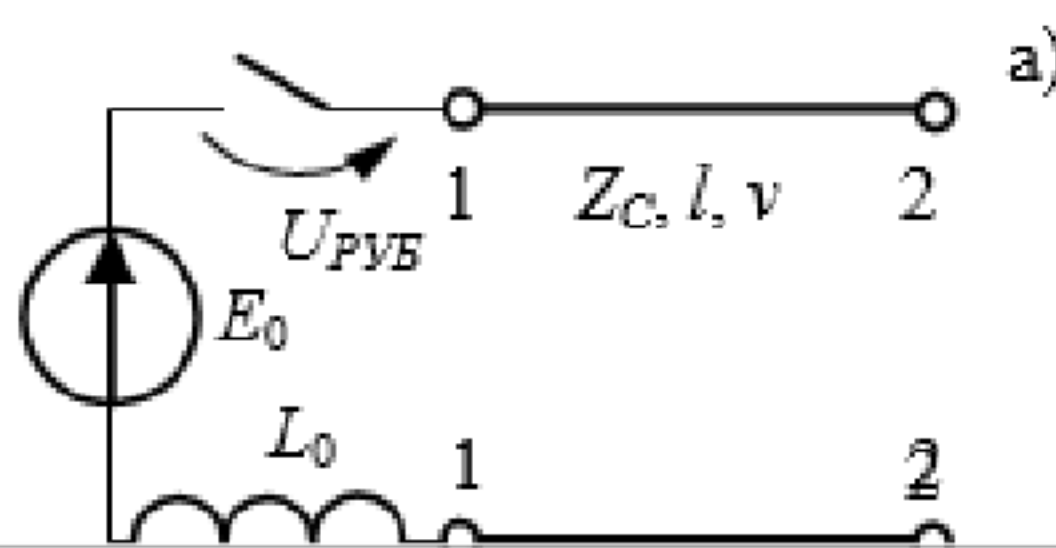
$$u_{omp\ k} = n_2 \cdot (n_1 \cdot n_2)^{k-1} \cdot u_{nad\ 1}; \quad u_{nad\ k+1} = (n_1 \cdot n_2)^k \cdot u_{nad\ 1}.$$

Результирующие ток и напряжение на любой момент времени находятся наложением всех прошедших к данному моменту волн. Переходный процесс может иметь апериодический или колебательный характер. Переходный процесс считают закончившимся, когда результирующие ток и напряжение достигают 95-98% от установившихся значений:  $T_{III} = k \cdot t_{пробега}$ .

### Задания:

#### Задание №1

Линия без потерь с параметрами  $Z_C = 250\ \text{Ом}$ ,  $l = 140\ \text{км}$ ,  $v = 280 \cdot 10^3\ \text{км/с}$  подключается к источнику постоянного напряжения  $E_0 = 120\ \text{кВ}$  с внутренней индуктивностью  $L_0 = 0,15\ \text{Гн}$ . Конец линии разомкнут. Требуется построить графики распределения напряжения  $u(t_\phi, y)$  и тока  $i(t_\phi, y)$  вдоль линии для двух моментов времени:  $t_1 = 0,75l/v$  и  $t_2 = 1,5l/v$ .



Принципиальная схема к задаче

### Задание №2

К линии без потерь, работающей в режиме холостого хода, подключается  $rC$ -нагрузка. Определить параметры возникающей обратной волны и построить график распределения волны по линии через  $t_{\phi} = 150 \text{ нс}$  после подключения нагрузки. Числовые данные:  $E_0 = 100 \text{ В}$ ,  $Z_C = 250 \text{ Ом}$ ,  $l = 25 \text{ км}$ ,  $v = 100 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ ,  $r_H = 150 \text{ Ом}$ ,  $C_H = 0,125 \text{ мкФ}$ .

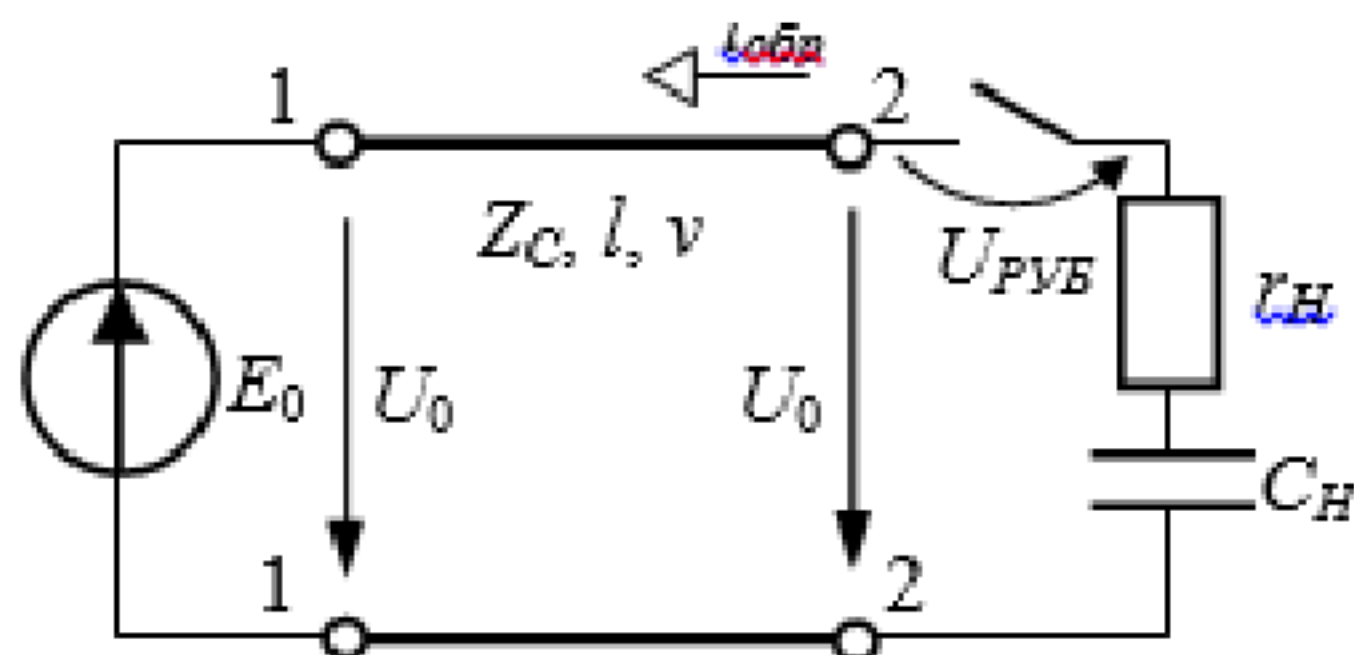


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

### Задание №3

Воздушная линия ( $l = 70 \text{ км}$ ,  $Z_C = 400 \text{ Ом}$ ), присоединённая к генератору с напряжением  $U_0 = 100 \text{ кВ}$  ( $r_0 = 0$ ), длительно работала в режиме холостого хода.

Построить графики распределения напряжения и тока вдоль линии для момента времени спустя  $0,2 \text{ мс}$  после подключения к концу линии неразветвлённой активно-индуктивной нагрузки:  $r = 200 \text{ Ом}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ .

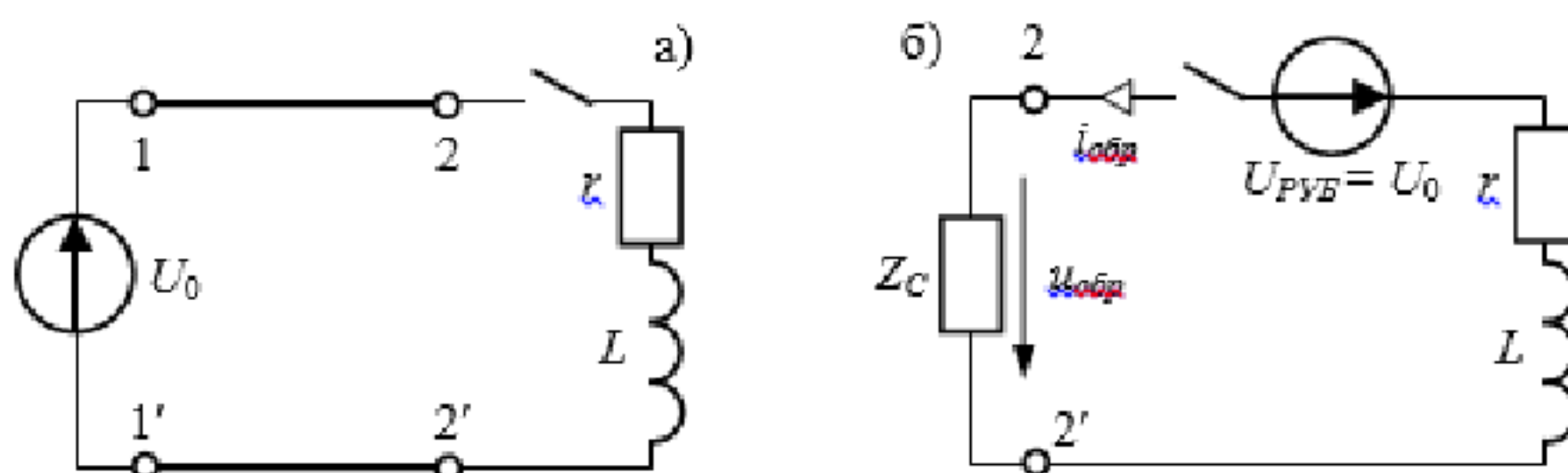


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

### Контрольные вопросы:

1. Какие цепи называют цепями с распределенными параметрами? В чем состоят их особенности? Почему длинные линии относят к цепям с распределенными параметрами?
2. Как составляют дифференциальные уравнения длинных линий? Как осуществляется переход от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям?

4. Дайте общую характеристику режима бегущих волн. Каковы законы изменения амплитуд и фазовых углов в этом режиме?
5. В чем состоят особенности режимов стоячих и смешанных волн?
6. Какие особенности нестационарных процессов наблюдаются в линии с согласованной нагрузкой, в несогласованной линии, в разомкнутой и короткозамкнутой линиях?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Практическая работа №21. Электростатическое поле

**Цель:** Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электростатического поля.

### Основы теории:

Электростатическое поле является частным случаем электромагнитного, оно создается в диэлектрике неподвижными в пространстве и неизменными во времени зарядами. Различают:

- линейный заряд:

$$\tau = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sum q}{l} = \frac{dq}{dl};$$

- поверхностный заряд:

$$\sigma = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\sum q}{S} = \frac{dq}{dS};$$

- объемный заряд:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum q}{V} = \frac{dq}{dV}.$$

Основными величинами, характеризующими свойства этого поля, являются его напряженность и потенциал. Если в электростатическое поле поместить настолько малый пробный заряд, что он своим присутствием не исказит его, то на него будет действовать сила  $\vec{F}$ , отношение которой к величине заряда и даёт напряженность поля  $\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q}$ .

Размерность напряженности

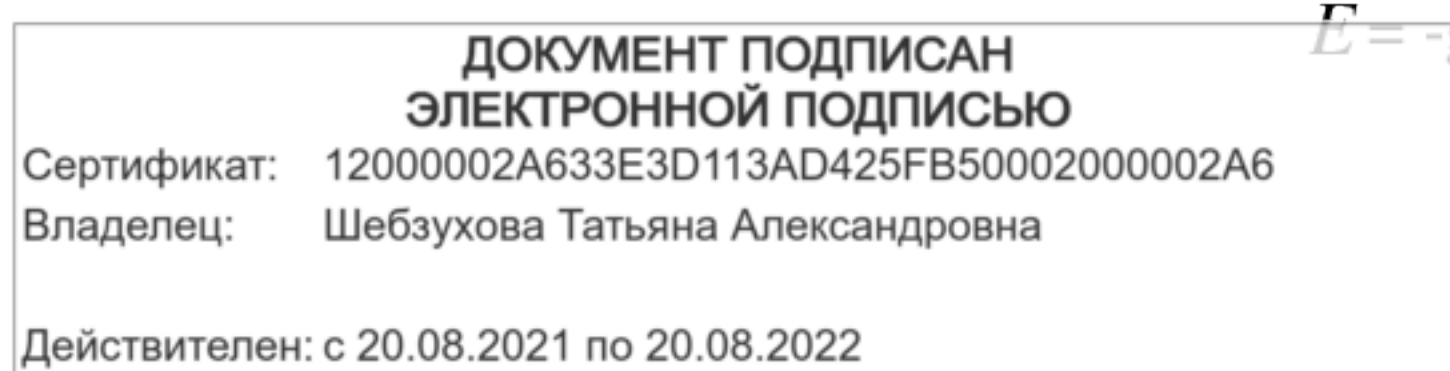
$$[E] = \frac{H}{Kл} = \frac{Дж}{м \cdot Кл} = \frac{В \cdot А \cdot с}{м \cdot А \cdot с} = \frac{В}{м}.$$

Электростатическое поле является потенциальным или безвихревым во всем объеме.

Записывается это следующим образом:  $\text{rot } \vec{E} = 0, \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ .

Для характеристики электростатического поля используется скалярный электрический потенциал  $\varphi$ , удовлетворяющий условию

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\nabla \varphi.$$



Диэлектрические тела в электростатическом поле могут поляризоваться, то есть может происходить упорядоченное изменение расположения связанных зарядов под действием сил поля. Степень поляризации характеризуется вектором поляризации  $\vec{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{ql}}{V}$ . Для большинства диэлектриков вектор поляризации пропорционален напря-

женности поля:  $\vec{P} = \epsilon_0 k_{\epsilon} \vec{E}$ ,

где  $k_{\epsilon}$  - электрическая восприимчивость.

В теории поля в расчет еще вводят вектор  $\vec{D}$ , который называется вектором электрического смещения или вектором электрической индукции:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 k_{\epsilon} \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} (1 + k_{\epsilon}) = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_a \vec{E},$$

где:  $\epsilon = 1 + k_{\epsilon}$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, в которой создано поле.

**Теорема Гаусса** представляет собой основной закон электро-статического поля. Ее интегральная и дифференциальная формы записи:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum q, \quad \text{div } \vec{D} = \rho.$$

Из теоремы Гаусса и соотношения (12.1) вытекают **уравнения Пуассона и Лапласа**.

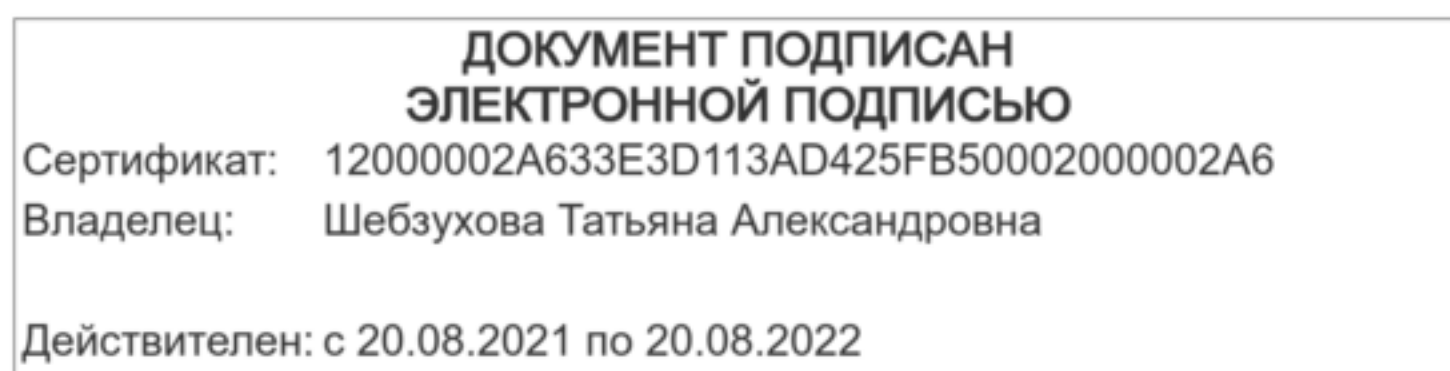
Уравнение Пуассона:  $\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_a}$ .

Частный вид уравнения Пуассона при  $\rho = 0$  называется уравнением Лапласа:  $\nabla^2 \varphi = 0$ .

Решение уравнений Пуассона и Лапласа позволяет определить закон изменения потенциала по известному распределению заряда. При решении этих уравнений появляются постоянные интегрирования, которые определяются, исходя из граничных условий.

**Граничные условия:**

- граница диэлектрик-проводник: для всех точек диэлектрика, непосредственно прилегающих к поверхности проводника, равна нулю тангенциальная составляющая напряженности поля ( $E_t = 0$ ), а вектор электрического смещения численно равен поверхностной плотности индуктированного заряда ( $D = \sigma$ );



- граница диэлектрик-диэлектрик: для всех точек, являющихся общими для двух различных диэлектриков, равны по величине тангенциальные составляющие вектора напряженности ( $E_{1t} = E_{2t}$ ) и нормальные составляющие вектора электрического смещения ( $D_{1n} = D_{2n}$ ).

При расчёте электростатических полей в однородных средах при наличии нескольких зарядов целесообразным является применение **принципа наложения**. При этом найденные от отдельных зарядов величины суммируются: скалярные – алгебраически ( $\varphi = \sum \pm \varphi_q$ ,  $U = \sum \pm U_q$  и т.д.), векторные – векторно ( $\vec{E} = \sum \vec{E}_q$ ,  $\vec{D} = \sum \vec{D}_q$ ,  $\vec{F} = \sum \vec{F}_q$ ).

При расчете полей, где имеется геометрически правильной формы граница раздела различных сред, применяется **метод зеркальных изображений**, сущность которого заключается в том, что влияние границы учитывается введением фиктивных зарядов, расположенных симметрично реальным относительно границы. Величина фиктивных зарядов определяется с помощью коэффициентов неполного отражения (коэффициентов фиктивных зарядов), которые в случае плоской границы диэлектрик-диэлектрик вычисляются по формулам

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}; \quad k_2 = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

**Электрические ёмкости** рассчитываются для устройств, в которых электростатические поля не имеют зон с объёмно распределённым зарядом. Под ёмкостью  $C$  между двумя телами, на которых имеются равные и противоположные по знаку заряды, понимают абсолютную величину отношения заряда на одном из тел к напряжению между телами:

$$C = q/U.$$

Энергия электростатического поля может быть определена по её объемной плотности  $w_{\text{э}} = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E^2 = D^2 / (2\varepsilon \varepsilon_0)$ .

$$\text{Энергия поля в объеме } V \quad W_{\text{э}} = \int_V w_{\text{э}} dV.$$

Силу, действующую со стороны поля на тело, изменение положения которого влияет на энергию поля, можно определять через производную от энергии:  $\vec{F} = -\text{grad} W_{\text{э}}$ . Сила в

$$\text{некотором направлении } x: F_x = -\frac{\partial W_{\text{э}}}{\partial x}.$$

Для **системы проводников** с радиусами  $r_k$ , расположенных вблизи проводящей по-

верхности, основанные на применении метода зеркаль-

ных изображений.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

I группа формул Максвелла:  $\varphi_1 = \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \alpha_{13}\tau_3 + \dots + \alpha_{1n}\tau_n,$

$$\varphi_2 = \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2 + \alpha_{23}\tau_3 + \dots + \alpha_{2n}\tau_n,$$

-----

$$\varphi_n = \alpha_{n1}\tau_1 + \alpha_{n2}\tau_2 + \alpha_{n3}\tau_3 + \dots + \alpha_{nn}\tau_n.$$

В этих уравнениях  $\varphi_k$  – потенциал проводников,  $\tau_k$  – их заряды, потенциальные коэффициенты  $\alpha$  вычисляются по формулам

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{2h_k}{r_k}, \quad \alpha_{km} = \alpha_{mk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}},$$

где  $h_k$  – высота подвеса провода  $k$ ,  $a_{km}$  – расстояние между проводами  $k$  и  $m$ ,  $b_{km}$  – расстояние между проводом  $k$  и изображением провода  $m$ .

Коэффициенты  $\alpha_{kk}$  и  $\alpha_{km}$ , зависящие от геометрических размеров тел, их взаимного расположения и свойств среды, в которой они находятся, имеют размерность [м/Ф] и являются положительными.

II группа формул Максвелла:  $\tau_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3 + \dots + \beta_{1n}\varphi_n,$

$$\tau_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3 + \dots + \beta_{2n}\varphi_n,$$

-----

$$\tau_n = \beta_{n1}\varphi_1 + \beta_{n2}\varphi_2 + \beta_{n3}\varphi_3 + \dots + \beta_{nn}\varphi_n.$$

В этих уравнениях  $\beta_{km} = \frac{\Delta_{km}}{\Delta}$  – емкостные коэффициенты,

где  $\Delta$  – определитель системы I группы формул Максвелла,

$\Delta_{km}$  – алгебраическое дополнение.

Размерность емкостных коэффициентов [Ф/м].

III группа формул Максвелла:  $\tau_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} + \dots + C_{1n}U_{1n},$

$$\tau_2 = C_{21}U_{21} + C_{22}\varphi_2 + C_{23}U_{23} + \dots + C_{2n}U_{2n},$$

-----

$$\tau_n = C_{n1}U_{n1} + C_{n2}U_{n2} + C_{n3}U_{n3} + \dots + C_{nn}\varphi_n,$$

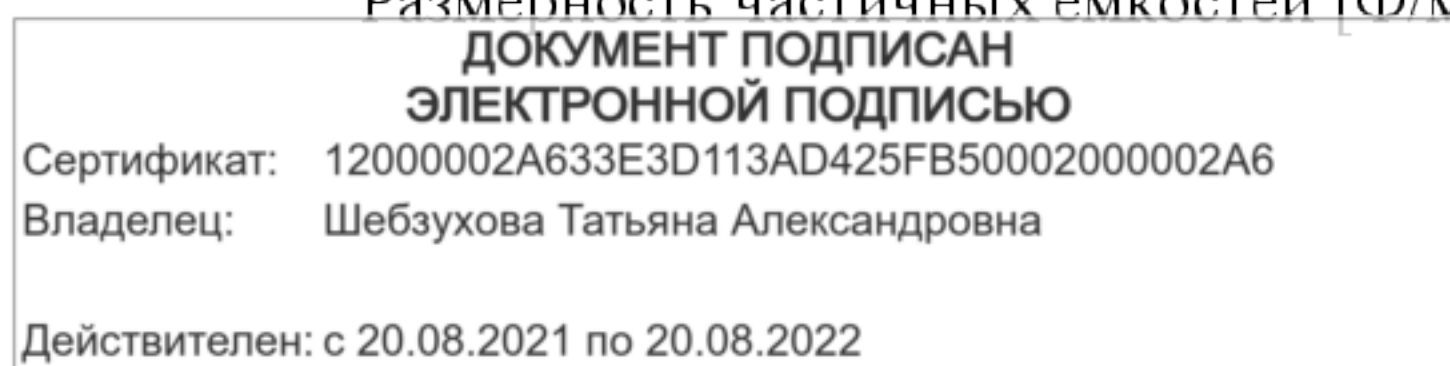
где  $U_{km}$  – напряжение между проводами  $k$  и  $m$ .

Входящие в эти уравнения коэффициенты  $C$  называются частичными емкостями:

$$C_{kk} = \sum_{m=1}^n \beta_{km} = \beta_{k1} + \beta_{k2} + \dots + \beta_{kk} + \dots + \beta_{kn} \text{ – собственная частичная емкость,}$$

$C_{km} = -\beta_{km}$  – взаимная частичная емкость  $k$ -го и  $m$ -го проводников.

Размерность частичных емкостей [Ф/м].



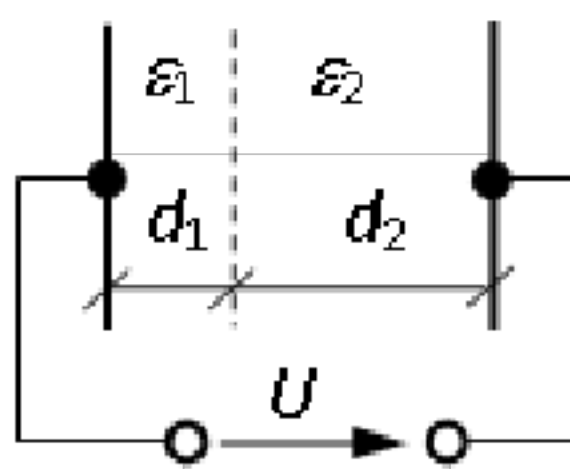
### **Задания:**

#### **Задание №1**

Вывести формулы для определения потока вектора электростатической индукции в функции координат а) от точечного заряда через сферическую поверхность радиуса  $R$ ; б) от линейного заряда через цилиндрическую поверхность радиуса  $r$ .

#### **Задание №2**

Какое максимальное напряжение можно подвести к двухслойному плоскому конденсатору, если:  $\varepsilon_1 = 2$ ,  $\varepsilon_2 = 4$ ,  $d_1 = 2,5 \text{ мм}$ ,  $d_2 = 5 \text{ мм}$ . Пробивная напряженность изоляции:  $E_{\text{проб}} = 30 \text{ кВ/см}$ . Запас электрической прочности принять равным  $n = 2,5$ . При найденном напряжении рассчитать объёмную плотность энергии второго диэлектрика.



### **Контрольные вопросы:**

- 1 Что называется емкостью?
- 2 Какова емкость плоского конденсатора?
- 3 Какова емкость цилиндрического конденсатора?
- 4 Какова емкость двухпроводной линии?
- 5 Чему равна емкость при последовательном соединении конденсаторов?
- 6 Чему равна емкость при параллельном соединении конденсаторов?

## Практическая работа №22. Электрическое поле в проводящих средах

**Цель:** Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электрического поля в проводящих средах.

### Основы теории:

Наличие стационарного электрического поля в проводящей среде вызывает упорядоченное движение зарядов, представляющее собой ток проводимости, который сопровождается выделением тепла. Поэтому для поддержания неизменного электрического поля (постоянной разности потенциалов) и компенсации тепловых потерь энергии нужен постоянный внешний источник, в котором создаётся стороннее электрическое поле процессами не-электростатического происхождения.

Основными характеристиками электрического поля являются вектор-ные величины – плотность тока проводимости  $\vec{\delta}$  [А/м<sup>2</sup>] и напряжённость поля  $\vec{E}$  [В/м], а также скалярный электрический потенциал  $\varphi$  [В]. Проводящую среду характеризуют удельной проводимостью  $\gamma$  [См/м]. В данном разделе рассматриваются поля только в линейных стационарных средах, для которых  $\gamma = \text{const}$ .

Ток через какую-либо поверхность (сечение) и напряжение на каком-либо участке пути по проводящей среде записываются как интегральные величины:

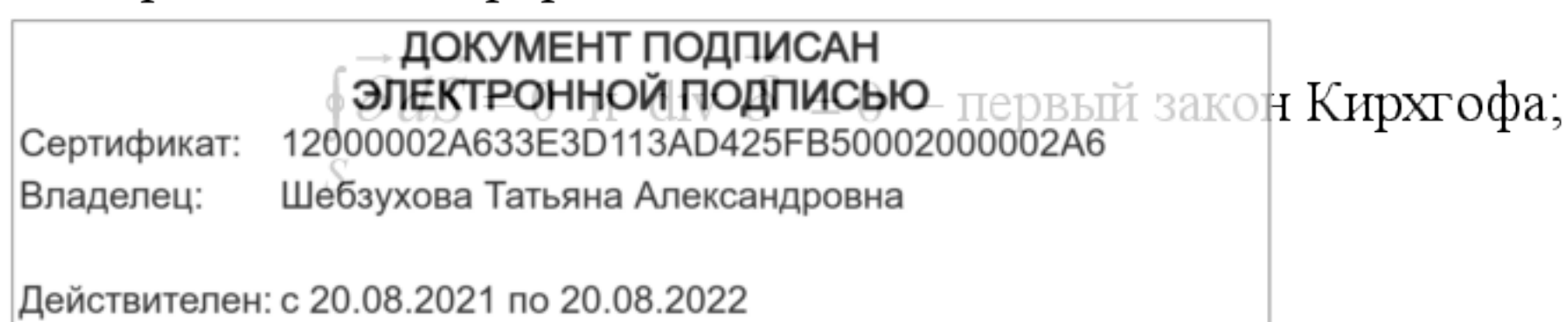
$$I = \int_S \vec{\delta} d\vec{S}, \text{ А}; \quad U_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}, \text{ В}.$$

Сопротивление участка проводящей среды длиной  $l$  и сечением  $S$  находится как  $R = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S}$ , Ом.

Основные законы электрического поля в проводящих средах – это закон Ома и законы Кирхгофа, а также закон Джоуля-Ленца. Законы используются в интегральной и дифференциальной формах:

$U = R \cdot I$  и  $\vec{\delta} = \gamma \cdot \vec{E}$  – закон Ома для областей вне источников энергии;

$\vec{\delta} = \gamma \cdot (\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}})$  – обобщённая форма закона Ома для областей поля, занятых источниками энергии. Это выражение одновременно отражает II закон Кирхгофа в дифференциальной форме.



$$P = \int_V \gamma E^2 dV \quad \text{и} \quad \frac{dP}{dV} = \vec{\delta} \cdot \vec{E} = \gamma \cdot E^2 \quad - \text{закон Джоуля-Ленца.}$$

В случае нескольких источников справедлив принцип наложения:

$$\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}'' + \vec{E}''' + \dots; \quad \varphi = \varphi' + \varphi'' + \varphi''' + \dots$$

В областях проводящей среды вне источников ЭДС электрическое поле имеет потенциальный (безвихревой) характер. В этом случае для него справедливы соотношения:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0, \quad \text{rot } \vec{E} = 0.$$

Получаемое из этих соотношений и первого закона Кирхгофа уравнение Лапласа описывает закон изменения потенциала в проводящей среде вне источников и имеет такой же вид, как и для электростатического поля:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Для полей в проводящих средах возможен лишь один тип границы: «среда с проводимостью  $\gamma_1$  – среда с проводимостью  $\gamma_2$ ». Основные величины поля  $\vec{\delta}$ ,  $\vec{E}$  и  $\varphi$  при этом подчиняются следующим граничным условиям:

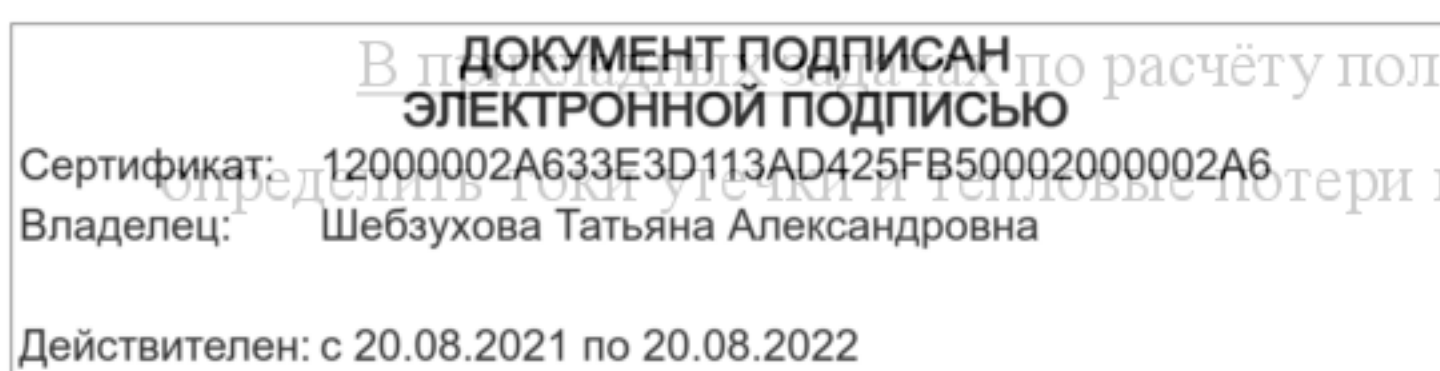
$$\delta_{1n} = \delta_{2n}, \quad E_{1t} = E_{2t}, \quad \varphi_1 = \varphi_2.$$

Между электростатическим и полем в проводящей среде в областях вне источников поля существует формальная аналогия, поскольку в обоих случаях работает уравнение Лапласа, граничные условия записываются идентичными формулами и основные величины связаны друг с другом аналогичным образом. Это обстоятельство используется при моделировании полей, а также при их анализе (подраздел 13.2).

Аналогичным же образом используется метод зеркальных изображений, в котором коэффициенты неполного отражения вычисляются по формулам

$$k_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad k_2 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

В общем случае задачей расчёта поля в проводящей среде является получение законов изменения  $\vec{\delta}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\varphi(x,y,z)$  или их интегральных характеристик  $I$ ,  $R$ ,  $U$ . Наиболее общим методом решения является интегрирование уравнения Лапласа  $\nabla^2 \varphi(x,y,z) = 0$ , которым описывается это поле (подраздел 13.3).



В проводящих средах чаще всего требуется  
в изоляции кабелей и конденсаторов, а также

параметры растекания тока заземлителей:  $R_z$  – сопротивление заземлителя,  $U_{ш}$  – шаговое напряжение на поверхности почвы над заземлителем (подраздел 13.5).

Если электрод и его поле имеют правильные формы, например, форму шара или цилиндра, расчёт облегчается, так как имеются уже готовые выражения:

- для поля шарового электрода в однородной неограниченной среде:

$$\delta(R) = \frac{I}{4\pi R^2}, \quad E(R) = \frac{I}{4\pi \gamma R^2}, \quad \varphi(R) = - \int E dR = \frac{I}{4\pi \gamma R} + A.$$

- для поля цилиндрического электрода в однородной неограниченной среде (задача 13.2):

$$\delta(r) = \frac{I_0}{2\pi r}, \quad E(r) = \frac{I_0}{2\pi \gamma r}, \quad \varphi(r) = - \int E dr = \frac{I_0}{2\pi \gamma} \cdot \ln \frac{H}{r}.$$

- ёмкость и удельная проводимость однослойного коаксиального кабеля и двухпроводной линии в однородной среде (задачи 12.8 и 12.47):

$$C_{0к} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad C_{0л} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon}{\ln(d / r_0)}, \quad g_{0к} = \frac{2\pi \gamma}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad g_{0л} = \frac{\pi \gamma}{\ln(d / r_0)}.$$

### **Задания:**

#### **Задание №1**

Два металлических шара с радиусами  $r_1 = 2$  см и  $r_2 = 4$  см погружены глубоко в морскую воду. Расстояние между шарами значительно больше их радиусов:  $d = 2$  м.

Определить сопротивление воды между шарами, если удельное сопротивление морской воды  $\rho = 100$  Ом·м.

#### **Задание №2**

Однослойный коаксиальный кабель работает под напряжением 600 В и имеет размеры:  $r_1 = 4$  мм,  $r_2 = 8$  мм,  $l = 10$  км, удельная проводимость изоляции  $\gamma = 1 \cdot 10^{-9}$  См/м. Определить ток утечки и его плотность в изоляции на поверхности жилы и на внутренней стороне оболочки кабеля, а также тепловые потери кабеля.

### **Контрольные вопросы:**

1. Каково значение величины  $\text{rot } H$  в однородном магнитном поле?

2. Являются ли  $\text{div } D$  векторной?

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3. Свободные заряды в некотором объеме отсутствуют, так что  $\text{div } D = 0$ . Справедливо ли равенство  $\text{div } E = 0$  в точках объема, если среда а) однородна б) неоднородна?

4. При каком характере распределения в пространстве электрического тока и заряда величины  $\text{rot } \mathbf{H}$ ,  $\text{div } \mathbf{D}$  теряют смысл?
5. Чему равна функция  $\text{grad } \varphi$  внутри проводящего тела?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Практическая работа №23. Магнитное поле

**Цель:** Изучить методику и приобрести практические навыки расчета магнитного поля.

### Основы теории:

Магнитное поле неразрывно связано с электрическим током: если где-то протекает ток, то обязательно возникает магнитное поле; если имеется магнитное поле, то оно обязательно создано током. Основной величиной, характеризующей магнитное поле, является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , определяемый по силовому воздействию со стороны магнитного поля на помещенный в него проводник с током. В расчетах магнитных полей широко используется вектор напряженности  $\vec{H}$ . Два указанных вектора связаны между собой соотношением:  $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$ , где  $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой создано поле;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная);  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды, в которой создано поле. Широкое распространение получил также магнитный поток, представляющий собой поток вектора  $\vec{B}$  через некоторую поверхность  $S$ :  $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$ .

Основным законом магнитного поля является закон полного тока. Его интегральная и дифференциальная формы записи:  $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$ ,  $\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta}$ , где  $I$  – полный ток, связанный с контуром  $L$ ;

$\vec{\delta}$  – плотность тока в рассматриваемой точке поля.

Используя закон полного тока в интегральной форме, легко получить опорные формулы, по которым можно вычислить напряженность поля, созданного в однородной среде цилиндрическим проводником (задача 14.5) и плоской шиной (задача 14.6).

В областях, не занятых токами ( $\delta = 0$ ), магнитное поле является *безвихревым* или *потенциальным* и его можно рассчитывать с помощью скалярного магнитного потенциала  $\varphi_M$ , причем  $\vec{H} = -\text{grad } \varphi_M$ . Рассчитывают  $\varphi_M$  с помощью уравнения Лапласа  $\nabla^2 \varphi_M = 0$ . Разность скалярных магнитных потенциалов называется магнитным напряжением

$U_M = \varphi_{M1} - \varphi_{M2} = \int_{12} \vec{H} \cdot d\vec{l}$ .  
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
созданного уединённым проводником в однородной  
среде подробно рассмотрен в задаче 14.17.  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

С помощью векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  можно рассчитать магнитное поле в любой области, в том числе и занятой током. Определяется  $\vec{A}$  по уравнению Пуассона  $\nabla^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{\delta}$ , причем  $\text{div } \vec{A} = 0$  и  $\Phi = \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l}$ .

Граничные условия в магнитном поле:  $H_{1t} = H_{2t}$ ,  $B_{1n} = B_{2n}$ ,  $\varphi_{M1} = \varphi_{M2}$ .

При расчёте магнитных полей в однородных средах при наличии нескольких источников поля целесообразным является принцип наложения. При этом найденные от отдельных источников величины суммируются: скалярные – алгебраически ( $\varphi_M = \sum \pm \varphi_{Mq}$ ,  $U_M = \sum \pm U_{Mq}$ ,  $\Phi = \sum \pm \Phi_q$  и т.д.), векторные – векторно ( $\vec{B} = \sum \vec{B}_q$ ,  $\vec{H} = \sum \vec{H}_q$ ,  $\vec{A} = \sum \vec{A}_q$ ).

Если магнитное поле создается проводниками, расположенными вблизи границы раздела разных сред, то его расчет упрощается применением метода зеркальных изображений аналогично тому, как это делалось при расчете электрических полей. Коэффициенты неполного отражения (коэффициенты фиктивных токов) при этом вычисляются как

$$k_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2}, \quad k_2 = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}.$$

Индуктивность и взаимная индуктивность контуров:

$$L = \frac{\Psi}{I}; \quad M = \frac{\Psi_{12}}{I_1} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}.$$

Энергия магнитного поля контура и её объемная плотность, соответственно,

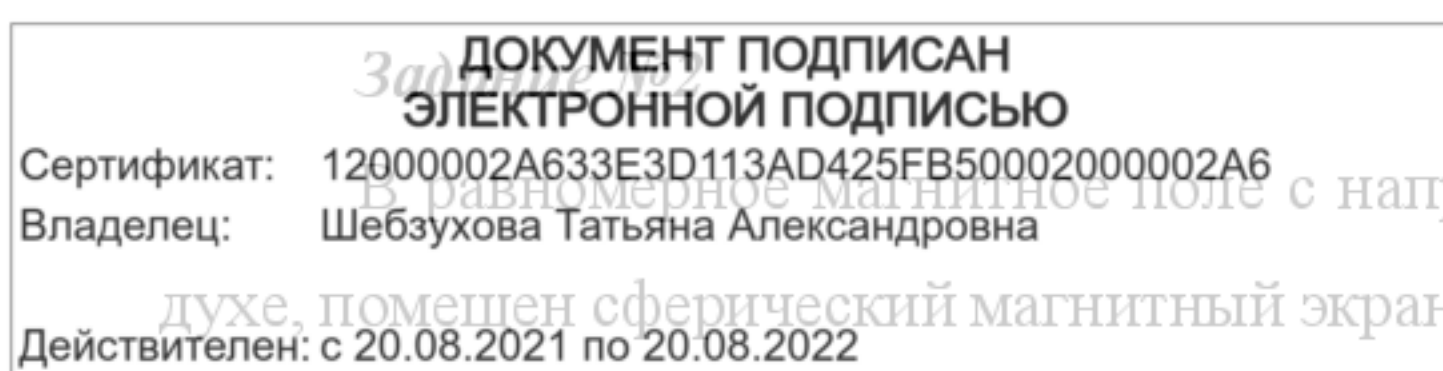
$$W_M = \frac{LI^2}{2} \quad \text{и} \quad w_M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{W_M}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2}.$$

Во многих случаях индуктивность проще рассчитывать через энергию магнитного поля  $L = \frac{2W}{I^2}$ , а не через потокосцепление  $\Psi$ .

### Задания:

#### Задание №1

По тонкому проводнику, представляющему собой окружность радиуса  $a = 1,2 \text{ см}$ , протекает ток  $I = 5 \text{ А}$ . Требуется рассчитать магнитную индукцию на оси витка.



с напряженностью  $H_0 = 120 \text{ А/см}$ , созданное в воздухе, помещен сферический магнитный экран с внутренним радиусом  $a = 6 \text{ см}$  и наружным

$b = 7 \text{ см}$ . Тело экрана выполнено из материала с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r = 400$ . Рассчитать коэффициент ослабления поля  $K_{осл} = H_1/H_0$ , где  $H_1$  – напряженность поля внутри экрана.

Рассчитать  $K_{осл}$  для цилиндрического экрана с теми же размерами  $a$  и  $b$ .

**Контрольные вопросы:**

1. Что понимается под магнитным полем? Когда и кем было открыто магнитное поле проводника с током?
2. Как графически изображаются магнитные поля? Что такое силовая линия? Изобразите графически простейшие магнитные поля.
3. Какими силовыми величинами характеризуется магнитное поле? Почему их две? Как они связаны между собой?
4. Запишите закон Био – Саварра – Лапласа в дифференциальной форме и рассмотрите его частные случаи. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля в СИ?
5. Как определить величину и направление силы Ампера?
6. Как установить единицу измерения индукции магнитного поля в СИ? Найдите силу взаимодействия двух параллельных токов.
7. Чему равна индукция магнитного поля движущегося заряда?
8. Сформулируйте и поясните закон полного тока.
9. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется в СИ? Чему равна работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле?
10. Что понимается под силой Лоренца? Как определить ее величину и направление?
11. Рассмотрите некоторые частные случаи движения заряженных частиц в однородном магнитном поле.
12. В чем состоит эффект Холла и где он используется?

## Практическая работа №24. Переменное электромагнитное поле

**Цель:** Изучить методику и приобрести практические навыки расчета переменного магнитного поля.

### Основы теории:

Переменное электромагнитное поле характеризуется изменяющимися во времени точечными и интегральными характеристиками. В этом едином поле для удобства анализа выделяются две стороны – электрическое поле и магнитное поле, которые взаимно связаны и взаимно обусловлены.

Теория электромагнитного поля оперирует полными токами, включающими в себя три вида тока: 1) ток проводимости; 2) ток смещения; 3) ток переноса.

$$\text{Плотность полного тока} \quad \vec{\delta} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{v},$$

где  $\gamma \vec{E} = \vec{\delta}_{np}$  – плотность тока проводимости (движущихся свободных зарядов),  $\gamma$  – удельная проводимость проводящей среды,  $\vec{E}$  – напряжённость электрического поля;

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{\delta}_{см}$  – плотность тока смещения,  $\vec{D}$  – вектор электрического смещения (электростатической индукции); напомним, что  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ ,  $\vec{P}$  – вектор поляризации вещества, определяющий поле смещённых связанных зарядов вещества; таким образом, в плотности тока смещения выделяют два слагаемых  $\vec{\delta}_{см} = \vec{\delta}'_{см} + \vec{\delta}''_{см}$ , где  $\vec{\delta}'_{см} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ , что указывает на наличие тока смещения и в пустоте, а  $\vec{\delta}''_{см} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ ; в свою очередь,  $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0$

$$\vec{E}, \text{ поэтому } \vec{\delta}_{см} = \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

$\rho \vec{v} = \vec{\delta}_{пер}$  – плотность тока переноса,  $\rho$  – объёмная плотность переносимых свободных зарядов;  $\vec{v}$  – вектор скорости переноса.

Полный ток  $i = \int_S \vec{\delta} d\vec{S}$ , как и ток проводимости, обладает свойством непрерывности,

то есть для любого замкнутого контура справедливо интегральное соотношение  $\oint_S \vec{\delta} d\vec{S} = 0$ , известное

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

под названием первого закона Кирхгофа, так и дифференциальное  $\text{div} \vec{\delta} = 0$ .

Заслугой Д. Максвелла является то, что он ввёл в теорию электромагнитных явлений ток смещения и предположил, что последний создаёт в окружающем пространстве магнитное поле так же, как и ток проводимости, что впоследствии было неоднократно подтверждено экспериментами (в частности, радио, телевидение и др.). Д. Максвелл также сформулировал основные уравнения поля.

### Задания:

#### Задание №1

Обкладки плоского конденсатора разделены несовершенным диэлектриком с удельной проводимостью  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4$ . Конденсатор подключен к источнику синусоидального напряжения  $u = 3000 \sin \omega t \text{ В}$ . Расстояние между обкладками конденсатора  $d = 1 \text{ см}$ . Считая, что  $\varepsilon$  и  $\gamma$  не зависят от частоты, а линейные размеры обкладок значительно превышают расстояние  $d$ , вычислить амплитуды плотностей тока проводимости  $\delta_{\text{тпр}}$  и тока смещения  $\delta_{\text{тсм}}$  для следующих частот: 1)  $f_1 = 0$ ; 2)  $f_2 = 50 \text{ Гц}$ ; 3)  $f_3 = 400 \text{ Гц}$ ; 4)  $f_4 = 400 \text{ кГц}$ . Записать для этих четырёх случаев мгновенное значение тока  $i_0$ , приходящееся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности обкладок конденсатора, а также их комплексные амплитуды.

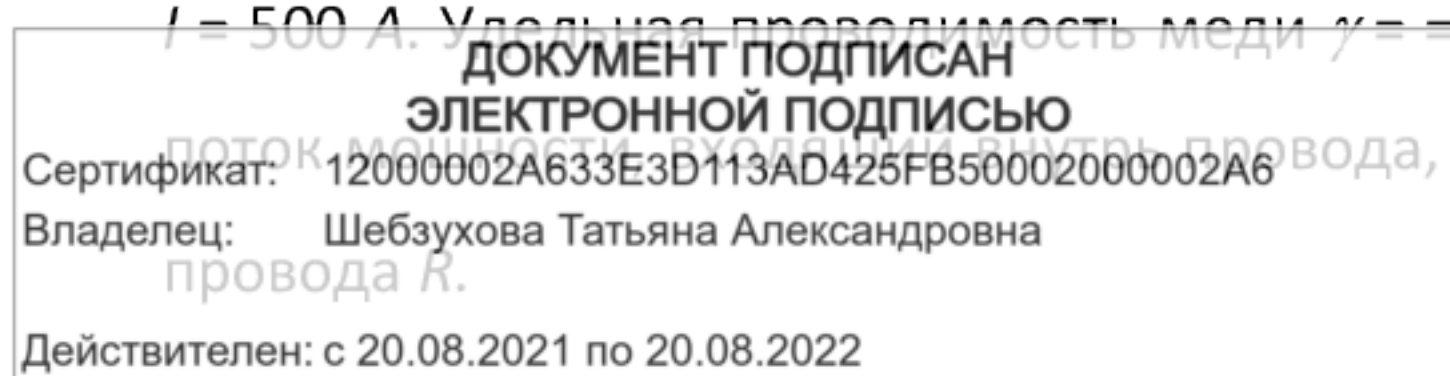
#### Задание №2

Обкладки плоского конденсатора имеют форму дисков и расположены на расстоянии  $d = 1 \text{ см}$  друг от друга, разделены несовершенным диэлектриком с удельной проводимостью  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4$ , магнитной проницаемостью  $\mu = 1$ . Считая, что параметры диэлектрика не зависят от частоты, найти выражения для мгновенных значений напряжённости и магнитной индукции в точках, лежащих между обкладками конденсатора на расстоянии  $r$  от оси симметрии, пренебрегая краевым эффектом. Радиус диска  $a = 6 \text{ см}$ . К конденсатору приложено напряжение  $u = 3000 \sin \omega t \text{ В}$ .

Задачу решить для двух значений частоты 1)  $f_1 = 0$ ; 2)  $f_2 = 400 \text{ кГц}$ .

#### Задание №3

По уединённому медному проводу радиусом  $a = 0,5 \text{ см}$  протекает постоянный ток  $I = 500 \text{ А}$ . Удельная проводимость меди  $\gamma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ . Длина провода  $l = 50 \text{ м}$ . Найти поток магнитной индукции внутри провода, и с его помощью определить сопротивление



#### **Задание №4**

Плоская, линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется по диэлектрику со свойствами  $\varepsilon_1 = 7$ ,  $\mu_1 = 1$ ,  $\gamma_1 = 0$  в направлении, перпендикулярном плоской неограниченной поверхности второго диэлектрика со свойствами  $\varepsilon_2 = 2$ ,  $\mu_2 = 1$ ,  $\gamma_2 = 0$ . Частота гармонического сигнала  $f = 10^9$  Гц, амплитуда вектора напряженности электрического поля прямой волны  $E_{\text{пр}} = 450$  мВ/м.

Найти законы изменения действующих значений  $H$  и  $E$  в обеих средах, построить их графики в функции координат.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Что называют магнитным полем?
2. Составной частью какого поля является магнитное поле?
3. Как определяют направление магнитного поля?
4. Как определяют направление магнитного поля в зависимости от направления электрического тока?
5. Как применить правило левой руки для определения направления поля катушки?
6. Что называют магнитной индукцией и в чем ее измеряют?
7. От чего зависит магнитная индукция в точке?
8. От чего зависит сила электромагнитного воздействия на проводник?
9. Как определить направление силы по правилу левой руки?
10. От чего зависит электромагнитная сила двух проводников с током?
11. Что называют магнитным потоком и в чем его измеряют?
12. Что характеризует абсолютная магнитная проницаемость среды и в каких единицах она измеряется? Чему равна магнитная постоянная?
13. Что характеризует относительная магнитная проницаемость?
14. Что такое напряженность магнитного поля и какова ее единица измерения?
15. Какие зависимости показаны в законе полного тока?
16. Какая зависимость магнитного поля в электрическом проводе и вне его?
17. На основании какого закона определяют магнитное поле кольцевой и цилиндрической катушек?

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

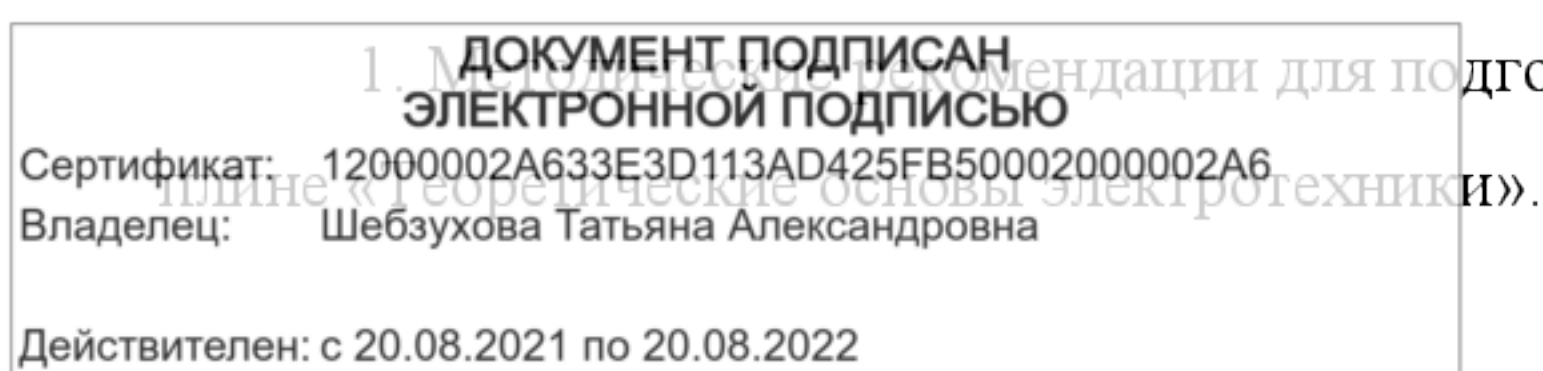
#### **5.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>
3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

#### **5.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>
2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

### **5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**



подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

***5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по выполнению расчетно-графической работы  
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Содержание

| №<br>п/п |                                                                                                         | Стр. |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|          | Введение                                                                                                |      |
| 1.       | Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины                                                       |      |
| 2.       | Формулировка задания и ее объем                                                                         |      |
| 3.       | Общие требования к написанию и оформлению работы                                                        |      |
| 4.       | Рекомендации по выполнению задания                                                                      |      |
| 5.       | План-график выполнения задания                                                                          |      |
| 6.       | Критерии оценивания работы                                                                              |      |
| 7.       | Порядок защиты работы                                                                                   |      |
| 8.       | Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины                                             |      |
| 8.1      | Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины                      |      |
| 8.2      | Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине              |      |
| 8.3      | Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины |      |

## Введение

Одним из основных видов занятий по курсу дисциплины «Теоретические основы электротехники» является выполнение расчетно-графической работы. Предлагаемые в методическом указании задания охватывают весь основной материал курса и соответствуют утвержденной программе.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## ***1. Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины***

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

При выполнении контрольной работы реализуются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

|                                                   |                                        |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br/>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</b> |                                        |
| Сертификат:                                       | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                         | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022          |                                        |

| Код, формулировка компетенции                                                                        | Код, формулировка индикатора                                                                                                | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока. | Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами, методы анализа, моделирования и расчета линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока |
|                                                                                                      | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.  | Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.                                                                                                 |
|                                                                                                      | ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами.                 | Владеет навыками расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.                                                                                                           |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## 2. Формулировка задания и ее объем

### Задание №1

Номер рисунка, на котором изображена расчетная схема, номер таблицы значений параметров и метод, которым необходимо решить задачу, представлены в таблице №1.

Таблица 1 – Методы решения задач

| Номер варианта | Номер рисунков | Номер таблиц | Методы решения задач                          |
|----------------|----------------|--------------|-----------------------------------------------|
| 1...10         | 1              | 2            | контурных токов                               |
| 11...20        | 2              | 3            | преобразования схемы и<br>узлового напряжения |
| 21...30        | 3              | 4            | узловых потенциалов                           |

Варианты 1 – 10

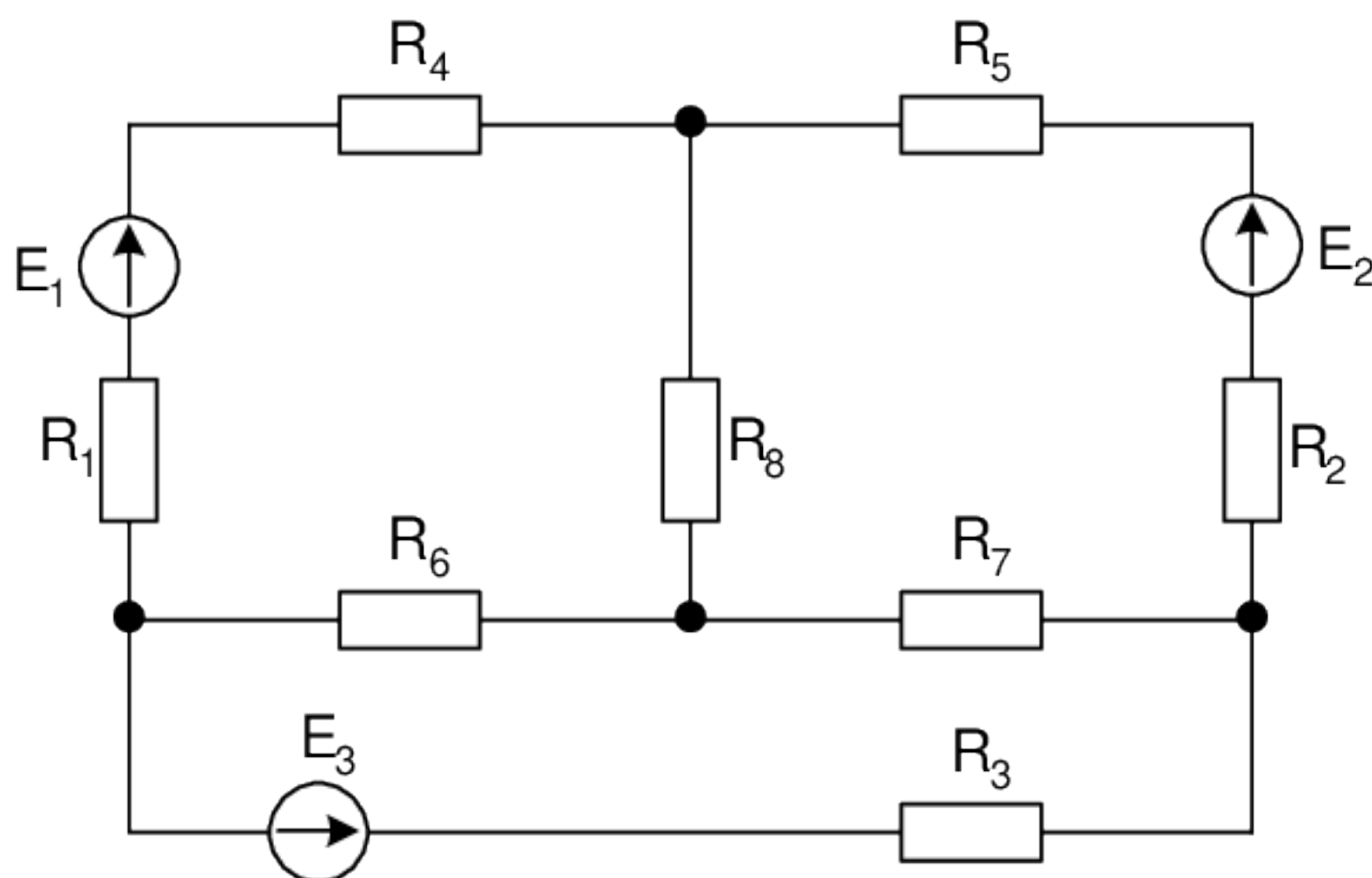


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 1...10

Таблица 2 – Варианты заданий для вариантов 1-10

| № варианта | $E_1$ , В | $E_2$ , В | $E_3$ , В | $R_1$ , Ом | $R_2$ , Ом | $R_3$ , Ом | $R_4$ , Ом | $R_5$ , Ом | $R_6$ , Ом | $R_7$ , Ом | $R_8$ , Ом |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1          | 220       | 220       | 110       | 5          | 5          | 2          | 55         | 55         | 20         | 20         | 40         |
| 2          | 15        | 12        | 6         | 0,3        | 0,2        | 0,1        | 19,7       | 24,8       | 29,9       | 30         | 15         |
| 3          | 24        | 12        | 6         | 0,3        | 0,2        | 0,1        | 9,7        | 9,8        | 50         | 50         | 20         |
| 4          | 220       | 110       | 110       | 6          | 3          | 3          | 54         | 87         | 57         | 40         | 83         |
| 5          | 12        | 6         | 6         | 2          | 1          | 1          | 3          | 12         | 5          | 7          | 8          |
| 6          | 24        | 12        | 6         | 4          | 2          | 1          | 6          | 8          | 10         | 10         | 20         |
| 7          | 24        | 12        | 12        | 4          | 2          | 2          | 12         | 16         | 20         | 20         | 40         |
| 8          | 24        | 6         | 6         | 6          | 1          | 1          | 4          | 4          | 10         | 10         | 10         |
| 9          | 12        | 12        | 6         | 2          | 2          | 1          | 6          | 16         | 10         | 20         | 40         |
| 10         | 15        | 12        | 6         | 5          | 4          | 2          | 15         | 60         | 70         | 28         | 60         |

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
 Расчет выполнить методом контурных токов  
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Варианты 11 – 20

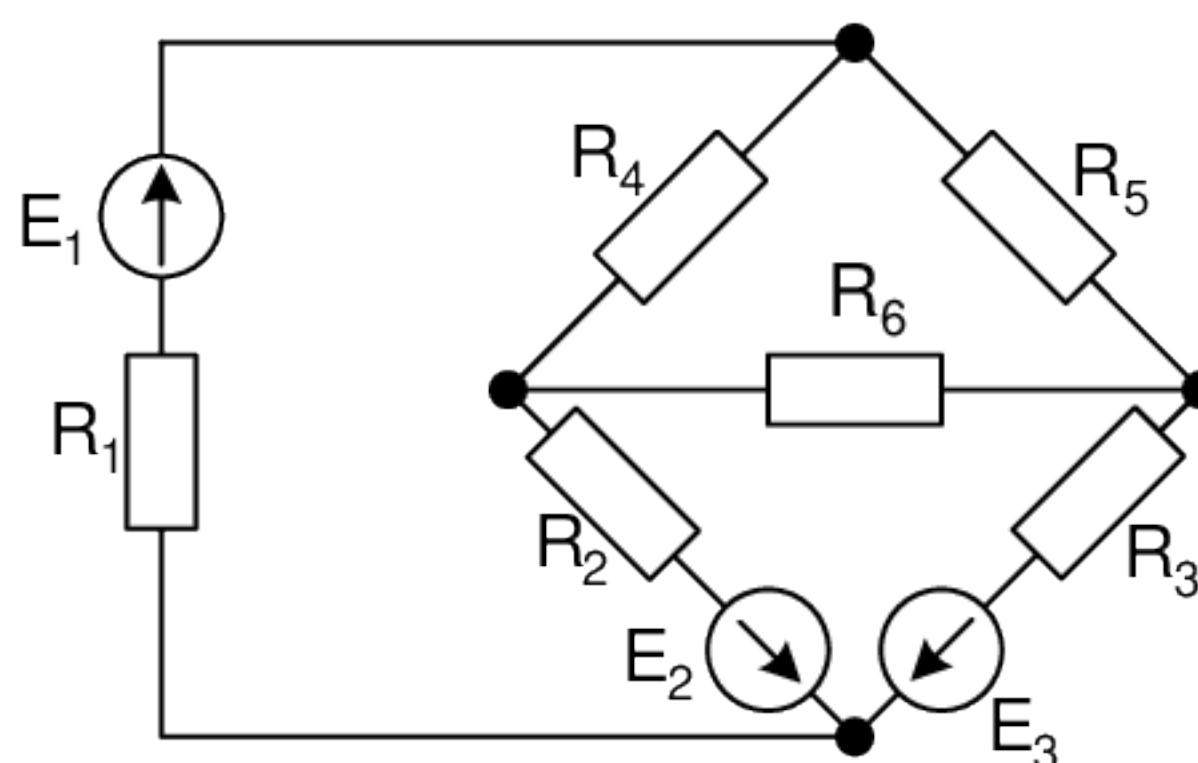


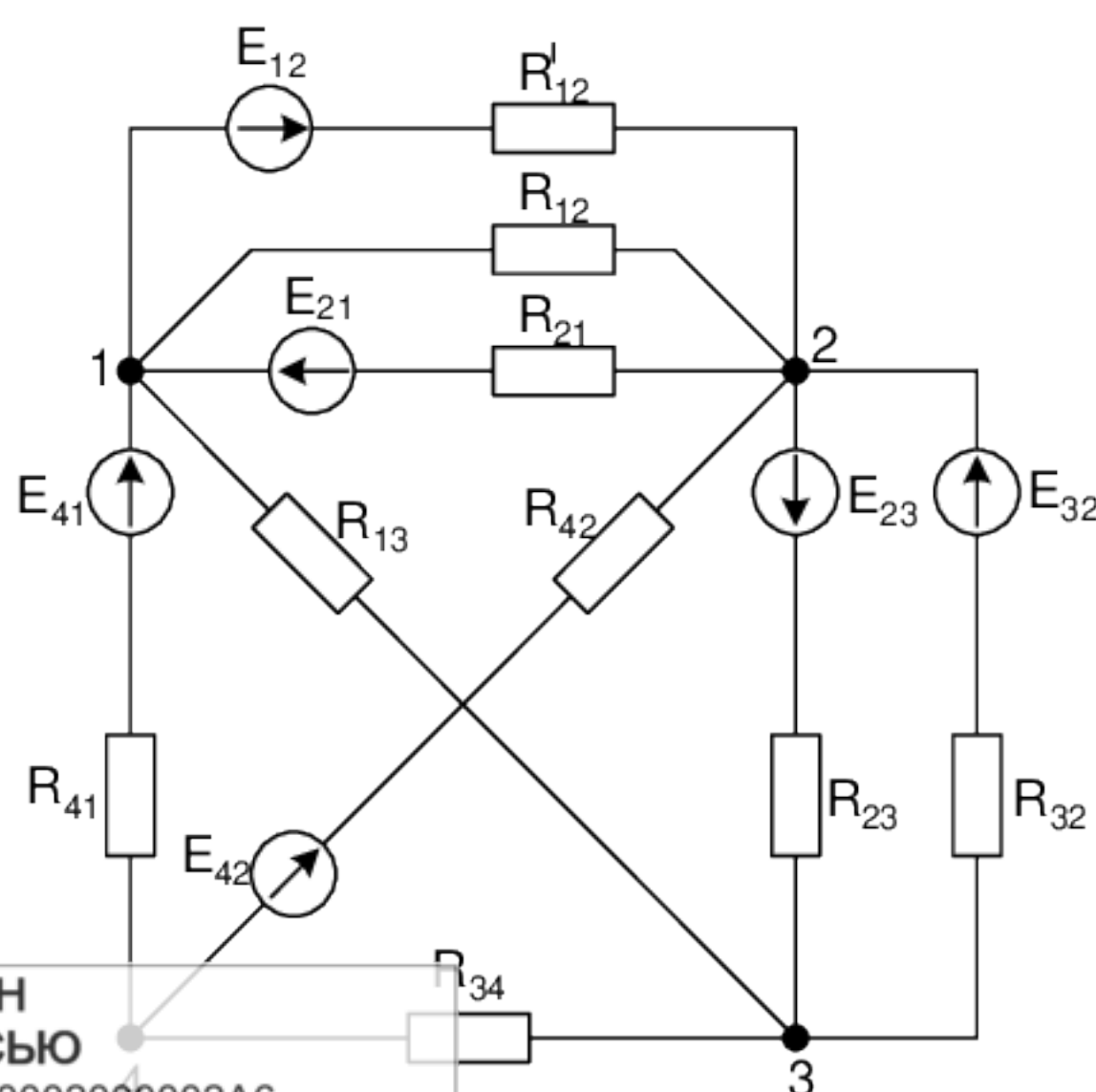
Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 11...20

Таблица 3 – Варианты заданий для вариантов 11-20

| № варианта | $E_1$ , В | $E_2$ , В | $E_3$ , В | $R_1$ , Ом | $R_2$ , Ом | $R_3$ , Ом | $R_4$ , Ом | $R_5$ , Ом | $R_6$ , Ом |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 11         | 20        | 12        | 6         | 3,8        | 3          | 7          | 4          | 6          | 10         |
| 12         | -20       | 12        | 6         | 12         | 1          | 2,5        | 6          | 10         | 0,5        |
| 13         | 15        | 5         | -5        | 0,4        | 0,8        | 0,8        | 20         | 30         | 25         |
| 14         | 24        | -5        | 5         | 0,2        | 0,8        | 0,8        | 30         | 50         | 40         |
| 15         | 24        | 12        | 12        | 0,2        | 0,4        | 0,4        | 12         | 24         | 4          |
| 16         | 200       | 50        | 50        | 3,5        | 3,75       | 7,5        | 25         | 50         | 25         |
| 17         | 100       | 25        | -25       | 12         | 6          | 1,83       | 15         | 40         | 20         |
| 18         | 100       | 50        | 25        | 4          | 6,5        | 0,5        | 20         | 15         | 15         |
| 19         | 200       | 12        | -12       | 20         | 4          | 1,25       | 40         | 45         | 15         |
| 20         | 220       | -24       | 15        | 2,5        | 5          | 7          | 25         | 15         | 10         |

Расчет выполнить использованием методов преобразования схемы и узлового напряжения.

Варианты 21 – 30



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 21...30

Таблица 4 – Варианты заданий для вариантов 21-30

| № варианта | $E_{12},$<br>В | $E_{21},$<br>В | $E_{23},$<br>В | $E_{32},$<br>В | $E_{41},$<br>В | $E_{42},$<br>В | $R_{12},$<br>Ом | $R'_{12},$<br>Ом | $R_{21},$<br>Ом | $R_{23},$<br>Ом | $R_{32},$<br>Ом | $R_{34},$<br>Ом | $R_{13},$<br>Ом | $R_{41},$<br>Ом | $R_{42},$<br>Ом |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 21         | 8              | 8              | 15             | 5              | 12             | 20             | 4               | 2,5              | 10              | 0,5             | 2               | 1               | 5               | 6,25            | 10              |
| 22         | 6              | 12             | 12             | 6              | 24             | 24             | 8               | 0,5              | 0,4             | 0,4             | 0,5             | 4               | 10              | 12,5            | 8               |
| 23         | 5              | 15             | 5              | 15             | 12             | 12             | 5               | 12,5             | 25              | 10              | 20              | 2               | 0,5             | 2,5             | 4               |
| 24         | 12             | 12             | 6              | 6              | 5              | 15             | 2               | 4                | 4               | 8               | 12,5            | 20              | 50              | 0,4             | 1               |
| 25         | 24             | 12             | 24             | 6              | 15             | 15             | 80              | 25               | 12,5            | 40              | 20              | 25              | 40              | 0,2             | 0,1             |
| 26         | 100            | 50             | 100            | 100            | 100            | 50             | 250             | 40               | 50              | 25              | 50              | 200             | 250             | 2               | 5               |
| 27         | 250            | 100            | 100            | 50             | 250            | 100            | 500             | 400              | 200             | 125             | 250             | 500             | 200             | 10              | 5               |
| 28         | 250            | 250            | 100            | 100            | 250            | 50             | 50              | 400              | 200             | 50              | 100             | 20              | 50              | 4               | 2               |
| 29         | 12             | 24             | 5              | 15             | 100            | 100            | 8               | 4                | 8               | 25              | 50              | 10              | 20              | 25              | 10              |
| 30         | 24             | 12             | 5              | 15             | 250            | 250            | 100             | 125              | 125             | 5               | 10              | 250             | 50              | 2,5             | 2,5             |

**Задание №2**

Во всех вариантах выполняется расчет схемы, представленной на Рис. 4. Значения параметров элементов схемы помещены в таблице 5. Для некоторых реактивных в таблице указаны сопротивления (под чертой), для других - индуктивности или емкости (над чертой).

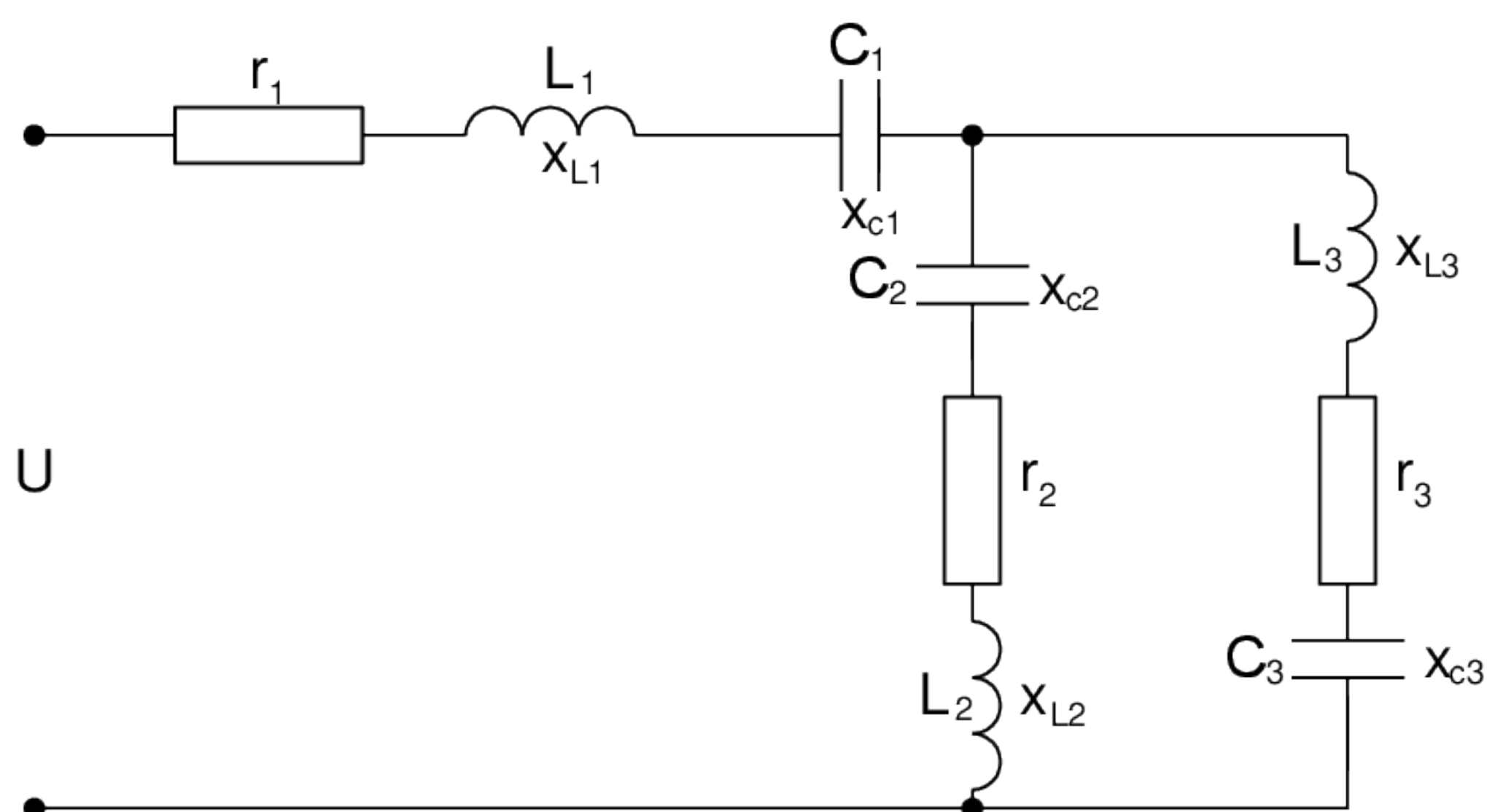


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная к задаче №2

Таблица 5 – Варианты заданий к задаче №2

| № варианта | U, В | f, Гц | $r_1,$<br>Ом | $L_1, \text{мГ}$    | $C_1, \text{мкФ}$   | $r_2,$<br>Ом | $L_2, \text{мГ}$    | $C_2, \text{мкФ}$   | $r_3,$<br>Ом | $L_3, \text{мГ}$    | $C_3, \text{мкФ}$   |
|------------|------|-------|--------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|
|            |      |       |              | $X_{L1}, \text{Ом}$ | $X_{C1}, \text{Ом}$ |              | $X_{L2}, \text{Ом}$ | $X_{C2}, \text{Ом}$ |              | $X_{L3}, \text{Ом}$ | $X_{C3}, \text{Ом}$ |
| 1          | 250  | 50    | 30           | 30                  | 106                 | 20           | 31,8                | 50                  | 40           | 127,3               | 10                  |
| 2          | 127  | 50    | 20           | 30                  | 79,6                | 40           | 30                  | 79,6                | 60           | 140                 | 63,7                |
| 3          | 220  | 50    | 30           | 30                  | 159                 | 260          | 30                  | 30                  | 40           | 63,7                | 50                  |
| 4          | 220  | 50    | 10           | 30                  | 159                 | 100          | 30                  | 30                  | 20           | 99,5                | 283                 |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

| № вари-<br>анта | U,<br>В | f,<br>Гц | r <sub>1</sub> ,<br>Ом | L <sub>1</sub> , мГ<br>X <sub>L1</sub> , Ом | C <sub>1</sub> , мкФ<br>X <sub>C1</sub> , Ом | r <sub>2</sub> ,<br>Ом | L <sub>2</sub> , мГ<br>X <sub>L2</sub> , Ом | C <sub>2</sub> , мкФ<br>X <sub>C2</sub> , Ом | r <sub>3</sub> ,<br>Ом | L <sub>3</sub> , мГ<br>X <sub>L3</sub> , Ом | C <sub>3</sub> , мкФ<br>X <sub>C3</sub> , Ом |
|-----------------|---------|----------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                 |         |          |                        | 20                                          |                                              |                        | 80                                          | 10                                           |                        |                                             | 40                                           |
| 5               | 127     | 50       | 50                     | 40                                          | 40                                           | 45                     | 318,4                                       | 67                                           | 50                     | 127,3                                       | 106                                          |
| 6               | 127     | 50       | 50                     | 63,7                                        | 25                                           | 30                     | 127,4                                       | 10                                           | 50                     | 25                                          | 106                                          |
| 7               | 220     | 50       | 40                     | 50                                          | 50                                           | 10                     | 63,7                                        | 50                                           | 55                     | 250                                         | 159                                          |
| 8               | 380     | 50       | 20                     | 20                                          | 318,3                                        | 100                    | 80                                          | 50                                           | 30                     | 36                                          | 318,5                                        |
| 9               | 380     | 50       | 20                     | 10                                          | 40                                           | 50                     | 10                                          | 10                                           | 50                     | 79,6                                        | 159                                          |
| 10              | 380     | 50       | 30                     | 25                                          | 50                                           | 30                     | 40                                          | 79,6                                         | 50                     | 63,7                                        | 10                                           |
| 11              | 220     | 50       | 30                     | 40                                          | 80                                           | 68                     | 110                                         | 30                                           | 40                     | 95,5                                        | 53                                           |
| 12              | 220     | 50       | 40                     | 30                                          | 60                                           | 80                     | 62,5                                        | 79                                           | 30                     | 63,7                                        | 60                                           |
| 13              | 127     | 50       | 30                     | 31,8                                        | 50                                           | 50                     | 100                                         | 159                                          | 40                     | 40                                          | 70                                           |
| 14              | 380     | 50       | 30                     | 10                                          | 50                                           | 50                     | 318,5                                       | 50                                           | 33                     | 100                                         | 63,7                                         |
| 15              | 127     | 50       | 50                     | 100                                         | 53                                           | 20                     | 127,3                                       | 40                                           | 20                     | 44,7                                        | 50                                           |
| 16              | 127     | 50       | 40                     | 95,5                                        | 53                                           | 30                     | 40                                          | 40                                           | 40                     | 10                                          | 159                                          |
| 17              | 127     | 50       | 40                     | 10                                          | 40                                           | 45                     | 53                                          | 40                                           | 65                     | 207                                         | 88,5                                         |
| 18              | 220     | 50       | 30                     | 31,8                                        | 63,7                                         | 40                     | 25                                          | 30                                           | 30                     | 63,7                                        | 60                                           |
| 19              | 380     | 50       | 40                     | 31,8                                        | 20                                           | 25                     | 30                                          | 40                                           | 80                     | 80                                          | 45,5                                         |
| 20              | 380     | 50       | 30                     | 10                                          | 63,7                                         | 30                     | 40                                          | 63,7                                         | 30                     | 95,5                                        | 70                                           |
| 21              | 220     | 60       | 30                     | 106,1                                       | 33,2                                         | 68                     | 30                                          | 110                                          | 40                     | 30                                          | 60                                           |
| 22              | 220     | 60       | 40                     | 79,6                                        | 44,2                                         | 30                     | 40                                          | 40                                           | 45                     | 65                                          | 60                                           |
| 23              | 127     | 60       | 40                     | 106,1                                       | 63,7                                         | 30                     | 10                                          | 106,1                                        | 50                     | 100                                         | 70                                           |
| 24              | 380     | 60       | 30                     | 26,5                                        | 53                                           | 50                     | 40                                          | 20                                           | 30                     | 10                                          | 50                                           |
| 25              | 127     | 60       | 20                     | 106,1                                       | 40                                           | 50                     | 40                                          | 40                                           | 50                     | 10                                          | 53                                           |
| 26              | 127     | 60       | 40                     | 26,5                                        | 53                                           | 30                     | 20                                          | 60                                           | 30                     | 20                                          | 58                                           |

25 127 60 20 26 127 60 40 26,5 53 30

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

| № вари-<br>анта | U,<br>В | f,<br>Гц | r <sub>1</sub> ,<br>Ом | L <sub>1</sub> , мГ<br>x <sub>L1</sub> , Ом | C <sub>1</sub> , мкФ<br>x <sub>C1</sub> , Ом | r <sub>2</sub> ,<br>Ом | L <sub>2</sub> , мГ<br>x <sub>L2</sub> , Ом | C <sub>2</sub> , мкФ<br>x <sub>C2</sub> , Ом | r <sub>3</sub> ,<br>Ом | L <sub>3</sub> , мГ<br>x <sub>L3</sub> , Ом | C <sub>3</sub> , мкФ<br>x <sub>C3</sub> , Ом |
|-----------------|---------|----------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 27              | 127     | 60       | 40                     | 30                                          | 44,2                                         | 30                     | 106,1                                       | 63,7                                         | 40                     | 10                                          | 40                                           |
| 28              | 220     | 60       | 30                     | 79,6                                        | 30                                           | 40                     | 26,5                                        | 88,4                                         | 30                     | 20                                          | 60                                           |
| 29              | 380     | 60       | 40                     | 53                                          | 50                                           | 40                     | 79,6                                        | 25                                           | 40                     | 40                                          | 37,9                                         |
| 30              | 380     | 60       | 30                     | 26,5                                        | 50                                           | 30                     | 40                                          | 30                                           | 30                     | 30                                          | 37,9                                         |

### Задание №3

Для получения исходных данных необходимо:

1. Нарисовать скелет схемы (Рис. 5).
2. Выбрать строку данных об элементах схемы по Таблице 6, исходя из номера заданного варианта.
3. Выбрать строку данных о параметрах элементов по Таблице 7, исходя из данных Таблицы 6.
4. Заполнить скелет схемы соответствующими элементами по варианту
  - 4.1. В Таблице 6 указаны элементы, которые необходимо включить в соответствующие ветви: R, L или C.
  - 4.2. В ту ветвь, где стоит знак “+”, необходимо включить источник Э.Д.С. E(t) последовательно с пассивным элементом. Направление источника студент может задать произвольно.
  - 4.3. Ветвь, обозначенная XX, находится в режиме холостого хода, то есть она обрвана. Рисовать эту ветвь в схеме не следует.
  - 4.4. Ветвь, обозначенная КЗ, находится в режиме короткого замыкания, то есть на ее месте будет закоротка, которую нужно стянуть в узел.
  - 4.5. Параметры всех включенных элементов даны в Таблице 7.

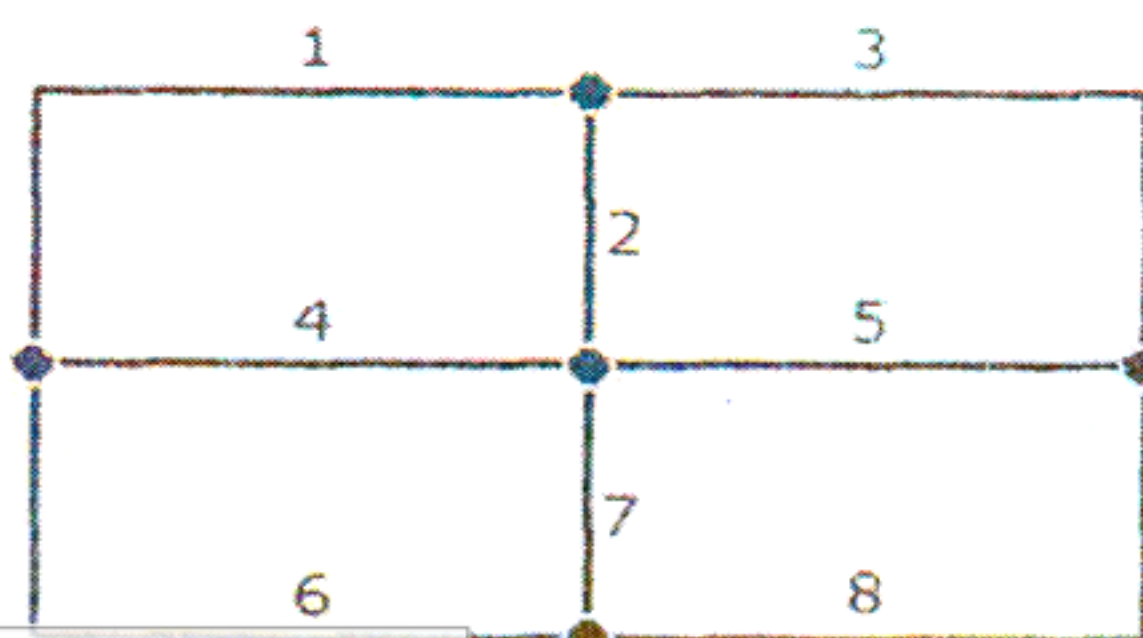


Рисунок 5 – Скелет схемы

Таблица 6 – Элементы схемы

| №<br>Варианта | Номера ветвей |     |     |     |     |     |     |     | №<br>Варианта<br>Табл. 7 |
|---------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------|
|               | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |                          |
| 1             | XX            | +L1 | C1  | R1  | L2  | C2  | R2  | R3  | 1                        |
| 2             | XX            | C1  | +R1 | L2  | C2  | R2  | R3  | L1  | 2                        |
| 3             | XX            | R1  | L2  | +C2 | R2  | R3  | L1  | C1  | 3                        |
| 4             | XX            | L2  | C2  | R2  | +R3 | L1  | C1  | R1  | 4                        |
| 5             | XX            | C2  | R2  | R3  | L1  | +C1 | R1  | L2  | 5                        |
| 6             | XX            | R2  | R3  | L1  | C1  | R1  | +L2 | C2  | 6                        |
| 7             | XX            | R3  | L1  | C1  | R1  | L2  | C2  | +R2 | 7                        |
| 8             | +C1           | K3  | R1  | L2  | C2  | R2  | R3  | L1  | 8                        |
| 9             | R             | K3  | +L2 | C2  | R2  | R3  | L1  | C1  | 9                        |
| 10            | L2            | K3  | C2  | +R2 | R3  | L1  | C1  | R1  | 10                       |
| 11            | C2            | K3  | R2  | R3  | +L1 | C1  | R1  | L2  | 11                       |
| 12            | R2            | K3  | R3  | L1  | C1  | +R1 | L2  | C2  | 12                       |
| 13            | R3            | K3  | L1  | C1  | R1  | L2  | +C2 | R2  | 13                       |
| 14            | L1            | K3  | C1  | R1  | L2  | C2  | R2  | +R3 | 14                       |
| 15            | +L1           | L2  | XX  | C2  | R2  | R3  | L1  | C1  | 15                       |
| 16            | L2            | +C2 | XX  | R2  | R3  | L1  | C1  | R1  | 16                       |
| 17            | C2            | R2  | XX  | +R3 | L1  | C1  | R1  | L2  | 17                       |
| 18            | R2            | R3  | XX  | L1  | +C1 | R1  | L2  | C2  | 18                       |
| 19            | R3            | L1  | XX  | C1  | R1  | +L2 | C2  | R2  | 19                       |
| 20            | L1            | C1  | XX  | R1  | L2  | C2  | +R2 | R3  | 20                       |

Таблица 7 – Параметры элементов

| №<br>Варианта | E,<br>В | f,<br>Гц | Ψ,<br>гра-<br>дусы | Параметры пассивных элементов |          |          |           |           |           |           |
|---------------|---------|----------|--------------------|-------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|               |         |          |                    | R1<br>Ом                      | R2<br>Ом | R3<br>Ом | L1<br>мГн | L2<br>мГн | C1<br>мкФ | C2<br>мкФ |
| 1             | 30      | 100      | -70                | 20                            | 30       | 10       | 31,8      | 63,7      | 53,08     | 24,5      |
| 2             | 20      | 200      | -30                | 50                            | 40       | 20       | 39,8      | 31,85     | 39,61     | 12,25     |
| 3             | 40      | 300      | 45                 | 28                            | 33       | 15       | 10,6      | 13,27     | 8,85      | 10,62     |
| 4             | 12      | 400      | 35                 | 46                            | 35       | 30       | 25,881    | 14,73     | 11,38     | 6,13      |
| 5             | 50      | 500      | 120                | 20                            | 45       | 12       | 6,36      | 20,7      | 4,9       | 15,92     |
| 6             | 40      | 600      | 30                 | 36                            | 58       | 24       | 6,63      | 15,29     | 4,42      | 10,62     |
| 7             | 60      | 700      | 50                 | 45                            | 25       | 16       | 8,41      | 4,79      | 3,5       | 6,5       |
| 8             | 30      | 800      | 160                | 30                            | 40       | 22       | 3,98      | 12,94     | 3,06      | 9,95      |
| 9             | 25      | 900      | 20                 | 26                            | 30       | 30       | 11,5      | 8,85      | 10,61     | 5,06      |
| 10            | 20      | 1000     | -150               | 65,4                          | 50       | 40       | 7,17      | 10,35     | 2,45      | 3,98      |
| 11            | 35      | 100      | -15                | 38                            | 42       | 15       | 39,8      | 79,6      | 31,85     | 63,69     |
| 12            | 10      | 200      | -120               | 27                            | 48       | 14       | 15,9      | 47,75     | 13,27     | 39,81     |
| 13            | 45      | 300      | 45                 | 37                            | 45       | 12       | 13,27     | 31,83     | 8,85      | 21,23     |
| 14            | 30      | 100      | 90                 | 32                            | 57       | 10       | 11,95     | 25,88     | 6,13      | 13,27     |
| 15            | 20      | 200      | 40                 | 26                            | 35       | 20       | 19,1      | 6,36      | 15,92     | 5,31      |
| 16            | 40      | 300      | 60                 | 56                            | 38       | 25       | 7,97      | 17,25     | 4,42      | 13,27     |

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|    |     |      |      |     |     |     |       |       |       |       |
|----|-----|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 17 | 20  | 700  | -30  | 40  | 30  | 30  | 13,64 | 8,41  | 9,1   | 3,5   |
| 18 | 40  | 800  | 20   | 25  | 45  | 15  | 12,94 | 3,98  | 9,95  | 3,06  |
| 19 | 30  | 900  | -20  | 35  | 60  | 12  | 6,54  | 11,5  | 2,72  | 5,06  |
| 20 | 20  | 1000 | 50   | 55  | 25  | 20  | 9,55  | 7,96  | 3,18  | 2,65  |
| 21 | 40  | 100  | 120  | 47  | 48  | 14  | 47,8  | 95,5  | 26,54 | 53,08 |
| 22 | 10  | 200  | -160 | 38  | 42  | 20  | 19,9  | 35,85 | 15,93 | 31,85 |
| 23 | 45  | 300  | 200  | 26  | 35  | 30  | 10,6  | 23,9  | 11,8  | 26,54 |
| 24 | 12  | 400  | -60  | 34  | 36  | 25  | 7,95  | 17,93 | 8,85  | 13,91 |
| 25 | 50  | 500  | -20  | 27  | 38  | 12  | 6,36  | 14,34 | 7,08  | 15,92 |
| 26 | 30  | 600  | -270 | 45  | 50  | 14  | 5,3   | 11,95 | 5,9   | 13,27 |
| 27 | 55  | 700  | -70  | 20  | 25  | 20  | 4,54  | 10,24 | 5,06  | 11,37 |
| 28 | 15  | 800  | -135 | 38  | 24  | 30  | 3,98  | 8,86  | 4,42  | 9,96  |
| 29 | 100 | 60   | 0    | 100 | 150 | 175 | 1,57  | 12,75 | 20,31 | 15,29 |
| 30 | 220 | 50   | 0    | 150 | 220 | 330 | 19,12 | 11,90 | 10,00 | 20,00 |

#### Задание №4

К трёхфазному трансформатору, вторичная обмотка которого соединена по схеме «звезда», подключена несимметричная нагрузка по такой же схеме. Задана величина фазного напряжения  $U_\phi$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора и сопротивления нагрузки

$$Z_a = r_a + jx_a, Z_b = r_b + jx_b, Z_c = r_c + jx_c.$$

Необходимо найти линейные токи и ток нейтрального провода. При отсутствии нейтрального провода найти напряжение смещения нейтрали и напряжения на каждой фазе нагрузки. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем с нейтральным проводом и без него. Значения  $U_\phi$  и сопротивлений нагрузки представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Варианты к задаче 4

| № варианта | $U_\phi$ , В | $r_a$ , Ом | $X_a$ , Ом | $r_b$ , Ом | $X_b$ , Ом | $r_c$ , Ом | $X_c$ , Ом |
|------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1          | 50           | 4          | -5         | 8          | -10        | 4          | 12         |
| 2          | 220          | 12         | 20         | 20         | 12         | 25         | 15         |
| 3          | 110          | 15         | -8         | 18         | 10         | 14         | -15        |
| 4          | 100          | 20         | 15         | 8          | -12        | 7          | 30         |
| 5          | 200          | 4          | -20        | 15         | 8          | 12         | 7          |
| 6          | 50           | 16         | -4         | 20         | -15        | 8          | 12         |
| 7          | 110          | 25         | 16         | 4          | 20         | 15         | -8         |
| 8          | 220          | 10         | 25         | 16         | -4         | 20         | -15        |
| 9          | 100          | 12         | -10        | 25         | 16         | 4          | -20        |
| 10         | 200          | 18         | 12         | 10         | -25        | 16         | 4          |
| 11         | 100          | 10         | -18        | 12         | 10         | 25         | -16        |
| 12         | 220          | 15         | 16         | 18         | -12        | 10         | 25         |
| 13         | 110          | 220        | 25         | 25         | -18        | 12         | 10         |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|    |     |    |     |    |     |    |     |
|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| 14 | 100 | 8  | -25 | 12 | 15  | 18 | 12  |
| 15 | 200 | 20 | -25 | 30 | 25  | 12 | -10 |
| 16 | 6   | 2  | -2  | 4  | 4   | 6  | -3  |
| 17 | 12  | 4  | 8   | 6  | -5  | 8  | 12  |
| 18 | 15  | 6  | 4   | 8  | 5   | 10 | -5  |
| 19 | 24  | 6  | -3  | 4  | 3   | 2  | 15  |
| 20 | 48  | 12 | 12  | 8  | -8  | 6  | 6   |
| 21 | 60  | 9  | 0   | 15 | -10 | 6  | 10  |
| 22 | 6   | 6  | -2  | 4  | 8   | 2  | 0   |
| 23 | 12  | 8  | -5  | 6  | -2  | 3  | 8   |
| 24 | 24  | 10 | 12  | 15 | 6   | 8  | -10 |
| 25 | 48  | 15 | 0   | 10 | -2  | 25 | 20  |
| 26 | 60  | 18 | 15  | 15 | -6  | 18 | 12  |
| 27 | 120 | 25 | 22  | 40 | 25  | 15 | -15 |
| 28 | 6   | 3  | 2   | 10 | -6  | 6  | 4   |
| 29 | 12  | 14 | 7   | 16 | -9  | 25 | 20  |
| 30 | 15  | 2  | 1   | 20 | 20  | 10 | -10 |

### Задание №5

В электрической цепи, представленной на рис.6, действует несинусоидальная э.д.с. Значения частоты первой гармоники и параметры элементов электрической цепи сведены в таблицу 9. Кривая изменения э.д.с., симметричная относительно оси абсцисс, представлена в таблице 10 ордина интервалом фазы  $10^\circ$  в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . В электрической цепи имеется сопротивление нагрузки  $R_H$  и фильтр, состоящий либо из параллельно включённых конденсатора  $C_1$  и катушки индуктивности с параметрами  $L_1$  и  $R_k$ , либо из последовательно включённых конденсатора  $C_2$  и катушки индуктивности с параметрами  $L_2$  и  $R_k$ .

Требуется разложить несинусоидальную э.д.с. на гармонические составляющие, для каждой гармоники определить величину и фазу тока в цепи нагрузки, действующее значение тока и мощность в цепи нагрузки. Построить графики изменения во времени э.д.с. и её отдельных гармоник, а также график изменения во времени гармоники тока, имеющей наибольшую амплитуду.

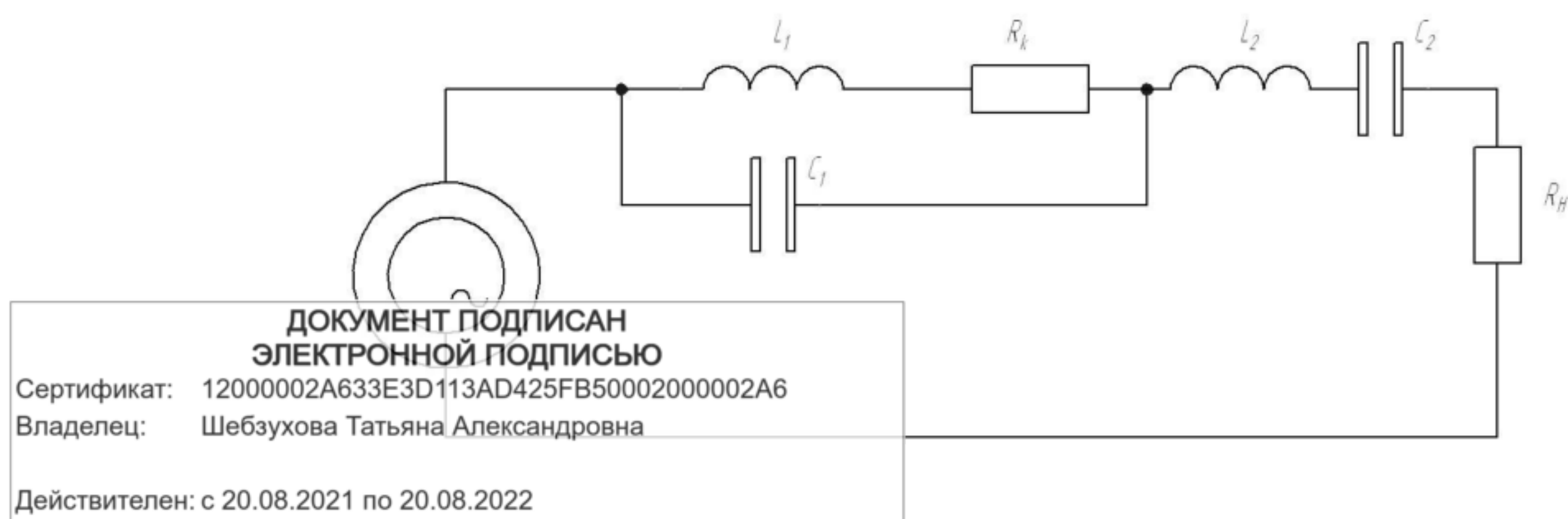


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче №5

Таблица 9 – Исходные данные к задаче №5

| № варианта | $r_n$ ,<br>Ом | $r_k$ ,<br>Ом | $L_1$ ,<br>Гн | $C_1$ ,<br>мкФ | $L_2$ ,<br>Гн | $C_2$ ,<br>мкФ | $f$ ,<br>Гц |
|------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------|
| 1          | 200           | 10            | -             | -              | 0,507         | 20             | 50          |
| 2          | 100           | 5             | -             | -              | 0,078         | 10             | 60          |
| 3          | 150           | 5             | 0,0563        | 20             | -             | -              | 100         |
| 4          | 500           | 10            | 0,0125        | 10             | -             | -              | 150         |
| 5          | 200           | 2             | -             | -              | 0,633         | 1              | 200         |
| 6          | 300           | 4             | -             | -              | 0,09          | 0,5            | 250         |
| 7          | 140           | 10            | 0,281         | 1              | -             | -              | 300         |
| 8          | 400           | 6             | 0,0625        | 0,5            | -             | -              | 350         |
| 9          | 300           | 3             | -             | -              | 0,158         | 1              | 400         |
| 10         | 500           | 10            | -             | -              | 0,225         | 5              | 50          |
| 11         | 250           | 5             | 0,352         | 20             | -             | -              | 60          |
| 12         | 240           | 8             | 0,5           | 1              | -             | -              | 75          |
| 13         | 260           | 6             | -             | -              | 1,268         | 2              | 100         |
| 14         | 350           | 7             | -             | -              | 0,391         | 0,5            | 120         |
| 15         | 180           | 5             | 1,127         | 1              | -             | -              | 150         |
| 16         | 320           | 6             | 0,141         | 0,5            | -             | -              | 200         |
| 17         | 520           | 4             | -             | -              | 0,811         | 0,5            | 250         |
| 18         | 360           | 10            | -             | -              | 0,0313        | 1              | 300         |
| 19         | 600           | 5             | 0,414         | 0,5            | -             | -              | 350         |
| 20         | 100           | 7             | 0,0176        | 1              | -             | -              | 400         |
| 21         | 50            | 8             | -             | -              | 1,014         | 10             | 50          |
| 22         | 600           | 10            | -             | -              | 0,156         | 5              | 60          |
| 23         | 70            | 4             | 0,451         | 10             | -             | -              | 75          |
| 24         | 120           | 3             | 0,0563        | 5              | -             | -              | 100         |
| 25         | 25            | 1             | -             | -              | 0,352         | 5              | 120         |
| 26         | 130           | 6             | -             | -              | 0,0352        | 2              | 200         |
| 27         | 540           | 7             | 0,203         | 2              | -             | -              | 250         |
| 28         | 720           | 10            | 0,0625        | 0,5            | -             | -              | 300         |
| 29         | 580           | 4             | -             | -              | 0,207         | 1              | 350         |
| 30         | 150           | 8             | -             | -              | 0,088         | 0,2            | 400         |

Таблица 10 – Исходные данные к задаче №5

| ωt° \ вар | 0 | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | по   | 120  | 130  | 140  | 150  | 160  | 170  |
|-----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1         | 0 | 4,22 | 8,32 | 11,5 | 13,4 | 13,6 | 12,3 | 9,96 | 7,37 | 5,18 | 3,89 | 3,71 | 4,48 | 5,74 | 6,81 | 7,07 | 6,05 | 3,6  |
| 2         | 0 | 7,22 | 12,1 | 14,1 | 13,6 | 11,5 | 9,00 | 7,40 | 7,80 | 10,4 | 14,7 | 19,9 | 24,5 | 27,1 | 26,7 | 23,1 | 16,6 | 8,45 |
| 3         | 0 | 78,7 | 140  | 160  | 150  | 112  | 42,6 | -    | -    | -    | -    | -    | 4,50 | 74,1 | 127  | 147  | 129  | 75,7 |
| 4         | 0 | 31,6 | 90,2 | 118  | 107  | 62,2 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 42   | 57   | 150  | 212  | 226  | 187  |
| 5         | 0 | 143  | 157  | 120  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |

Сертификат:  
Владелец:

12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|    |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5  | 0 | 12,7 | 26,5 | 39,5 | 50   | 56   | 58   | 55,5 | 50   | 43   | 36   | 30   | 26,8 | 24,8 | 23,5 | 21,5 | 17,4 | 10,2 |
| 6  | 0 | 18,2 | 28,6 | 30,8 | 26,8 | 19,9 | 14,5 | 13,9 | 20,2 | 33,1 | 50,5 | 68,2 | 81,9 | 87,8 | 83,7 | 69,8 | 48,4 | 23,6 |
| 7  | 0 | 15   | 31,7 | 48,3 | 62,5 | 72,8 | 77,9 | 77,8 | 73,3 | 65,7 | 56,9 | 48,5 | 41,5 | 36   | 31,7 | 27,2 | 21   | 12,1 |
| 8  | 0 | 20,3 | 47,4 | 76,3 | 101  | 117  | 120  | 110  | 89   | 62,2 | 35,2 | 13,2 | 0    | -3,7 | 0    | 7    | 12,2 | 10,8 |
| 9  | 0 | 18   | 28,3 | 31,7 | 31   | 30   | 32,4 | 40,4 | 54,3 | 72,6 | 91,8 | 108  | 116  | 114  | 102  | 79,9 | 52,7 | 24,6 |
| 10 | 0 | 26,4 | 53,9 | 78,8 | 97,9 | 109  | 111  | 106  | 96,1 | 83,9 | 72,7 | 64,3 | 59,2 | 56,5 | 53,9 | 48,8 | 38,7 | 22,3 |
| 11 | 0 | 166  | 278  | 312  | 262  | 146  | 0    | -    | -    | -    | -    | 0    | 165  | 312  | 401  | 407  | 327  | 179  |
| 12 | 0 | 28   | 60,5 | 93,2 | 121  | 140  | 147  | 142  | 128  | 108  | 86   | 67,2 | 53,8 | 46,1 | 42,4 | 39,6 | 33,2 | 20,6 |
| 13 | 0 | 33,1 | 69   | 103  | 130  | 146  | 151  | 144  | 130  | 111  | 93,5 | 79   | 69,6 | 64,4 | 61   | 55,8 | 45,1 | 26,7 |
| 14 | 0 | 42,5 | 66,7 | 71,9 | 62,5 | 46,5 | 33,7 | 32,4 | 47,1 | 77,4 | 118  | 159  | 191  | 205  | 195  | 163  | 113  | 55   |
| 15 | 0 | 26   | 45,1 | 58,3 | 68   | 77,3 | 88,8 | 104  | 122  | 141  | 157  | 167  | 167  | 156  | 134  | 103  | 68   | 32,2 |
| 16 | 0 | 43,8 | 93,8 | 142  | 180  | 202  | 206  | 191  | 163  | 129  | 96,6 | 71,7 | 57,6 | 53,5 | 55,2 | 56,3 | 50,3 | 32   |
| 17 | 0 | 45,3 | 74,9 | 88   | 87,9 | 81,4 | 76,2 | 79,1 | 94   | 120  | 153  | 185  | 208  | 214  | 200  | 164  | 114  | 55,7 |
| 18 | 0 | 119  | 231  | 310  | 341  | 319  | 252  | 161  | 69   | 0    | - 30 | - 16 | 32,6 | 98   | 155  | 183  | 166  | 102  |
| 19 | 0 | 47,4 | 105  | 163  | 212  | 244  | 252  | 238  | 205  | 161  | 117  | 80,6 | 57   | 47,4 | 47,6 | 50,4 | 47,6 | 32   |
| 20 | 0 | 41   | 69,4 | 85,8 | 94   | 99   | 107  | 122  | 144  | 172  | 200  | 222  | 232  | 225  | 199  | 158  | 106  | 51   |
| 21 | 0 | 82,5 | 169  | 244  | 293  | 307  | 287  | 239  | 177  | 116  | 70,6 | 48,6 | 50,6 | 70   | 94   | 108  | 100  | 64   |
| 22 | 0 | 30   | 33,6 | 19,4 | 0    | -    | 0    | 36,5 | 97   | 171  | 245  | 302  | 330  | 322  | 278  | 210  | 130  | 55,8 |
| 23 | 0 | 51,3 | 89   | 112  | 124  | 130  | 136  | 148  | 167  | 193  | 221  | 244  | 256  | 250  | 225  | 181  | 124  | 61   |
| 24 | 0 | 366  | 681  | 865  | 872  | 703  | 402  | 48   | -    | -    | -    | -    | -    | 191  | 443  | 571  | 532  | 326  |
| 25 | 0 | 75   | 130  | 161  | 168  | 161  | 148  | 141  | 148  | 171  | 206  | 246  | 278  | 292  | 278  | 236  | 168  | 85,5 |
| 26 | 0 | 45   | 84   | 116  | 143  | 167  | 190  | 213  | 235  | 253  | 265  | 268  | 258  | 236  | 200  | 155  | 104  | 51   |
| 27 | 0 | 54   | 114  | 173  | 225  | 265  | 288  | 293  | 283  | 261  | 232  | 202  | 175  | 151  | 130  | 108  | 81   | 45,3 |
| 28 | 0 | 57,4 | 97,2 | 120  | 131  | 139  | 150  | 170  | 201  | 240  | 280  | 311  | 325  | 314  | 279  | 221  | 148  | 71,2 |
| 29 | 0 | 90   | 188  | 278  | 345  | 378  | 373  | 336  | 278  | 213  | 157  | 120  | 104  | 107  | 118  | 123  | 109  | 69   |
| 30 | 0 | 96,5 | 161  | 188  | 184  | 160  | 134  | 123  | 137  | 179  | 242  | 311  | 367  | 395  | 380  | 323  | 229  | 115  |

### Задание №6

Выполнить расчёт переходного процесса в электрической цепи (рис. 7,8,9) при подключении её к источнику постоянного напряжения. Рассчитать и построить графики изменения во времени токов в ветвях и напряжений на ёмкости и индуктивности. Задачу решить операторным методом. Варианты задачи представлены в таблице 11.

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |

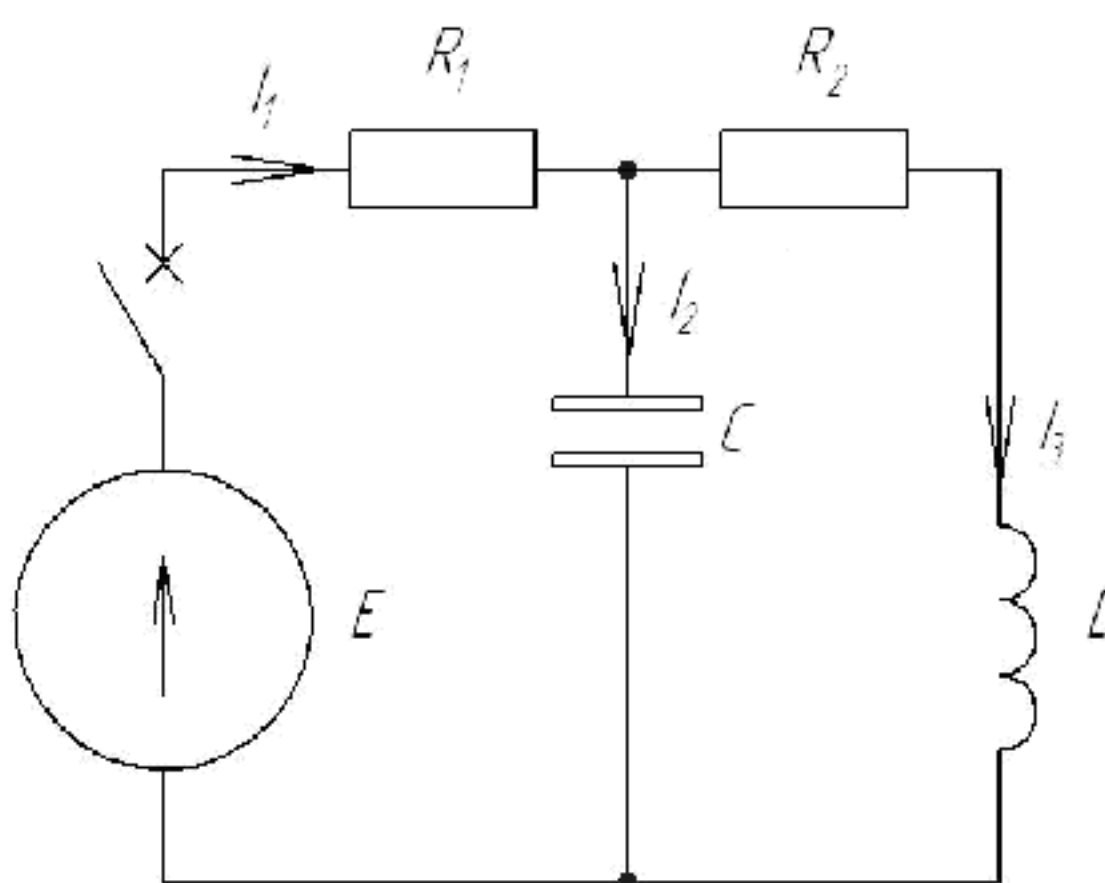


Рисунок 7 – Принципиальная схема к задаче №6

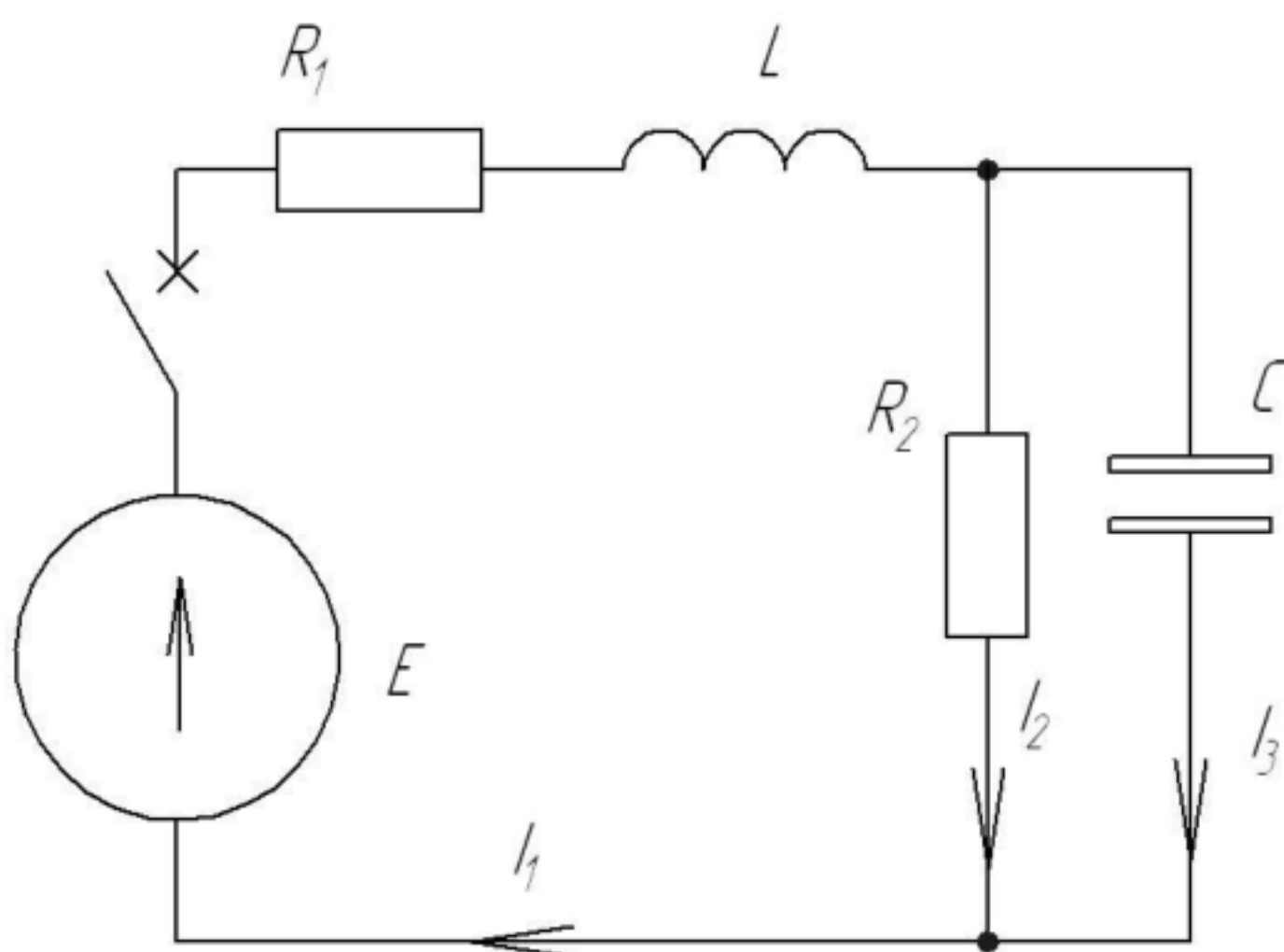


Рисунок 8 – Принципиальная схема к задаче №6

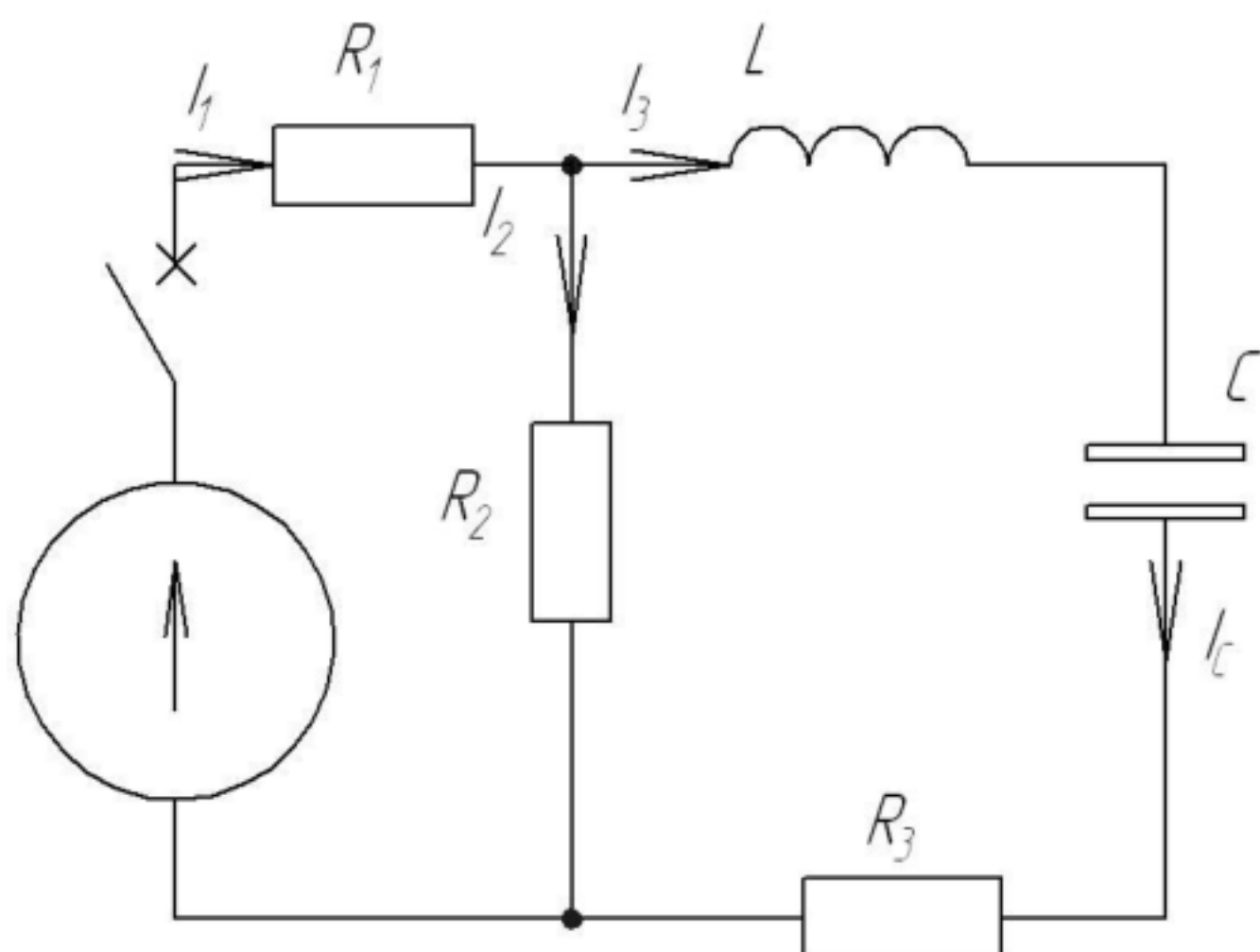


Рисунок 9 – Принципиальная схема к задаче №6

Таблица 11 – Исходные данные к задаче №6

|                                          |                                        |  |  |  |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------------------|----------------------------------------|--|--|--|----|----|----|----|----|----|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН                        |                                        |  |  |  |    |    |    |    |    |    |
| ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ                     |                                        |  |  |  |    |    |    |    |    |    |
| Сертификат:                              | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |  |  |  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Владелец:                                | Шебзухова Татьяна Александровна        |  |  |  | 8  | 9  | 7  | 8  | 9  | 7  |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022 |                                        |  |  |  | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |

|                |     |       |       |       |       |        |       |       |     |     |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-----|-----|
| № рис.         | 8   | 9     | 7     | 8     | 9     | 7      | 8     | 9     | 7   | 8   |
| № вар.         | 21  | 22    | 23    | 24    | 25    | 26     | 27    | 28    | 29  | 30  |
| № рис.         | 9   | 7     | 8     | 9     | 7     | 8      | 9     | 7     | 8   | 9   |
| $E, B$         | 10  | 50    | 100   | 15    | 20    | 9      | 24    | 15    | 100 | 15  |
| $R_1, k\Omega$ | 0,5 | 0,2   | 1     | 0,5   | 0,2   | 0,1    | 0,5   | 2     | 5   | 1   |
| $R_2, k\Omega$ | 2   | 1     | 2     | 1     | 0,5   | 0,2    | 0,5   | 3     | 5   | 1   |
| $C, \mu\Phi$   | 100 | 10    | 20    | 5     | 10    | 1      | 0,5   | 50    | 1   | 0,2 |
| $L, Гн$        | 0,5 | 20    | 5     | 10    | 10    | 5      | 2     | 20    | 0,5 | 2   |
| $R_3, k\Omega$ | 0   | 3,346 | 0,452 | 3,131 | 2,315 | 15,568 | 6,363 | 0,127 | 0   | 10  |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

### Задание №7

На рис. 10...19 приведены схемы трехфазных цепей. В каждой из них имеется трехфазный генератор, создающий трехфазную симметричную систему ЭДС, и симметричная нагрузка. Действующее значение ЭДС фазы генератора  $E_A$ , период  $T$ , параметры  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L$ ,  $C_1$  и  $C_2$  приведены в таблице 12.

Начальную фазу ЭДС  $E_A$  принять нулевой. Требуется: рассчитать токи, построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить действующее и мгновенное напряжение между заданными точками и подсчитать активную мощность трехфазной системы.

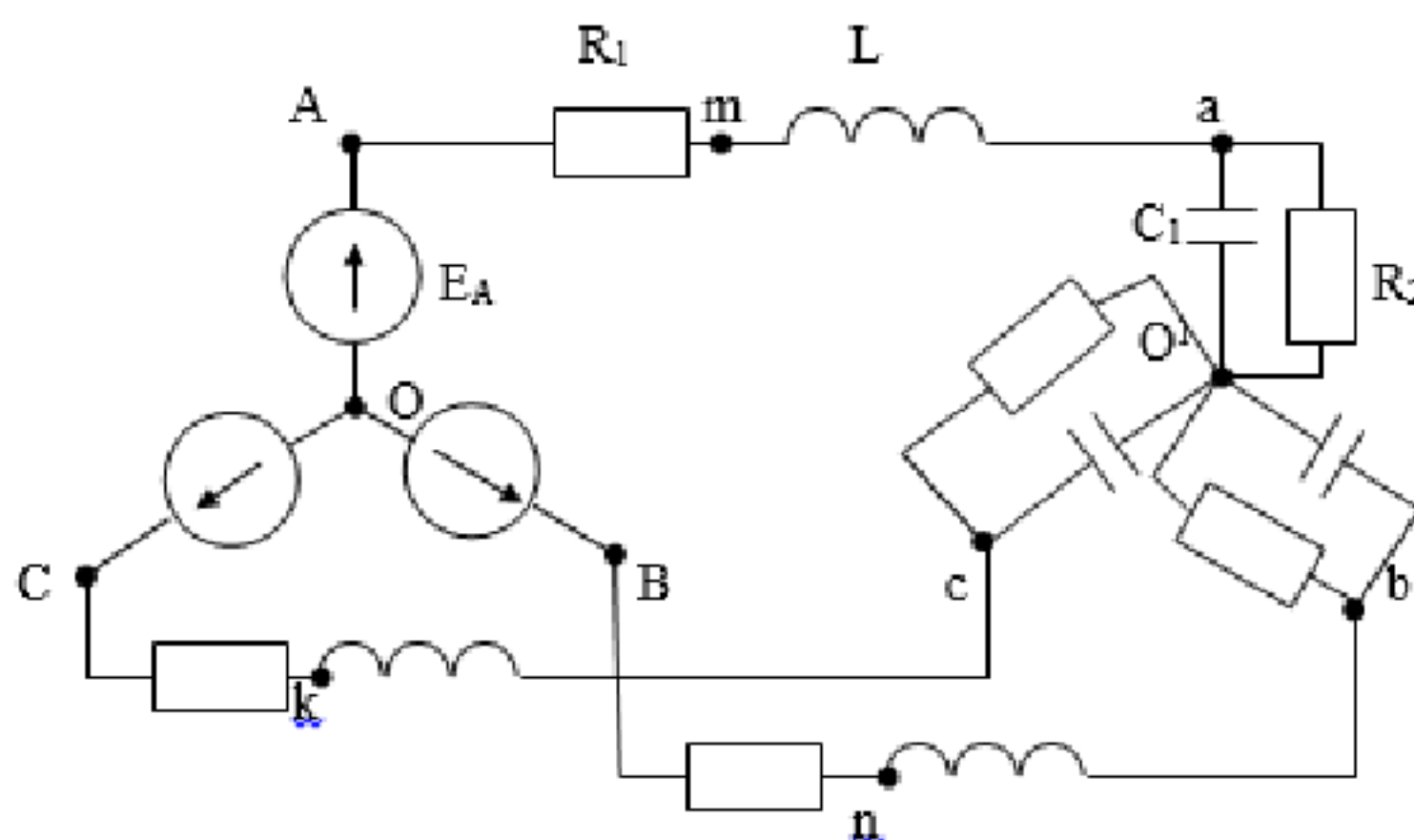


Рисунок 10 – Принципиальная схема к задаче №7

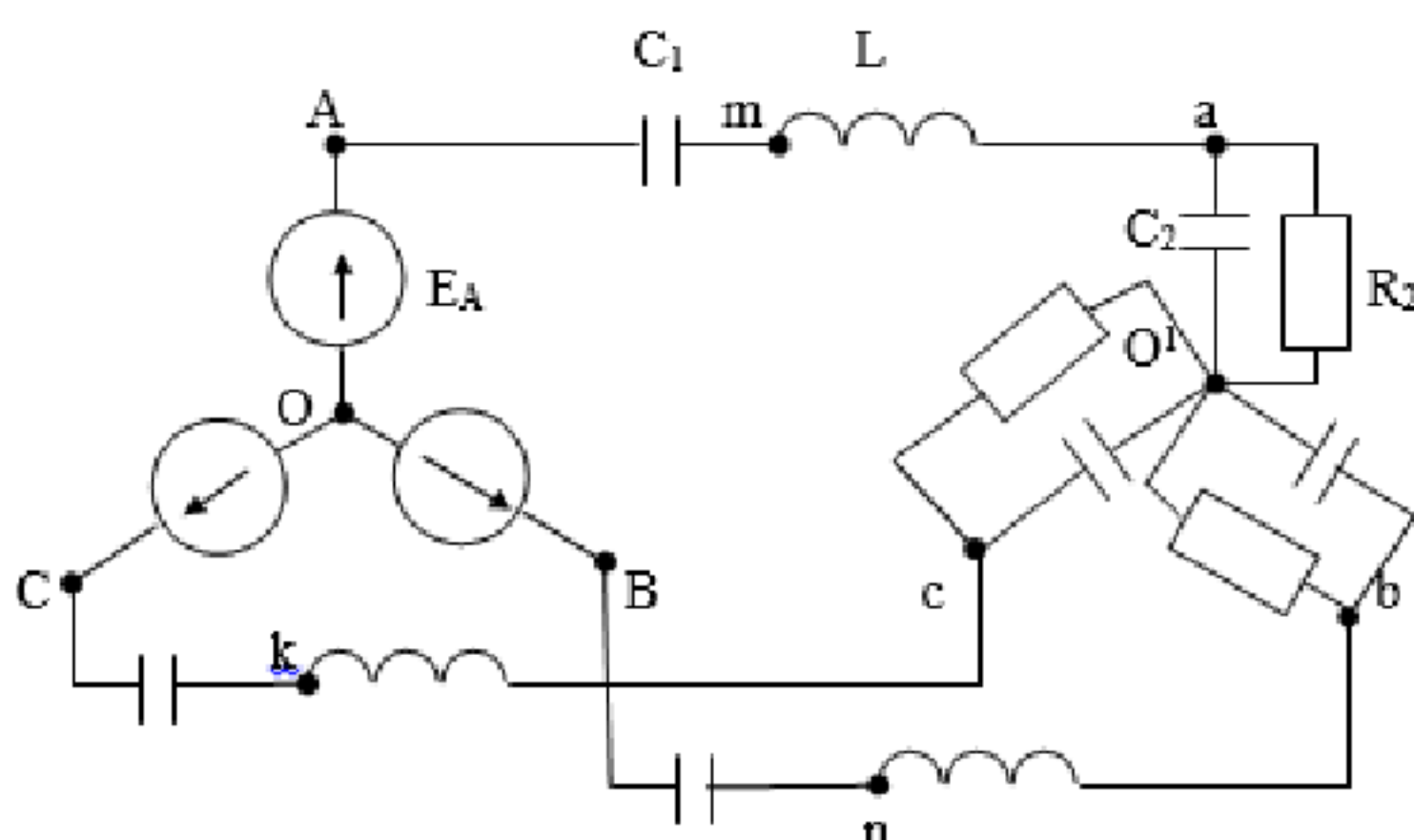
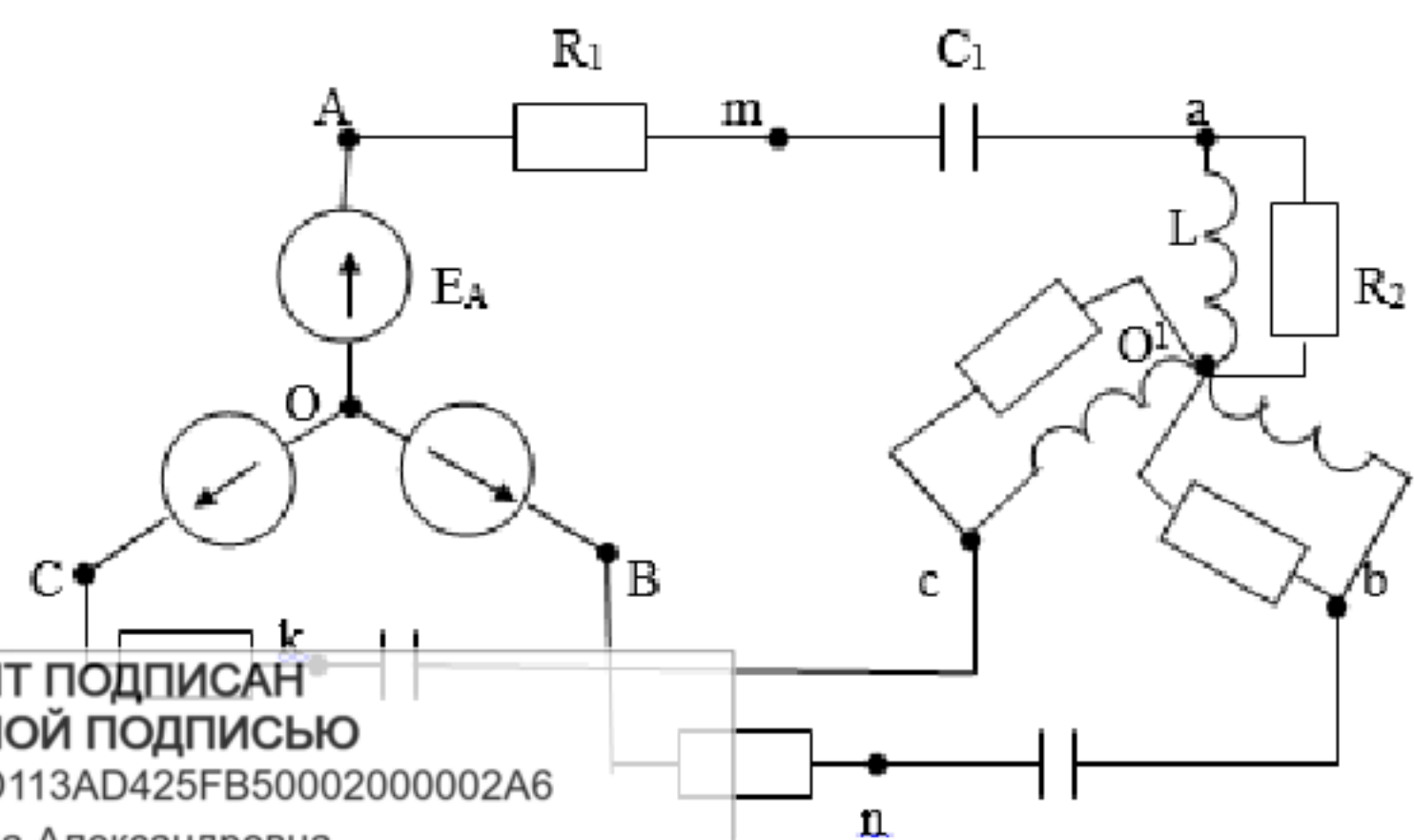


Рисунок 11 – Принципиальная схема к задаче №7



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 12 – Принципиальная схема к задаче №7

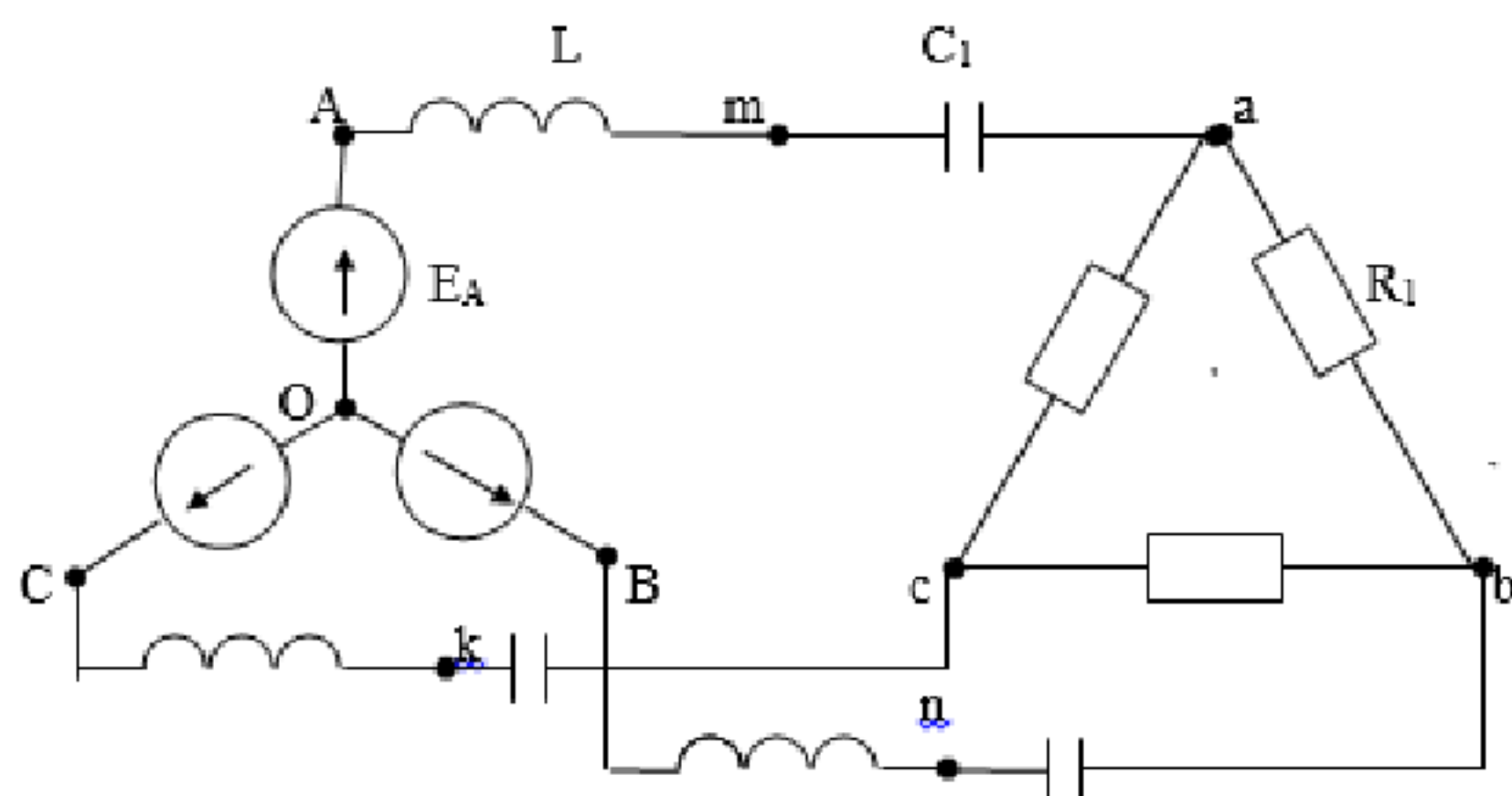


Рисунок 13 – Принципиальная схема к задаче №7

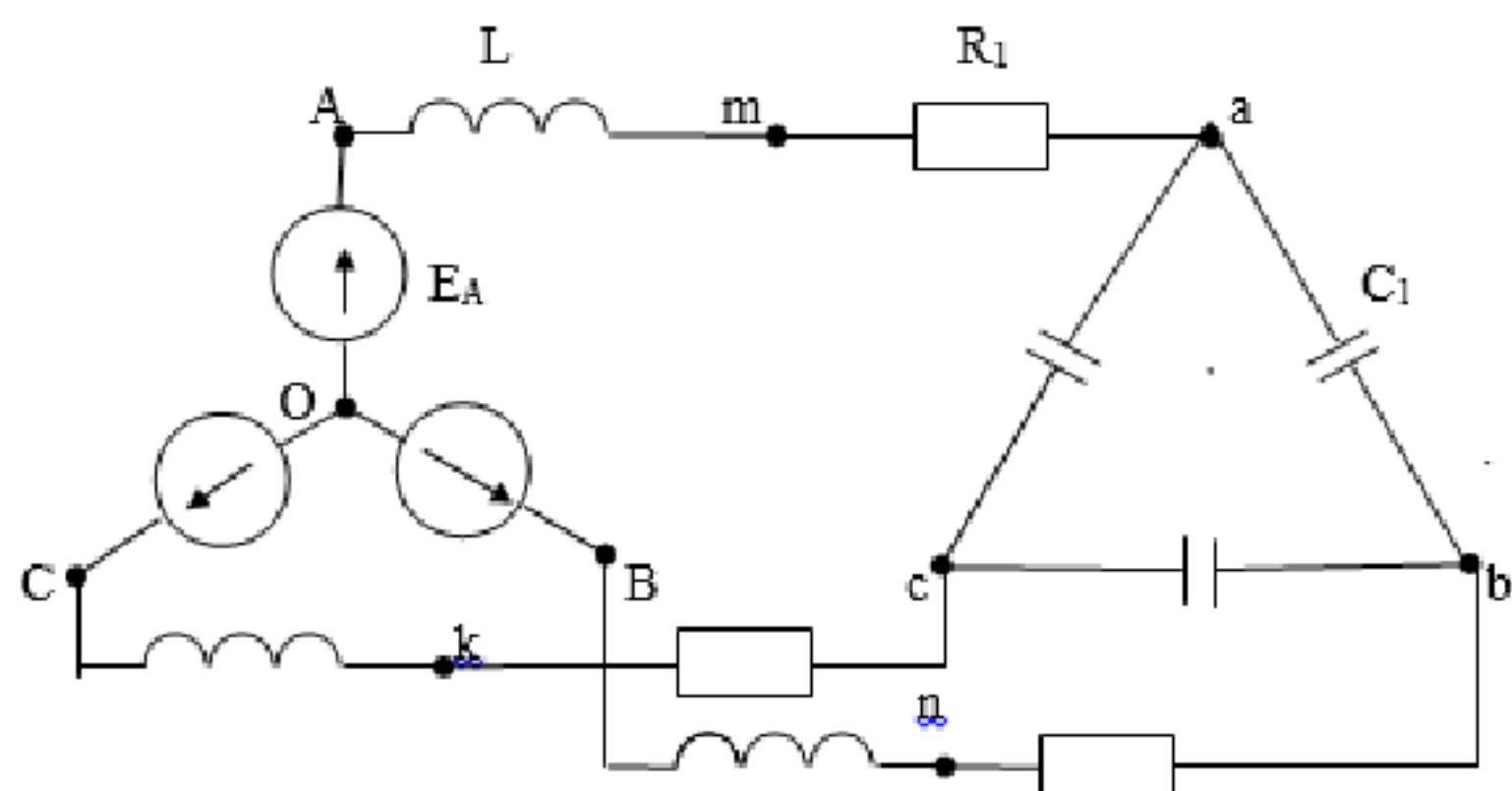


Рисунок 14 – Принципиальная схема к задаче №7

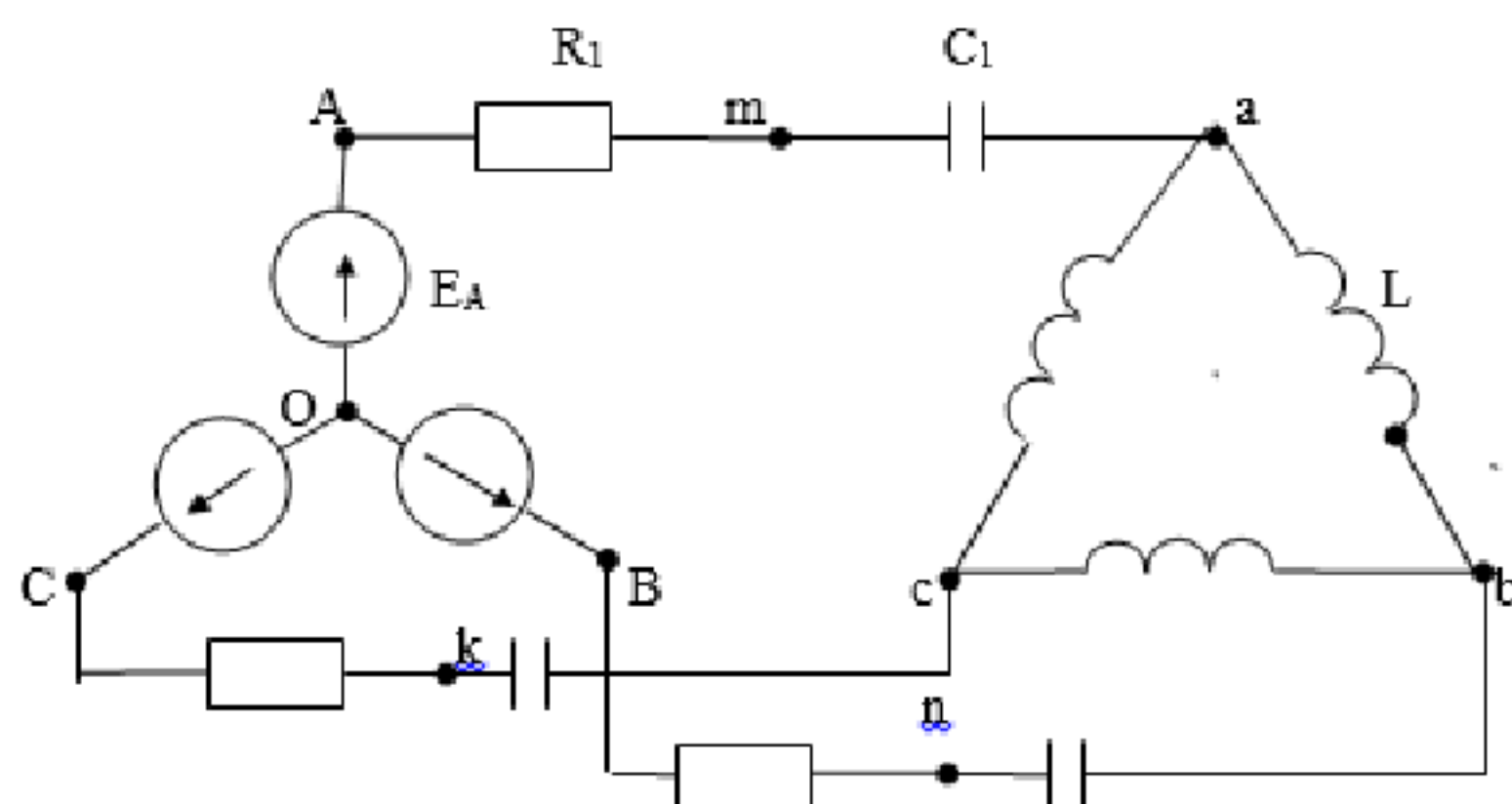
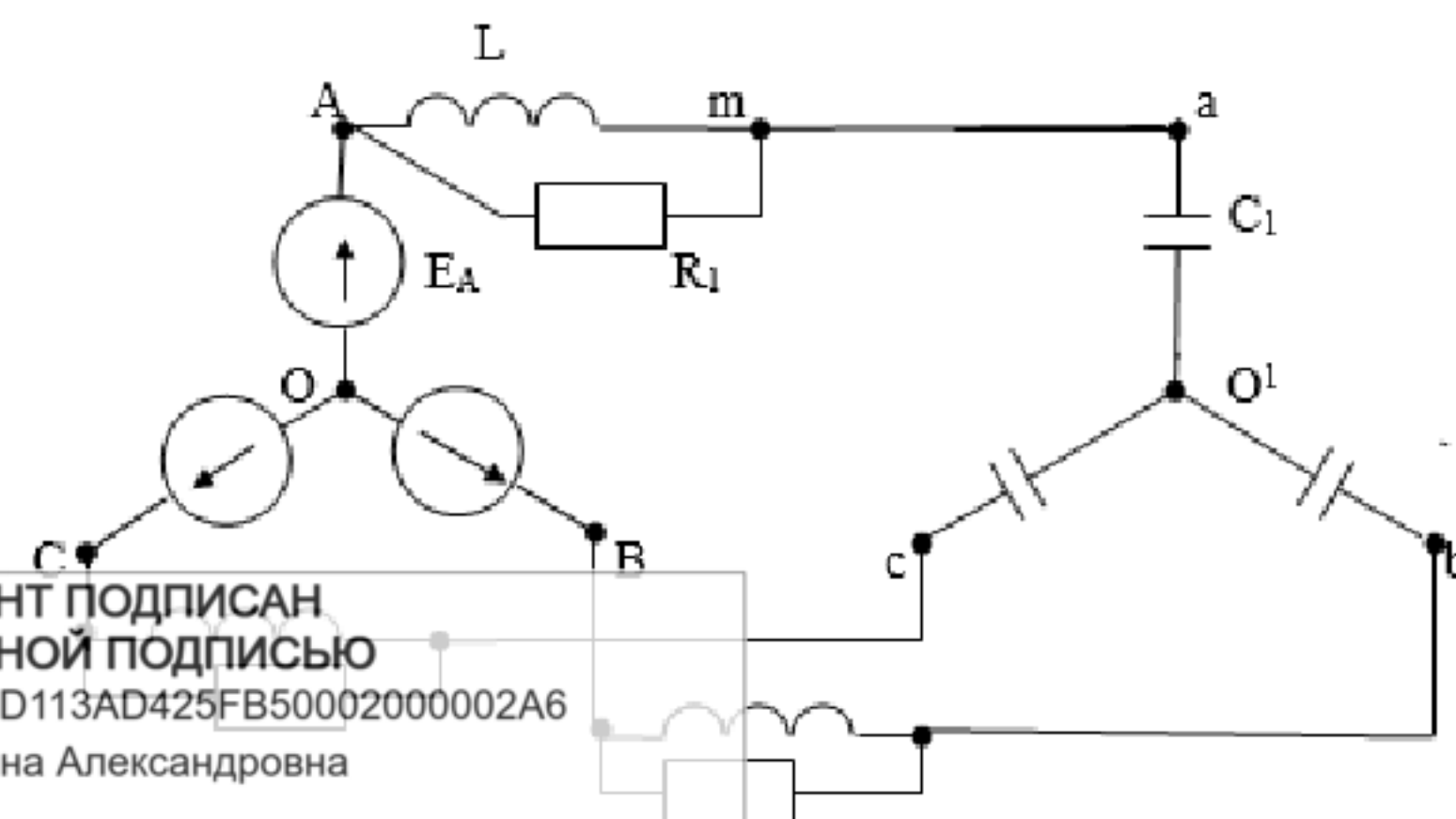


Рисунок 15 – Принципиальная схема к задаче №7



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 16 – Принципиальная схема к задаче №7

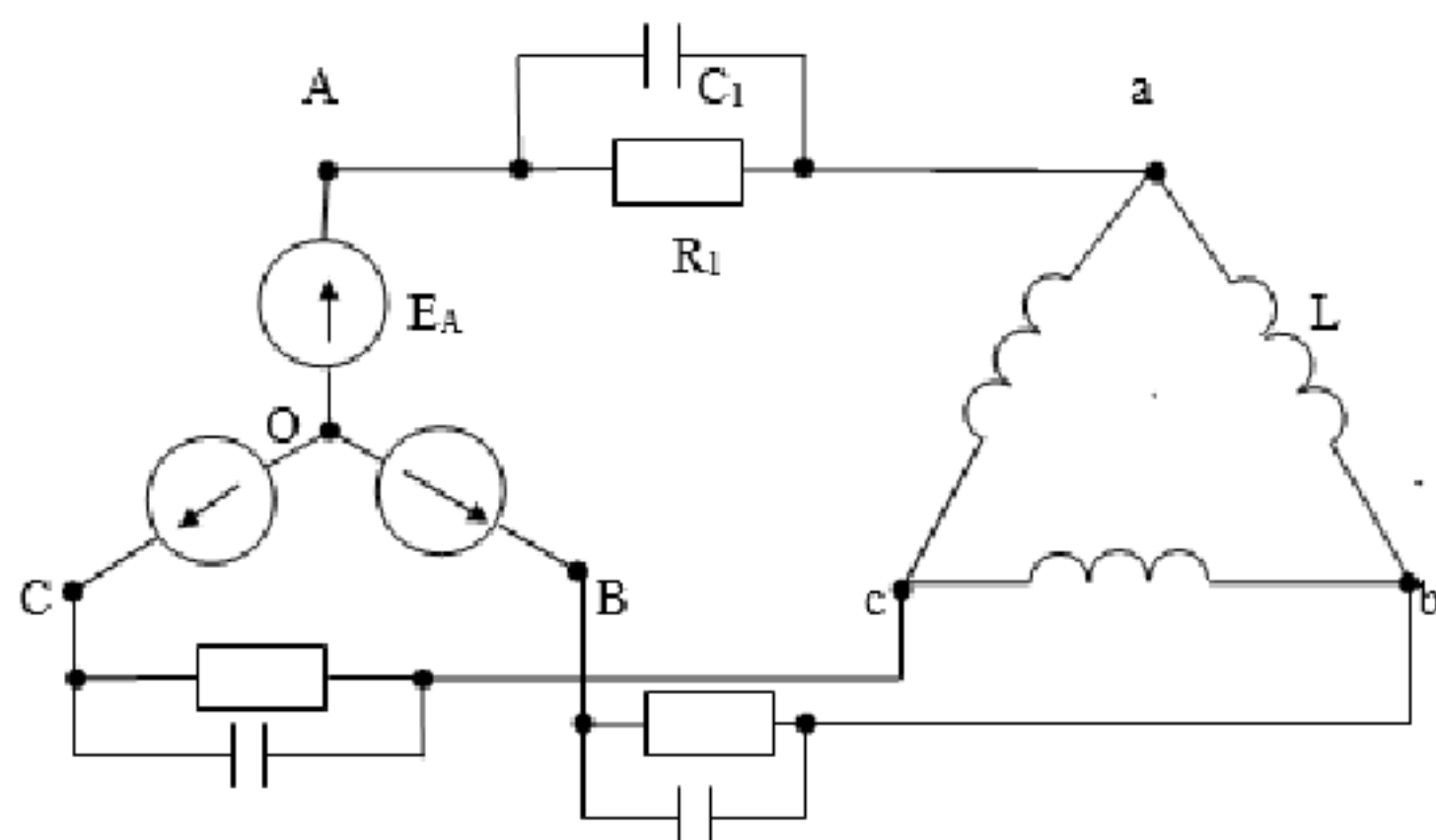


Рисунок 17 – Принципиальная схема к задаче №7

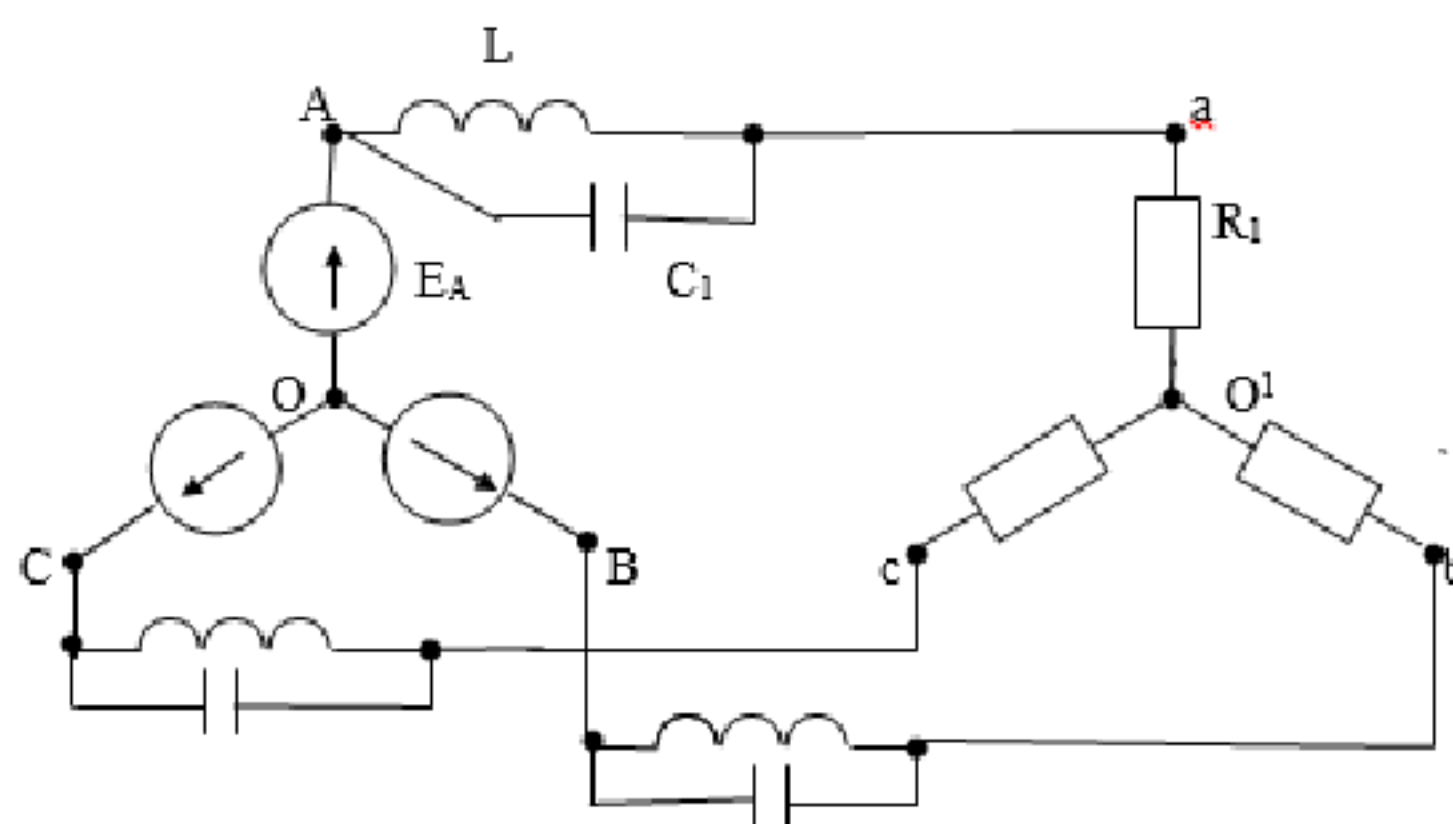


Рисунок 18 – Принципиальная схема к задаче №7

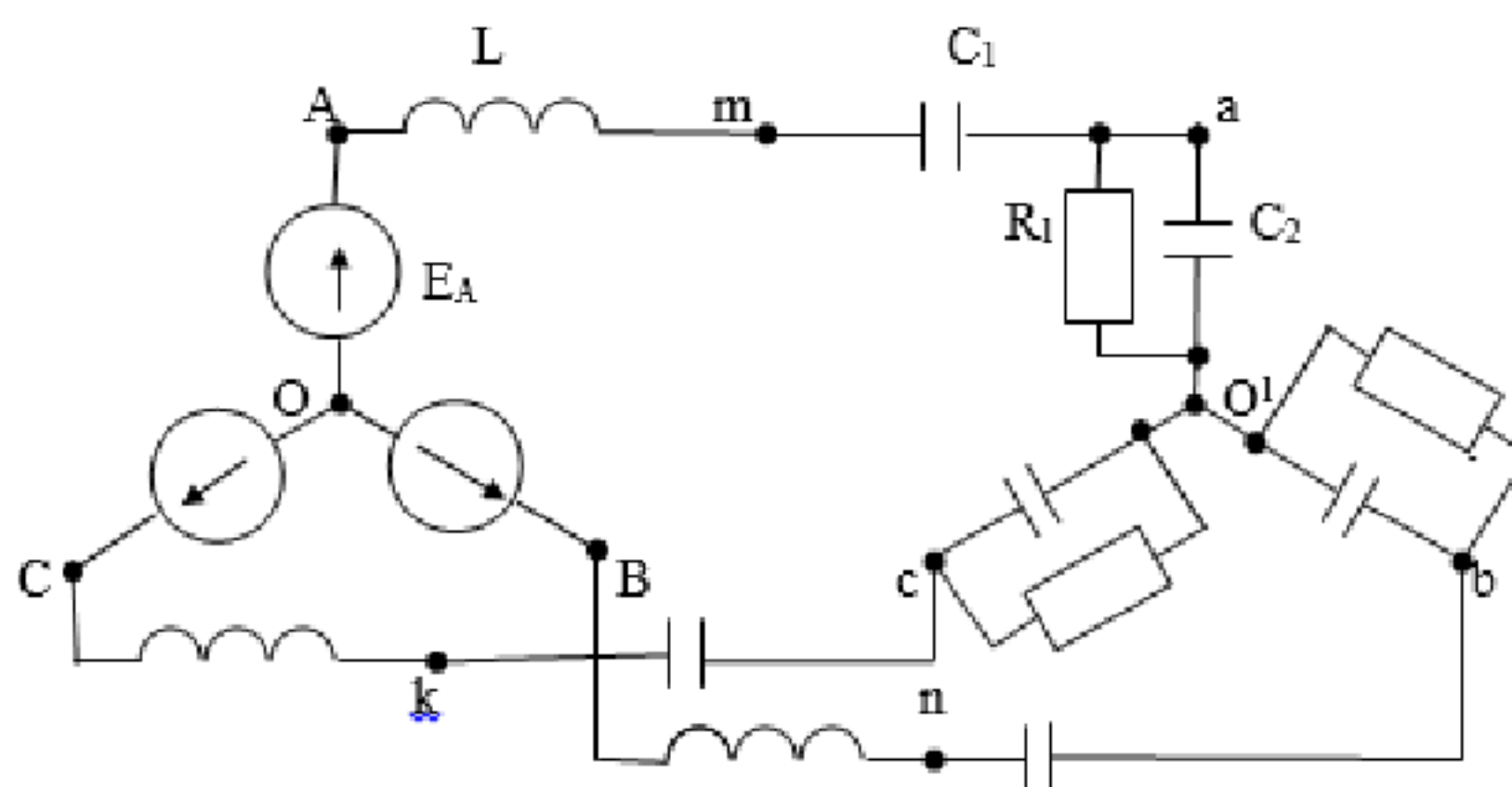


Рисунок 19 – Принципиальная схема к задаче №7

Таблица 12 – Исходные данные к задаче №6

| Вариант | Рису-<br>нок | $E_A, В$ | $T, с$ | $L, мГн$ | $C_1, мкФ$ | $C_2, мкФ$ | $R_1, Ом$ | $R_2, Ом$ | Опреде-<br>лить |
|---------|--------------|----------|--------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| 1       | 10           | 100      | 0,015  | 22,32    | 276        | -          | 44,3      | 8,66      | $U_{bc}$        |
| 2       | 11           | 80       | 0,015  | 18,33    | 598        | 138        | -         | 17,32     | $U_{bc}$        |
| 3       | 12           | 120      | 0,015  | 4,78     | 398        | -          | 7,66      | 2         | $U_{bc}$        |
| 4       | 13           | 100      | 0,015  | 25,88    | 119,6      | -          | 25,98     | -         | $U_{bc}$        |
| 5       | 14           | 80       | 0,015  | 17,94    | 79,7       | -          | 4,33      | -         | $U_{bc}$        |
| 6       | 15           | 90       | 0,015  | 107,6    | 119,6      | -          | 8,66      | -         | $U_{bc}$        |

|    |    |     |       |        |        |       |       |       |                 |
|----|----|-----|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------------|
| 7  | 16 | 70  | 0,015 | 41,4   | 175,1  | -     | 17,32 | -     | U <sub>bc</sub> |
| 8  | 17 | 50  | 0,015 | 8,75   | 138    | -     | 17,32 | -     | U <sub>bc</sub> |
| 9  | 18 | 30  | 0,015 | 23,92  | 478,5  | -     | 17,32 | -     | U <sub>bc</sub> |
| 10 | 19 | 10  | 0,015 | 35,88  | 210,9  | 138   | 17,32 | -     | U <sub>bc</sub> |
| 11 | 10 | 80  | 0,02  | 29,71  | 376,5  | -     | 4,33  | 8,66  | U <sub>ca</sub> |
| 12 | 11 | 60  | 0,02  | 24,39  | 796,2  | 183,8 | -     | 17,32 | U <sub>ca</sub> |
| 13 | 12 | 40  | 0,02  | 6,36   | 530    | -     | 7,66  | 2     | U <sub>ca</sub> |
| 14 | 13 | 100 | 0,02  | 47,7   | 159,2  | -     | 25,98 | -     | U <sub>ca</sub> |
| 15 | 14 | 70  | 0,02  | 23,88  | 106,1  | -     | 4,33  | -     | U <sub>ca</sub> |
| 16 | 15 | 20  | 0,02  | 143,3  | 159,2  | -     | 8,66  | -     | U <sub>ca</sub> |
| 17 | 16 | 30  | 0,02  | 55,16  | 233,1  | -     | 17,32 | -     | U <sub>ca</sub> |
| 18 | 17 | 10  | 0,02  | 11,65  | 183,8  | -     | 17,32 | -     | U <sub>ca</sub> |
| 19 | 18 | 50  | 0,02  | 31,85  | 636,9  | -     | 17,32 | -     | U <sub>ca</sub> |
| 20 | 19 | 90  | 0,02  | 47,7   | 280,8  | 183,7 | 1732  | -     | U <sub>ca</sub> |
| 21 | 10 | 10  | 0,025 | 37,32  | 461,6  | -     | 4,33  | 8,66  | U <sub>mn</sub> |
| 22 | 11 | 30  | 0,025 | 30,64  | 1000   | 230   | -     | 17,32 | U <sub>mn</sub> |
| 23 | 12 | 50  | 0,025 | 8      | 666    | -     | 7,66  | 2     | U <sub>mn</sub> |
| 24 | 13 | 70  | 0,025 | 60     | 200    | -     | 25,98 | -     | U <sub>mn</sub> |
| 25 | 14 | 90  | 0,025 | 30     | 133,3  | -     | 4,33  | -     | U <sub>mn</sub> |
| 26 | 15 | 100 | 0,025 | 180    | 200    | -     | 8,66  | -     | U <sub>mn</sub> |
| 27 | 16 | 80  | 0,025 | 69,28  | 292,8  | -     | 17,32 | -     | U <sub>Ab</sub> |
| 28 | 17 | 60  | 0,025 | 14,64  | 230,8  | -     | 17,32 | -     | U <sub>Ab</sub> |
| 29 | 18 | 40  | 0,025 | 40     | 800    | -     | 17,32 | -     | U <sub>Ab</sub> |
| 30 | 19 | 20  | 0,025 | 60     | 352,7  | 230   | 17,32 | -     | U <sub>mn</sub> |
| 31 | 10 | 100 | 0,04  | 59,42  | 735    | -     | 4,33  | 8,66  | U <sub>nk</sub> |
| 32 | 11 | 80  | 0,04  | 48,78  | 1592   | 368   | -     | 17,32 | U <sub>nk</sub> |
| 33 | 12 | 60  | 0,04  | 12,738 | 1061   | -     | 7,66  | 2     | U <sub>nk</sub> |
| 34 | 13 | 40  | 0,04  | 95,5   | 318,4  | -     | 25,98 | -     | U <sub>nk</sub> |
| 35 | 14 | 20  | 0,04  | 47,77  | 212,2  | -     | 4,33  | -     | U <sub>nk</sub> |
| 36 | 15 | 90  | 0,04  | 286,6  | 318    | -     | 8,66  | -     | U <sub>nk</sub> |
| 37 | 16 | 70  | 0,04  | 110,32 | 466,3  | -     | 17,32 | -     | U <sub>nk</sub> |
| 38 | 17 | 50  | 0,04  | 23,3   | 367,5  | -     | 17,32 | -     | U <sub>nk</sub> |
| 39 | 18 | 30  | 0,04  | 63,69  | 1273,9 | -     | 17,32 | -     | U <sub>nk</sub> |
| 40 | 19 | 10  | 0,04  | 95,5   | 561,7  | 36,75 | 17,32 | -     | U <sub>nk</sub> |
| 41 | 10 | 100 | 0,01  | 14,86  | 183,8  | -     | 4,33  | 8,66  | U <sub>ab</sub> |
| 42 | 11 | 80  | 0,01  | 12,19  | 398    | 91,9  | -     | 17,32 | U <sub>ab</sub> |
| 43 | 12 | 60  | 0,01  | 3,18   | 265,2  | -     | 7,66  | 2     | U <sub>ab</sub> |
| 44 | 13 | 40  | 0,01  | 23,8   | 79,6   | -     | 25,98 | -     | U <sub>ab</sub> |
| 45 | 14 | 20  | 0,01  | 11,94  | 53     | -     | 4,33  | -     | U <sub>ab</sub> |
| 46 | 15 | 90  | 0,01  | 71,65  | 79,6   | -     | 8,66  | -     | U <sub>ab</sub> |
| 47 | 16 | 70  | 0,01  | 27,58  | 116,5  | -     | 17,32 | -     | U <sub>ab</sub> |
| 48 | 17 | 50  | 0,01  | 5,82   | 91,8   | -     | 17,32 | -     | U <sub>ab</sub> |
| 49 | 18 | 30  | 0,01  | 15,92  | 318,4  | -     | 17,32 | -     | U <sub>ab</sub> |
| 50 | 19 | 10  | 0,01  | 23,8   | 140,4  | 91,9  | 17,32 | -     | U <sub>ab</sub> |

### Задание №8

По параметрам линии, частоте и значениям величин в конце линии, указанным в таб-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Третью неизвестную величину в конце линии.

2. Волновое сопротивление линии.
3. Постоянную распространения.
4. Комплексы напряжения и тока в начале линии.
5. Активную и полную мощности в начале и в конце линии.
6. КПД линии.
7. Полагая, что линия стала линией без потерь, а нагрузка в конце линии стала активной и равной модулю комплексной нагрузки, указанной в варианте задания, определить комплексы напряжения и тока в начале линии, а также длину электромагнитной волны.
8. Для линии без потерь построить график распределения действующего напряжения вдоль линии в функции координаты  $u$ .

Таблица 13 – Исходные данные к задаче №7

| Вариант | $f$ ,<br>Гц | $R_0$ ,<br>Ом/км | $C_0$ ,<br>$10^{-9}$ ,<br>Ф/км | $L_0$ ,<br>$10^{-3}$ ,<br>Гн/км | $G_0$ ,<br>$10^{-6}$ ,<br>См/км | $\dot{U}_2$ ,<br>В | $\dot{I}_2$ ,<br>мА    | $Z_n$ ,<br>Ом            | $l$ ,<br>км |
|---------|-------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| 1       | 500         | 10               | 9,6                            | 5,08                            | 1,25                            | 100                | $64,2e^{j15^\circ}$    | -                        | 200         |
| 2       | 500         | 5                | 11,8                           | 4,16                            | 0,75                            | -                  | $21,1e^{j11^\circ}$    | $1188 e^{-j10,9^\circ}$  | 250         |
| 3       | 10000       | 58               | 5,75                           | 4,24                            | 0,51                            | 34,4               | -                      | $1720 e^{-j6,15^\circ}$  | 11,65       |
| 4       | 2500        | 78,6             | 11,5                           | 10                              | 1,75                            | -                  | $10 e^{j13,2^\circ}$   | $1965 e^{-j13,2^\circ}$  | 23,7        |
| 5       | 1500        | 24               | 10,6                           | 4,6                             | 0,175                           | 40                 | 100                    | -                        | 73          |
| 6       | 1500        | 10               | 12                             | 4,1                             | 1,25                            | -                  | 50                     | 300                      | 80          |
| 7       | 600         | 12,6             | 12,7                           | 3,85                            | 0,8                             | 5                  | -                      | $1270 e^{-j20^\circ}$    | 120         |
| 8       | 7000        | 135              | 6,11                           | 5,7                             | 2,25                            | -                  | $23,9 e^{j14,3^\circ}$ | $512 e^{-j14,3^\circ}$   | 16,3        |
| 9       | 1200        | 12,4             | 10                             | 4,8                             | 1,6                             | 40                 | -                      | $355 e^{-j8,8^\circ}$    | 100         |
| 10      | 400         | 2,9              | 13                             | 3,8                             | 0,7                             | -                  | $18 e^{j7,8^\circ}$    | $278 e^{-j7,8^\circ}$    | 315         |
| 11      | 600         | 11               | 10                             | 6                               | 0,65                            | 94,7               | -                      | $1620 e^{-j12,4^\circ}$  | 142         |
| 12      | 450         | 9,6              | 14,8                           | 10,8                            | 0,725                           | -                  | $12,2 e^{j8,2^\circ}$  | $1800 e^{-j8,3^\circ}$   | 114         |
| 13      | 8000        | 97,2             | 6,4                            | 7,5                             | 0,82                            | 60                 | -                      | 667                      | 12,7        |
| 14      | 4330        | 102              | 4,2                            | 6,4                             | 3,3                             | -                  | $16,3 e^{j15,4^\circ}$ | $800 e^{-j15,35^\circ}$  | 21          |
| 15      | 2000        | 25,2             | 3,6                            | 6,7                             | 1                               | 31                 | -                      | $690 e^{-j7,75^\circ}$   | 64,8        |
| 16      | 2000        | 16,7             | 19                             | 2,66                            | 1,5                             | -                  | 13,1                   | 800                      | 42,7        |
| 17      | 1800        | 54               | 6,8                            | 7,08                            | 1,9                             | 24                 | -                      | $2000 e^{-j16,25^\circ}$ | 47,1        |
| 18      | 4500        | 54               | 8,2                            | 10,4                            | 0,46                            | -                  | $20 e^{j5,2^\circ}$    | $400 e^{-j5,3^\circ}$    | 23          |
| 19      | 1600        | 20,4             | 3,4                            | 7,08                            | 0,9                             | 33,9               | -                      | $1060 e^{-j7,25^\circ}$  | 92,3        |
| 20      | 700         | 29,2             | 8,2                            | 6,08                            | 0,675                           | -                  | $33,3 e^{j23,3^\circ}$ | $1800 e^{-j23,15^\circ}$ | 105         |
| 21      | 500         | 20               | 4,8                            | 10,16                           | 0,625                           | -                  | $32,1 e^{j15^\circ}$   | $3120 e^{-j15^\circ}$    | 200         |
| 22      | 1000        | 10               | 11,8                           | 4,16                            | 1,5                             | 100                | -                      | $1188 e^{-j10,25^\circ}$ | 125         |
| 23      | 5000        | 29               | 11,5                           | 4,24                            | 0,51                            | -                  | $10 e^{j6,3^\circ}$    | $1220 e^{-j6,15^\circ}$  | 15          |
| 24      | 5000        | 157,2            | 11,5                           | 10                              | 3,5                             | 78,6               | -                      | $1965 e^{-j13,2^\circ}$  | 11,85       |
| 25      | 1500        | 48               | 5,3                            | 9,2                             | 0,0875                          | -                  | 50                     | 800-                     | 73          |
| 26      | 3000        | 20               | 12                             | 4,1                             | 2,5                             | 60                 | 200                    | -                        | 40          |
| 27      | 2400        | 50,4             | 2,175                          | 3,85                            | 0,8                             | -                  | $1,97 e^{j20^\circ}$   | $2540 e^{-j20^\circ}$    | 60          |
| 28      | 1200        | 24,8             | 1,9                            | 2,25                            | 5                               | 5                  | -                      | $209,5 e^{-j14,3^\circ}$ | 40          |
| 29      | 1200        | 24,8             | 1,9                            | 2,25                            | 5                               | -                  | $56,4 e^{j8,8^\circ}$  | $710 e^{-j8,8^\circ}$    | 100         |
| 30      | 800         | 5,8              | 13                             | 3,8                             | 104                             | 20                 | -                      | $278 e^{-j7,8^\circ}$    | 157,5       |

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|    |      |       |      |       |       |      |                         |                          |       |
|----|------|-------|------|-------|-------|------|-------------------------|--------------------------|-------|
| 31 | 300  | 5,5   | 20   | 6     | 0,65  | -    | $26,05 e^{j12,9^\circ}$ | $1150 e^{-j12,4^\circ}$  | 200   |
| 32 | 900  | 19,2  | 14,8 | 10,8  | 1,55  | 88   | -                       | $1800 e^{-j8,3^\circ}$   | 57    |
| 33 | 8000 | 194,4 | 3,2  | 15    | 0,41  | -    | 45                      | 1334                     | 12,7  |
| 34 | 6500 | 204   | 2,8  | 8,54  | 2,1   | 25,4 | $24,5 e^{j15,4^\circ}$  | -                        | 14,9  |
| 35 | 1000 | 12,6  | 7,2  | 6,7   | 1     | -    | $22,5 e^{j7,75^\circ}$  | $490 e^{-j7,75^\circ}$   | 91,5  |
| 36 | 4000 | 33,4  | 19   | 2,66  | 3     | 42   | -                       | 800                      | 21,35 |
| 37 | 1800 | 108   | 3,4  | 14,16 | 0,95  | -    | $6 e^{j6,25^\circ}$     | $4000 e^{-j16,25^\circ}$ | 47,1  |
| 38 | 9000 | 108   | 8,2  | 10,4  | 0,92  | 32   | -                       | $400 e^{-j5,2^\circ}$    | 11,5  |
| 39 | 800  | 10,2  | 6,8  | 7,08  | 0,9   | -    | $16 e^{j7,25^\circ}$    | $750 e^{-j7,25^\circ}$   | 130   |
| 40 | 700  | 14,6  | 8,2  | 3,04  | 0,675 | 42,3 | -                       | $1255 e^{-j23,15^\circ}$ | 149   |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

### 3. Общие требования к написанию и оформлению работы

#### Основные требования к работе

При выполнении и оформлении контрольной по ГОСТу надо учитывать общие требования, которые предъявляются к работе:

- студент должен придерживаться заданной тематики;
- запрещено менять тему самостоятельно без обращения к преподавателю;
- при оформлении работы нужно учитывать нормы и ГОСТы;
- контрольная выполняется на основании не менее семи источников, выбранных автором;
- работа должна быть авторской, в ней должны содержаться собственные выводы студента;
- текст контрольной должен иметь объем не менее 7 листов.

#### Оформление по ГОСТу текста контрольной

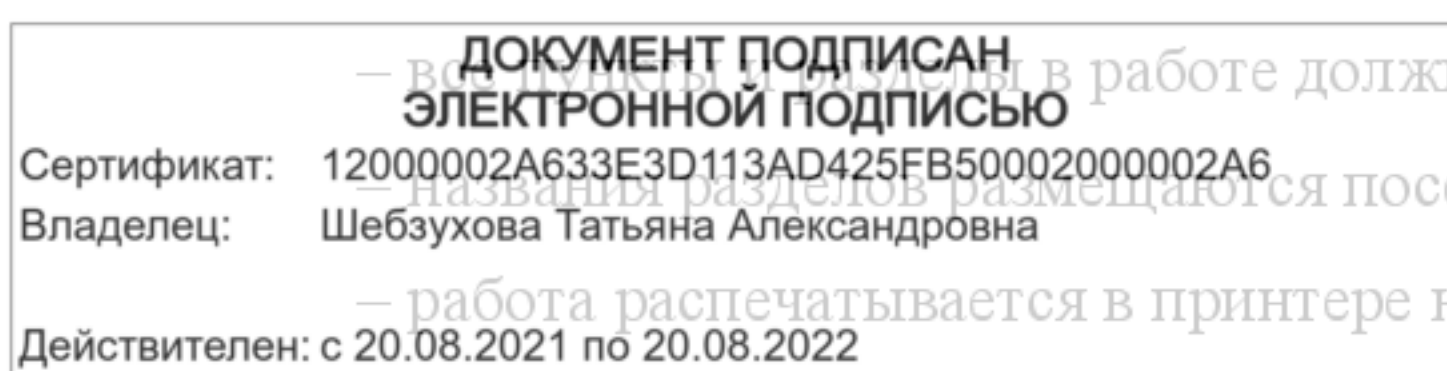
Когда работа выполнена, ее необходимо привести в соответствующий вид согласно ГОСТам:

- контрольную набирают в Word или другом текстовом редакторе с аналогичным функционалом;
- при наборе нужно использовать шрифт Times New Roman;
- интервал между строк — полуторный;
- размер шрифта — 14;
- текст выравнивается по ширине;
- в тексте делают красные строки с отступом в 12,5 мм;
- нижнее и верхнее поля страницы должны иметь отступ в 20 мм;
- слева отступ составляет 30 мм, справа — 15 мм;
- контрольная всегда нумеруется с первого листа, но на титульном листе номер не ставят;
- номер страницы в работе всегда выставляется в верхнем правом углу;
- заголовки работы оформляются жирным шрифтом;
- в конце заголовков точка не предусмотрена;
- заголовки набираются прописными буквами;

– все заголовки и подзаголовки в работе должны быть пронумерованы арабскими цифрами;

– названия разделов размещаются посередине строки, подразделы – с левого края;

– работа распечатывается в принтере на листах А4;



– текст должен располагаться только на одной стороне листа.

**Работа имеет такую структуру:**

1. Титульный лист;
2. Оглавление и введение;
3. Основной текст и расчет контрольной;
4. Заключительная часть работы;
5. Перечень использованной литературы и источников;
6. Дополнения и приложения.

Если в работе есть приложения, о них надо упоминать в оглавлении.

Ссылки нумеруются арабскими цифрами, при этом учитывают структуру работы (разделы и подразделы).

#### 4. Рекомендации по выполнению задания

##### Указание к решению задачи №1

Решение задачи заключается в определении токов всех ветвей и напряжений на всех элементах электрической цепи. Далее на миллиметровой бумаге необходимо построить потенциальную диаграмму одного из контуров схемы замещения. Заканчивается решение задачи проверкой баланса мощности, одновременно являющейся проверкой правильности определения токов в ветвях.

Метод, которым необходимо решить задачу, указан в соответствующем варианте. Уравнения и другие аналитические выражения необходимо записывать сначала в общем виде, затем подставлять численные значения входящих в выражения величин, а затем записать полученный результат.

##### Указание к решению задачи №2

Решение данной задачи выполняется комплексным методом. Все комплексные величины (напряжения, токи, сопротивления) необходимо записывать в двух формах: алгебраической и показательной. Первую удобно использовать при выполнении операций сложения и вычитания, а также при построении векторных диаграмм; вторую – при умножении и делении.

Решение задачи заключается в определении токов и напряжений на всех элементах электрической схемы. В процессе выполнения расчета рекомендуется выполнять промежуточные проверки правильности вычислений. Например, если найдены токи, сходящиеся в узле, то их сумма должна быть равной нулю; или если найдены напряжения на элементах, включенных последовательно между двумя узлами, то их сумма должна равняться напряжению между этими узлами.

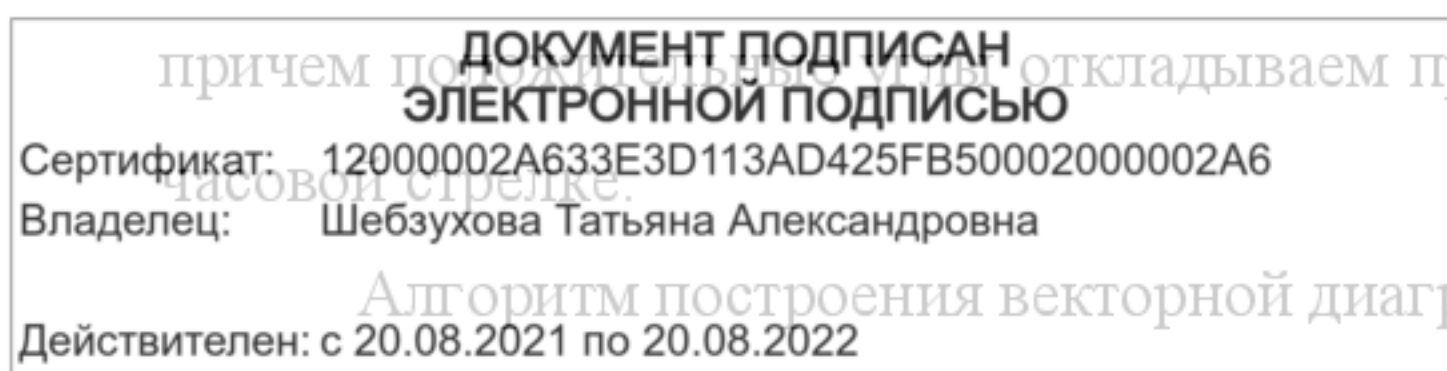
Завершается расчет проверкой баланса активной и реактивной мощности. Активная и реактивная мощность, потребляемые всей схемой должны быть соответственно равны сумме активной и реактивной мощностей, потребляемыми отдельными элементами схемы.

Построение векторной диаграммы токов и напряжений, действующих в последовательно-параллельной цепи синусоидального тока рекомендуется выполнять в следующем порядке:

отсчет углов производим относительно горизонтальной оси (ось «X», ось абсцисс);

причем положительные углы откладываем против часовой стрелки, а отрицательные – по часовой стрелке.

Алгоритм построения векторной диаграммы следующий:



1. Из начала координат проводим направления токов:

2. Построение начинаем с «дальней» (третьей) ветви:

2.1. Падение напряжения на  $R_3$  совпадает с направлением тока  $\dot{I}_3$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{R3}$  в масштабе откладываем в направлении тока  $\dot{I}_3$ .

2.2. Падение напряжения на  $L_3$  на  $90^\circ$  опережает ток  $\dot{I}_3$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{L3}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_3$  с опережением на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R3}$ .

2.3. Падение напряжения на  $C_3$  на  $90^\circ$  отстает от тока  $\dot{I}_3$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{C3}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_3$  с отставанием на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R3}$ .

2.4. Векторы  $\dot{U}_{L3}$  и  $\dot{U}_{C3}$  имеют противоположное направление; их результирующий вектор  $\dot{U}_{P3}$  (реактивное напряжение третьей ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, направлен перпендикулярно току  $\dot{I}_3$  с отставанием на  $90^\circ$ .

2.5. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений третьей ветви (геометрическая сумма векторов  $\dot{U}_{R3}$  и  $\dot{U}_{P3}$ ) определит полное падение напряжения на третьей ветви  $\dot{U}_3$ .

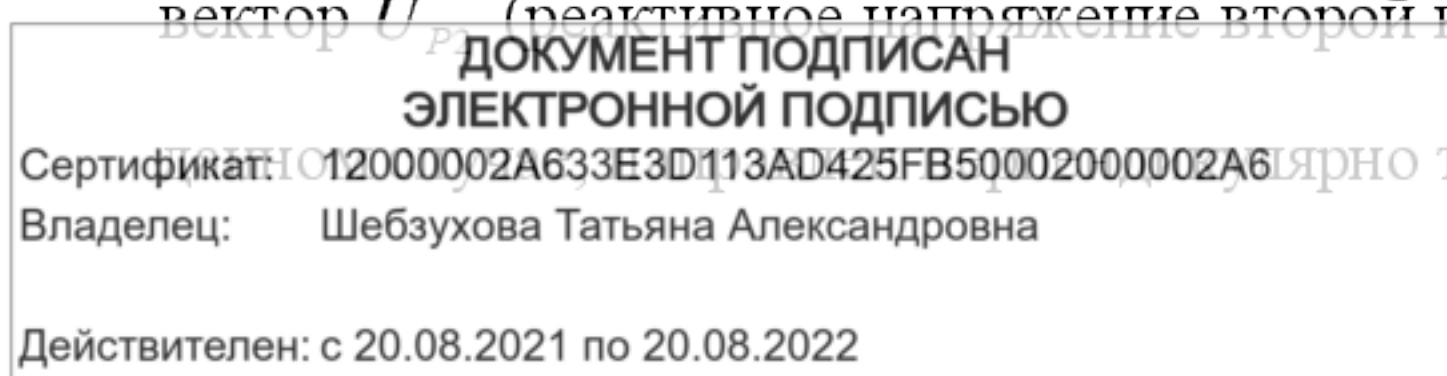
3. Аналогично строим вектор падения напряжения на второй ветви:

3.1. Падение напряжения на  $R_2$  совпадает с направлением тока  $\dot{I}_2$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{R2}$  в масштабе откладываем в направлении тока  $\dot{I}_2$ .

3.2. Падение напряжения на  $L_2$  на  $90^\circ$  опережает ток  $\dot{I}_2$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{L2}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_2$  с опережением на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R2}$ .

3.3. Падение напряжения на  $C_2$  на  $90^\circ$  отстает от тока  $\dot{I}_2$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{C2}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_2$  с отставанием на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R2}$ .

3.4. Векторы  $\dot{U}_{L2}$  и  $\dot{U}_{C2}$  имеют противоположное направление; их результирующий вектор  $\dot{U}_{P2}$  (реактивное напряжение второй ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, направлен перпендикулярно току  $\dot{I}_2$  с опережением на  $90^\circ$ .



3.5. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений второй ветви (геометрическая сумма векторов  $\dot{U}_{R2}$  и  $\dot{U}_{P2}$ ) определит полное падение напряжения на второй ветви  $\dot{U}_2$ .

4. Т.к. вторая и третья ветви параллельны, то, естественно,  $\dot{U}_2 = \dot{U}_3$ , т.е. векторы  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$  совпадают по величине и по направлению. Обозначим этот вектор  $\dot{U}_{23}$ .

5. Полное падение напряжения на всех элементах схемы представляет собой геометрическую сумму векторов  $\dot{U}_{23}$  и  $\dot{U}_1$  (вектор полного падения напряжения на элементах первой ветви).

6. Построение вектора полного падения напряжения на элементах первой ветви (вектора  $\dot{U}_1$ ) производим следующим образом:

6.1. С конца вектора  $\dot{U}_{23}$  проводим линию, параллельную направлению тока  $\dot{I}_1$ .

6.2. Падение напряжения на  $R_1$  совпадает с направлением тока  $\dot{I}_1$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{R1}$  в масштабе откладываем в направлении тока  $\dot{I}_1$ .

6.3. Падение напряжения на  $L_1$  на  $90^\circ$  опережает ток  $\dot{I}_1$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{L1}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_1$  с опережением на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R1}$ .

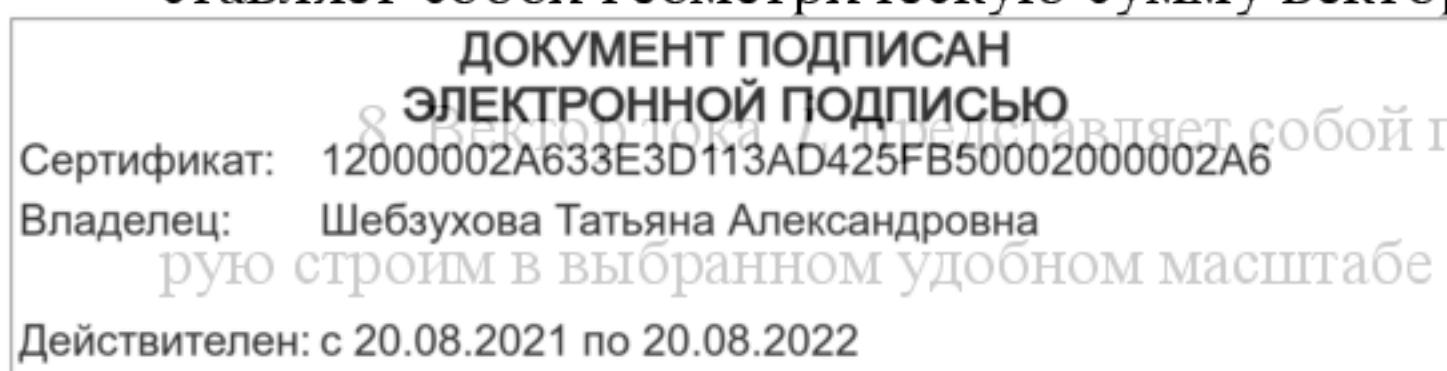
6.4. Падение напряжения на  $C_1$  на  $90^\circ$  отстает от тока  $\dot{I}_1$ . Поэтому вектор  $\dot{U}_{C1}$  в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока  $\dot{I}_1$  с отставанием на  $90^\circ$  начиная с конца вектора  $\dot{U}_{R1}$ .

6.5. Векторы  $\dot{U}_{L1}$  и  $\dot{U}_{C1}$  имеют противоположное направление; их результирующий вектор  $\dot{U}_{P1}$  (реактивное напряжение первой ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, равен нулю, т.е. в первой ветви мы наблюдаем резонанс напряжений.

6.6. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений первой ветви (геометрическая сумма векторов  $\dot{U}_{R1}$  и  $\dot{U}_{P1}$ ) определит полное падение напряжения на первой ветви  $\dot{U}_1$  и, в данном случае, оно по величине и по направлению совпадает с вектором  $\dot{U}_{R1}$ . Обозначим его « $\dot{U}_{R1} = \dot{U}_1$ ».

7. Как отмечалось выше, полное падение напряжения на всех элементах схемы представляет собой геометрическую сумму векторов  $\dot{U}_{23}$  и  $\dot{U}_1$ , которую и обозначаем  $\dot{U}$ .

8. Геометрическая сумма векторов  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$ , которую обозначаем  $\dot{I}$ , строим в выбранном удобном масштабе токов на уже проведенных направлениях.



### Указание к решению задачи №3

1. Определить комплексные действующие значение токов всех ветвей схемы замещения методом эквивалентных преобразований.

2. Проверить правильность расчета путем составления баланса мощностей. Погрешность в определении активной и реактивной мощностей не должна превышать 1%.

Задание повышенного уровня:

1. В ветви с активным сопротивлением  $R_1$  «включить» амперметр электромагнитной системы и определить его показание.

4. «Подключить» вольтметр электромагнитной системы к полюсам ветви с источником Э.Д.С. и определить его показание.

5. Записать функции мгновенных значений тока амперметра и напряжения на вольтметре. Построить графики зависимости тока  $i_A = f(t)$  и напряжения от времени.

6. Построить векторную диаграмму токов ветвей.

7. Выбрать контур схемы, содержащий источник Э.Д.С. В тех же координатах комплексной плоскости (п. 6) построить векторную диаграмму напряжений.

### Указание к решению задачи №4

Решение задачи заключается в определении действующих значений и фаз линейных токов, а также тока нейтрального провода, а при его отсутствии - в определении напряжения смещения нейтрали и определении фазных напряжений на нагрузке. Задачу следует решать с использованием метода узлового напряжения. Необходимо построить векторные диаграммы токов и напряжений при наличии нейтрального провода и при его отсутствии.

Линейные токи, которые при соединении нагрузки звездой равны фазным, вычисляются в соответствии с законом Ома:

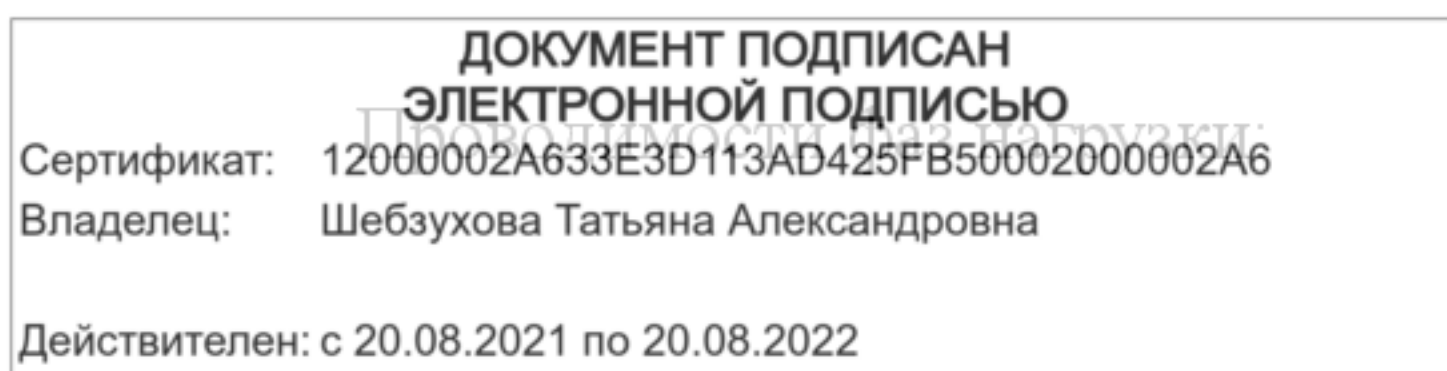
$$I_a = \frac{U_a}{Z_a} = \frac{U_{\phi}}{(r_a + jx_a)}; \quad I_b = \frac{U_b}{Z_b} = \frac{U_{\phi} \dot{a}^{-j120^\circ}}{(r_b + jx_b)}; \quad I_c = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{U_{\phi} \dot{a}^{j120^\circ}}{(r_c + jx_c)};$$

Ток нейтрального провода, в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

При отсутствии нейтрального провода напряжение смещения нейтрали

$$U_{00} = \frac{U_A Y_a + U_B Y_b + U_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$



$$Y_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{r_a}{r_a^2 + x_a^2} - \frac{jx_a}{r_a^2 + x_a^2}$$

$$Y_b = \frac{1}{Z_b} = \frac{r_b}{r_b^2 + x_b^2} - \frac{jx_b}{r_b^2 + x_b^2}$$

$$Y_c = \frac{1}{Z_c} = \frac{r_c}{r_c^2 + x_c^2} - \frac{jx_c}{r_c^2 + x_c^2}$$

$U_A, U_{\hat{A}}, U_{\hat{N}}$  - фазные напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Фазные напряжения на нагрузке равны разности фазных напряжений на трансформаторе и напряжения смещения нейтрали

$$U_a = U_A - U_{00}, U_b = U_B - U_{00}, U_c = U_C - U_{00},$$

### Указание к решению задачи №5

Любая периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в общем случае постоянной составляющей и суммой синусоидальных функций, имеющих частоты, кратные частоте несинусоидальной функции:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + A_2 \sin 2\omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots A_k \sin k\omega t + B_k \cos k\omega t + \dots$$

где:  $A_0$  - постоянная составляющая,

$$A_0 = \frac{1}{(2\pi) \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t}$$

$A_i, B_i$  коэффициенты разложения в ряд Фурье, которые определяются по формулам:

$$A_k = \frac{1}{\pi \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t}, B_k = \frac{1}{\pi \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d\omega t}$$

Обычно эти коэффициенты находят графо-аналитическим методом, разбивая период функции  $f(\omega t)$  на  $n$  равных интервалов.

$$A_0 = \frac{1}{n \sum f(\omega t)}, A_k = \frac{2}{n \sum_{i=1}^n f(\omega t_i) \sin k\omega t_i}, B_k = \frac{2}{n \sum_{i=1}^n f(\omega t_i) \cos k\omega t_i},$$

Разложение несинусоидальной функции в ряд Фурье может быть представлено иначе:

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots C_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + \dots,$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{B_k}{A_k}$$

Составляющую  $C_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  называют первой или основной гармоникой, остальные составляющие - высшими гармониками.

В задаче данной контрольной работы функция Э.Д.С.  $e(\omega t)$  представлена в виде таблицы ординат с интервалом фазы  $\omega t = 10^\circ$  за полпериода, и т.к. функция симметрична относительно оси абсцисс, то суммирование достаточно проводить на интервале от 0 до  $\pi$ . Кроме того известно, что для функций, симметричных относительно оси абсцисс, чётные гармоники отсутствуют, поэтому в задаче требуется найти первую, третью и пятую гармоники.

Расчёт режима линейной электрической цепи при действии периодической несинусоидальной Э.Д.С. проводят для каждой гармоники отдельно, при этом необходимо учитывать, что реактивные сопротивления для разных гармоник будут разными:

$$X_{lk} = Lk\omega, X_{ck} = \frac{1}{kC\omega}.$$

Действующее значение тока

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2 + \dots}$$

где:  $I_0$  - постоянная составляющая тока,

$I_k$  - действующие значения гармоник токов.

Мощность электрической цепи

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k$$

где:  $P_0 = U_0 I_0$  - мощность постоянной составляющей,

$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$  - мощность  $k$ -той гармоники,

$U_k I_k$  - напряжение и ток  $k$ -той гармоники,

$\varphi_k$  - угол фазового сдвига между током и напряжением  $k$ -той гармоники (следует иметь ввиду, что для каждой гармоники эти углы будут разными по величине, они могут отличаться также и по знаку).

### Указание к решению задачи №6

Во всех вариантах расчёт переходного процесса выполняется при нулевых начальных условиях (напряжение на ёмкости и ток через индуктивность в первый момент времени после коммутации равны нулю).

Для решения задачи необходимо составить систему уравнений, используя законы Кирхгофа, индуктивности и на ёмкости выразить через токи.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**  
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Например, если сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и ёмкость  $C$  включены последовательно и по ним протекает ток  $i$ , то напряжение на этом участке цепи в любой момент времени

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + \int i dt.$$

Полученную систему уравнений следует затем записать в операторной форме. Записанное выше уравнение будет иметь вид:

$$U(p) = i(p) \left[ R + Lp + \frac{1}{Cp} \right]$$

Здесь  $U(p)$  и  $i(p)$  - изображения напряжения и тока,  $p$  - оператор преобразования.

Записанную в операторной форме систему уравнений необходимо решить относительно изображений токов известными в алгебре методами. Изображения токов будут иметь вид:

$$i(p) = \frac{(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{N(p)}{M(p)}$$

где:  $a_i$  и  $b_i$  — некоторые постоянные коэффициенты.

Для нахождения токов, как функций времени, необходимо воспользоваться формулой разложения:

$$i(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{N(p_i)}{p_i (p M_i)} \right] e^{p_i t}$$

где:  $N(0)/M(0)$  - вынужденная составляющая тока,

$p_i$  - корни характеристического уравнения  $M(p) = 0$

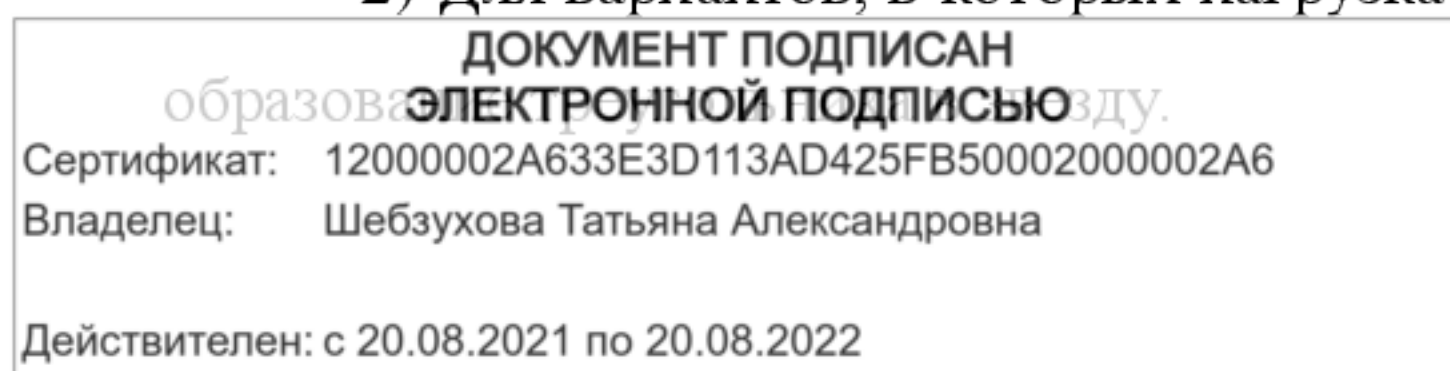
$$(p M_i) = \frac{dM(p)}{dp} \Big|_{p = p_i}$$

Во всех вариантах данной задачи  $n=2$ ,  $m < 2$ , т.е. характеристическое уравнение имеет вторую степень.

Для всех токов и напряжений необходимо построить графики переходных процессов.

### Указание к решению задачи №7

- 1) Сопротивления обмоток генератора считать равными нулю.
- 2) Для вариантов, в которых нагрузка соединена треугольником, использовать пре-



3) Расчет выполнять символическим методом, оперируя с комплексами действующих значений.

### Указание к решению задачи №8

1) Неизвестный из трех параметров в конце линии определить, пользуясь формулой закона Ома

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{\text{н}}$$

2) Определить волновое сопротивление линии

$$Z_{\text{В}} = \sqrt{(Z_0/Y_0)}, \text{ где } Z_0 = R_0 + j\omega L_0, \quad Y_0 = G_0 + j\omega C_0.$$

3) Определить постоянную распространения

$$\gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} = \beta + j\alpha.$$

4) Вычислить напряжение и ток в начале линии, пользуясь выражениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_{\text{н}} \operatorname{sh} \gamma l,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l + (\dot{U}_2/Z_{\text{н}}) \operatorname{sh} \gamma l$$

Учесть, что при умножении  $\gamma$ , имеющей размерность 1/км, на длину линии в километрах угол получается в радианах.

5) Полную и активную мощность в начале и в конце линии вычислить, пользуясь формулами:

$$S_1 = U_1 I_1, \quad P_1 = U_1 I_1 \cos(\angle U_1, I_1),$$

$$S_2 = U_2 I_2, \quad P_2 = U_2 I_2 \cos(\angle U_2, I_2).$$

6) К.п.д. линии

$$\eta = P_2/P_1.$$

7) Для линии без потерь

$$Z_{\text{В}} = \sqrt{(L_0/C_0)}, \quad \gamma = j\omega \sqrt{(L_0 C_0)} = j\alpha,$$

$$\operatorname{ch} \gamma l = \cos \alpha l, \quad \operatorname{sh} \gamma l = j \sin \alpha l,$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha l + j \dot{I}_2 Z_{\text{н}} \sin \alpha l, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cos \alpha l + j(\dot{U}_2/Z_{\text{н}}) \sin \alpha l,$$

фазовая скорость и длина волны:

$$v_{\phi} = \omega/\alpha = 1/\sqrt{(L_0 C_0)}, \quad \lambda = v_{\phi} / \omega.$$

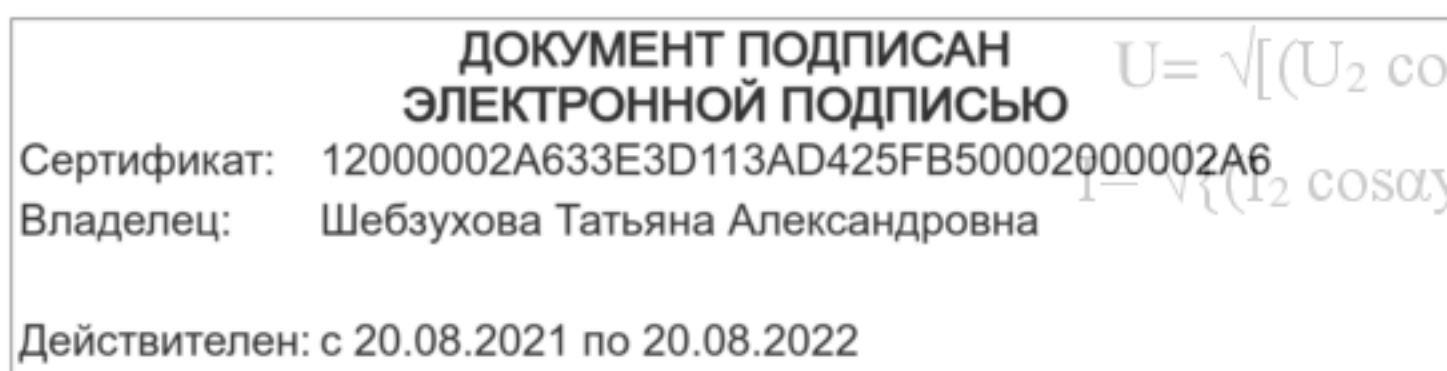
8) Графики изменения напряжения и тока вдоль линии строятся с использованием формул:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \alpha y + j \dot{I}_2 Z_{\text{н}} \sin \alpha y, \quad \dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y + j(\dot{U}_2/Z_{\text{н}}) \sin \alpha y.$$

9) Действующие значения напряжения и тока вычисляют по формулам:

$$U = \sqrt{(\dot{U}_2 \cos \alpha y)^2 + (\dot{I}_2 Z_{\text{н}} \sin \alpha y)^2},$$

$$I = \sqrt{(\dot{I}_2 \cos \alpha y)^2 + [(\dot{U}_2/Z_{\text{н}}) \sin \alpha y]^2}.$$



### 5. План-график выполнения задания

Работа над расчетно-графической работой может быть представлена в виде выполнения следующих этапов:

| №<br>п/п | Наименование этапа                           | Сроки выполнения                     |
|----------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.       | Получения задания                            | На первом<br>практическом занятии    |
| 2.       | Первичная консультация с преподавателем      | На первом<br>практическом занятии    |
| 3.       | Работа с информационными источниками         | В течении сессии                     |
| 4.       | Написание контрольной работы                 | В течении сессии                     |
| 5.       | Предоставление контрольной работы на кафедру | В течении сессии                     |
| 6.       | Защита контрольной работы                    | На последнем<br>практическом занятии |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## 6. Критерии оценивания работы

В целях повышения качества выполняемых расчетно-графических работ преподаватель руководствуется следующими критериями оценивания письменных работ студентов.

### **Оценка «зачтено (отлично)» выставляется, если студент:**

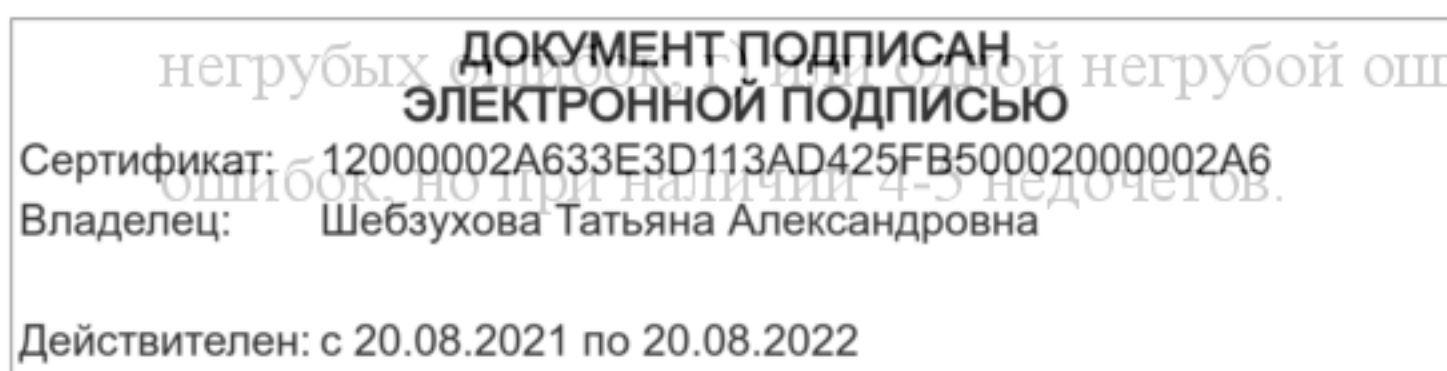
- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в строгом соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную учебную и страноведческую литературу;
- при выполнении упражнений показал высокий уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, проявил творческий подход при ответе на вопросы, умение глубоко анализировать проблему и делать обобщающие выводы;
- выполнил работу грамотно с точки зрения поставленной задачи, т.е. без ошибок и недочетов или допустил не более одного недочета.

### **Оценка «зачтено (хорошо)» выставляется, если студент:**

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную литературу;
- при выполнении упражнений показал хороший уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, практически правильно сформулировал ответы на поставленные вопросы, представил общее знание информации по проблеме;
- выполнил работу полностью, но допустил в ней: а) не более одной негрубой ошибки и одного недочета б) или не более двух недочетов.

### **Оценка «зачтено (удовлетворительно)» выставляется, если студент:**

- представил работу в установленный срок, при оформлении работы допустил незначительные отклонения от изложенных требований;
- показал достаточные знания по основным темам контрольной работы;
- использовал рекомендованную литературу;
- выполнил не менее половины работы или допустил в ней а) не более двух грубых ошибок, б) или не более одной грубой ошибки и одного недочета, в) или не более двух-трех негрубых ошибок, г) или не более одной грубой ошибки и трех недочетов, д) или при отсутствии



**Оценка «незачтено (неудовлетворительно)» выставляется:**

- когда число ошибок и недочетов превосходит норму, при которой может быть выставлена оценка «зачтено (удовлетворительно)» или если правильно выполнено менее половины работы;
- если студент не приступал к выполнению работы или правильно выполнил не более 10 процентов всех заданий.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## 7. Порядок защиты работы

Написанная студентом расчетно-графическая работа сдается на кафедру в срок для рецензирования. Студент защищает расчетно-графическую работу до экзамена (зачета) перед преподавателем. Без защиты РГР студент к экзамену (зачету) не допускается.

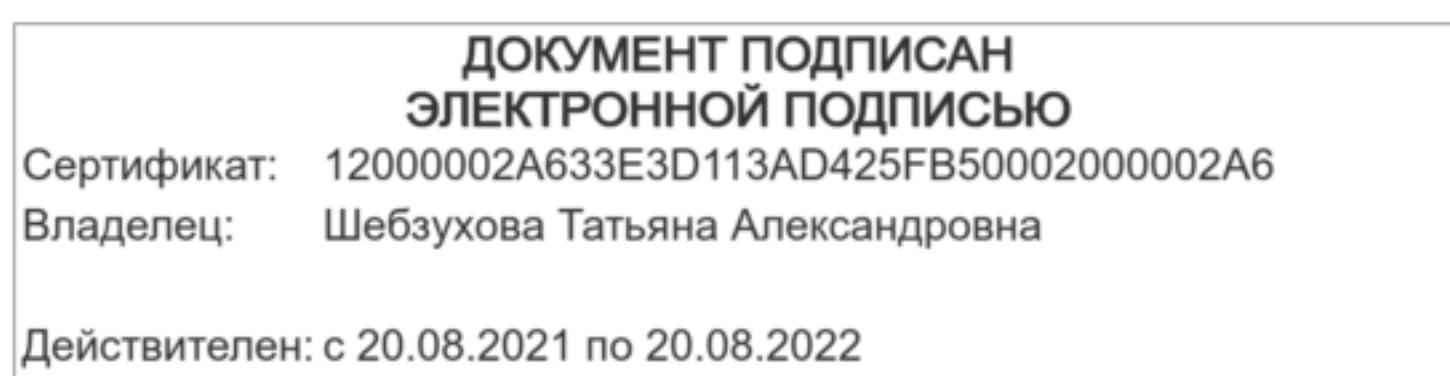
Работа не допускается к защите, если она не носит самостоятельного характера, списана из литературных источников или у других авторов, если основные вопросы не раскрыты, изложены схематично, фрагментарно, в тексте содержатся ошибки, научный аппарат оформлен неправильно, текст написан небрежно.

В ходе защиты контрольной работы задача студента — показать углубленное понимание вопросов конкретной темы, хорошее владение материалом по теме.

Защита расчетно-графической работы может проходить в различных формах по усмотрению преподавателя:

- в форме индивидуальной беседы студента с руководителем по основным положениям работы;
- в форме индивидуальной защиты в присутствии всей группы студентов;
- в форме групповой защиты – одновременной защиты контрольной работы по одному направлению. В этом случае каждый следит за ходом рассуждений товарищей, дополняет, уточняет их, что, несомненно, усиливает работу мысли и способствует развитию экономического мышления.

Любая форма защиты контрольной работы учит отстаивать свою точку зрения, убедительно аргументировать ее, что способствует перерастанию знаний в убеждения.



## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **8.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

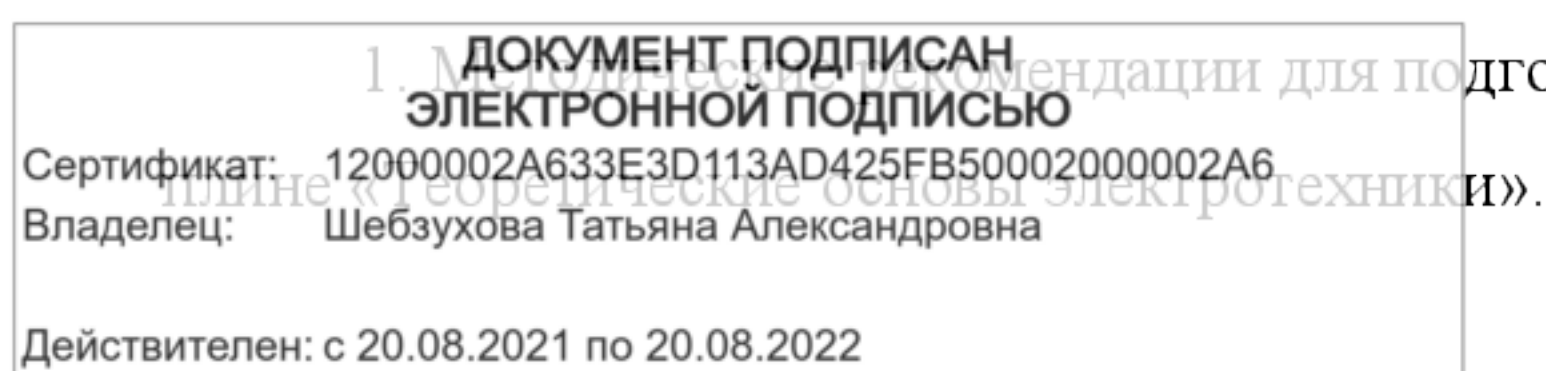
#### **8.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>
3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

#### **8.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>
2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

### **8.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**



подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

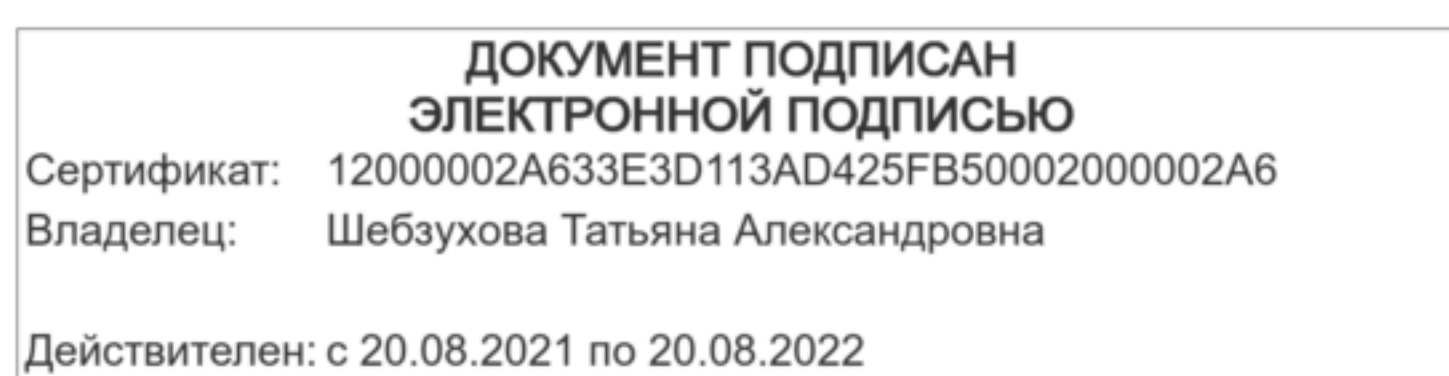
3. Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

### ***8.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по организации самостоятельной работы обучающихся  
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Содержание

- Введение
- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники»
  - 2 План-график выполнения самостоятельной работы
  - 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
  - 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
  - 5 Методические указания по подготовке к расчетно-графической работе
  - 6 Методические указания по подготовке к экзамену
  - 7 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

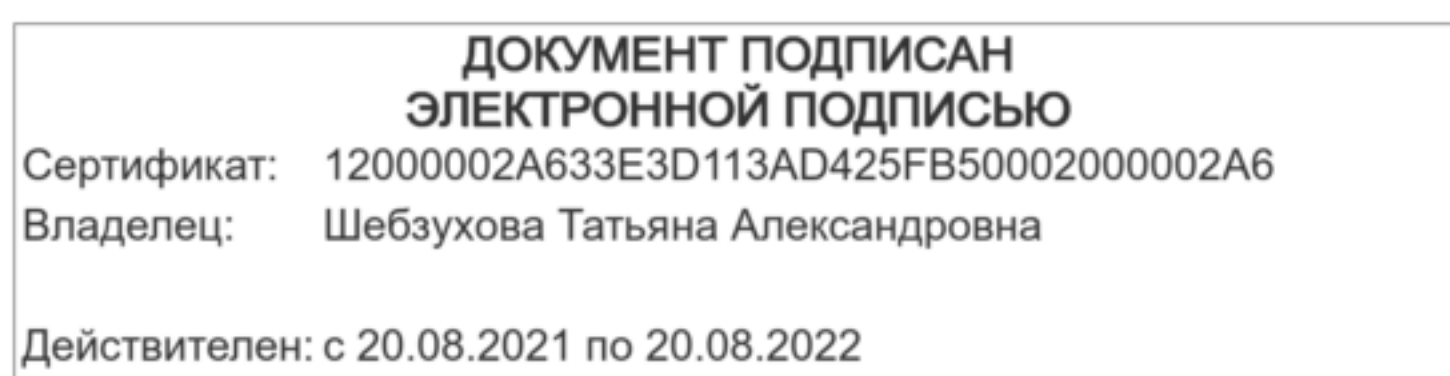
## Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.



## Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

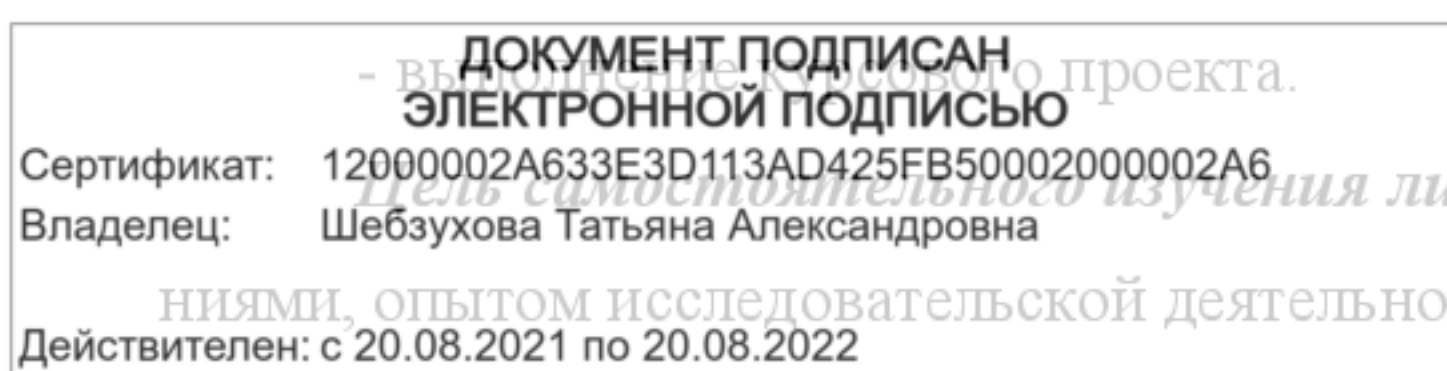
Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;



- в выполнении заданий проекта.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

**Задачами** самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

**Цель самостоятельного решения задач** - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

**Задачами** самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

**Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы** по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

**Задачами** данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

| Код, формулировка компетенции                                                                        | Код, формулировка индикатора                                                                                                | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока. | Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределёнными параметрами, методы анализа, моделирования и расчёта линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока |
|                                                                                                      | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы расчёта переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.  | Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.                                                                                                 |
|                                                                                                      | ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределёнными параметрами.                 | Владеет навыками расчёта переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.                                                                                                           |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

### План-график выполнения самостоятельной работы

| Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)                                     | Вид деятельности студентов                          | Средства и технологии оценки                             | Объем часов, в том числе |                                    |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------|
|                                                                                  |                                                     |                                                          | СРС                      | Контактная работа с преподавателем | Всего  |
| 3 семестр                                                                        |                                                     |                                                          |                          |                                    |        |
| ОПК-4<br>ИД-1 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-2 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> | Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18  | Собеседование                                            | 89,1                     | 9,9                                | 99     |
|                                                                                  | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 0,405                    | 0,045                              | 0,45   |
|                                                                                  | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,81                     | 0,09                               | 0,9    |
|                                                                                  | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 0,81                     | 0,09                               | 0,9    |
|                                                                                  | Выполнение расчетно-графической работы              | Собеседование                                            | 13,5                     | 1,5                                | 15     |
| Итого за 3 семестр:                                                              |                                                     |                                                          | 104,625                  | 11,625                             | 116,25 |
| 4 семестр                                                                        |                                                     |                                                          |                          |                                    |        |
| ОПК-4<br>ИД-1 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-2 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> | Самостоятельное изучение литературы по темам №19-36 | Собеседование                                            | 103,635                  | 11,515                             | 115,15 |
|                                                                                  | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 0,27                     | 0,03                               | 0,3    |
|                                                                                  | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,81                     | 0,09                               | 0,9    |
|                                                                                  | Подготовка к лабораторным занятиям                  | Собеседование                                            | 0,81                     | 0,09                               | 0,9    |
|                                                                                  | Выполнение расчетно-графической работы              | Собеседование                                            | 13,5                     | 1,5                                | 15     |
| Итого за 4 семестр:                                                              |                                                     |                                                          | 105,975                  | 11,775                             | 117,75 |
| 5 семестр                                                                        |                                                     |                                                          |                          |                                    |        |
| ОПК-4<br>ИД-1 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-2 <sub>ОПК-4</sub><br>ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> | Самостоятельное изучение литературы по темам №37-54 | Собеседование                                            | 66,42                    | 7,38                               | 73,8   |
|                                                                                  | Подготовка к лекциям                                | Собеседование                                            | 0,405                    | 0,045                              | 0,45   |
|                                                                                  | Подготовка к практическим занятиям                  | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,54                     | 0,06                               | 0,6    |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|                            |                                        |                      |                |               |               |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------|---------------|---------------|
|                            |                                        | разноуровневых задач |                |               |               |
|                            | Подготовка к лабораторным занятиям     | Собеседование        | 0,81           | 0,09          | 0,9           |
|                            | Выполнение расчетно-графической работы | Собеседование        | 13,5           | 1,5           | 15            |
| <b>Итого за 5 семестр:</b> |                                        |                      | <b>81,675</b>  | <b>9,075</b>  | <b>90,75</b>  |
| <b>Итого:</b>              |                                        |                      | <b>292,275</b> | <b>32,475</b> | <b>324,75</b> |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## **Контрольные точки и виды отчетности по ним**

Рейтинговая система успеваемости студентов не предусмотрена для заочной формы обучения.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

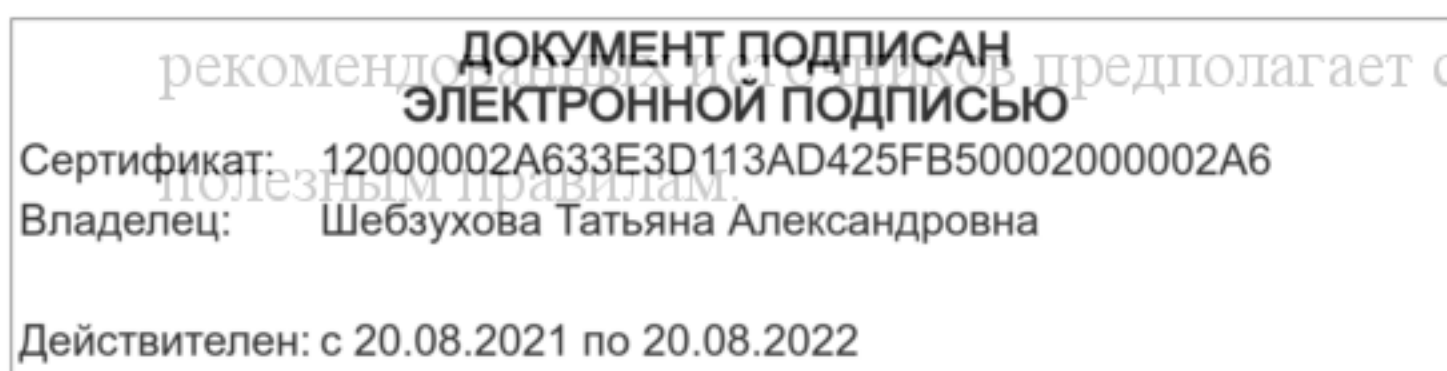
Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение

рекомендованной литературы предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.



Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

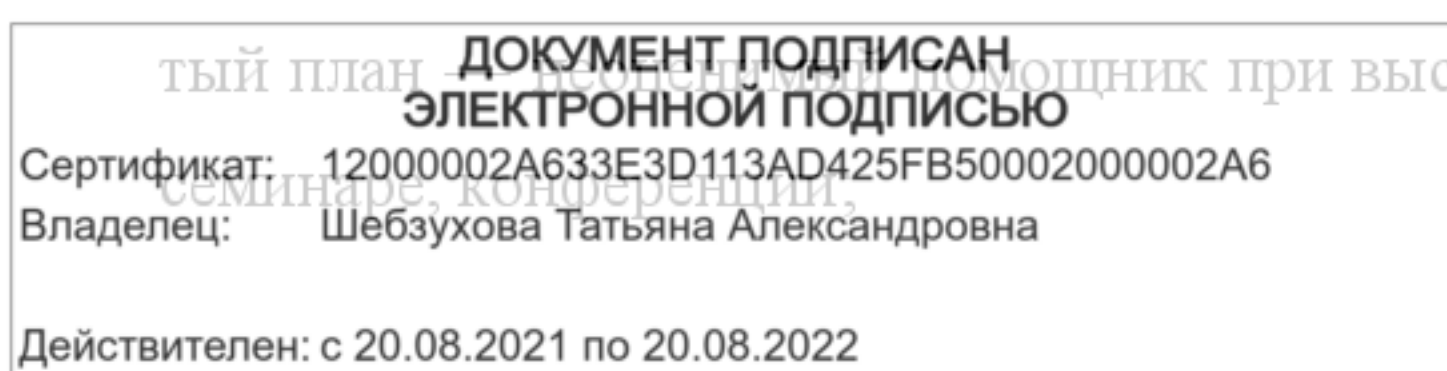
Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Разверну-

тый план — это документ, который используется при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции.



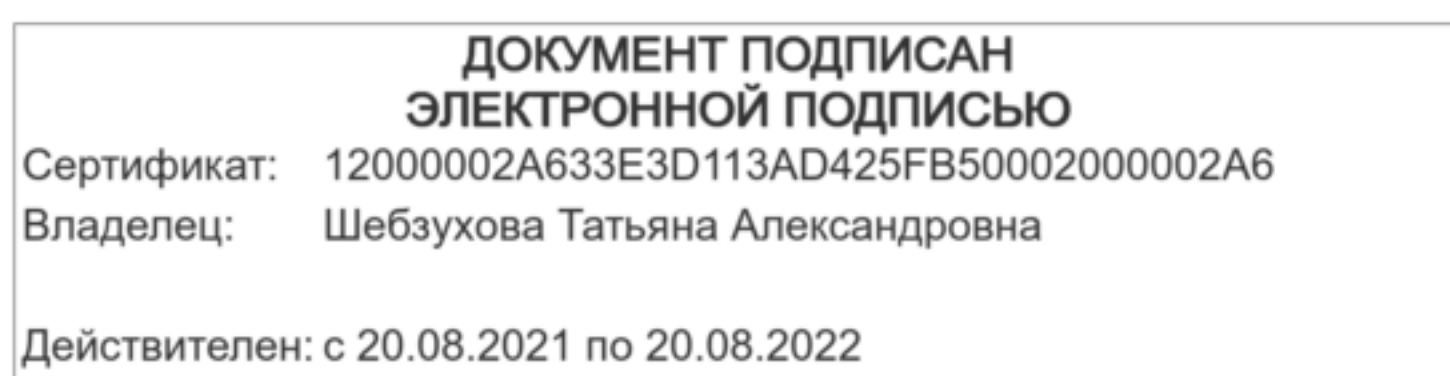
— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

#### Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.



### Методические указания по подготовке к расчетно-графической работе

Расчетно-графическая работа – это самостоятельная письменная работа студента, которая должна показать не только его владение теоретическим материалом, но и продемонстрировать практические умения проводить расчеты.

Цели выполнения к расчетно-графической работы заключаются:

- закрепить и систематизировать теоретические знания и практические навыки студента;
- научить работать с литературой – изучать, анализировать информацию из научных источников;

При выполнении контрольной работы реализуются следующие компетенции:

| Код, формулировка компетенции                                                                        | Код, формулировка индикатора                                                                                                | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин | ИД-1 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока. | Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами, методы анализа, моделирования и расчета линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока |
|                                                                                                      | ИД-2 <sub>ОПК-4</sub> Использует методы расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.  | Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.                                                                                                 |
|                                                                                                      | ИД-3 <sub>ОПК-4</sub> Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами.                 | Владеет навыками расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.                                                                                                           |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Методические указания по подготовке к экзамену

Изучение дисциплины «Теоретические основы электротехники» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов знакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

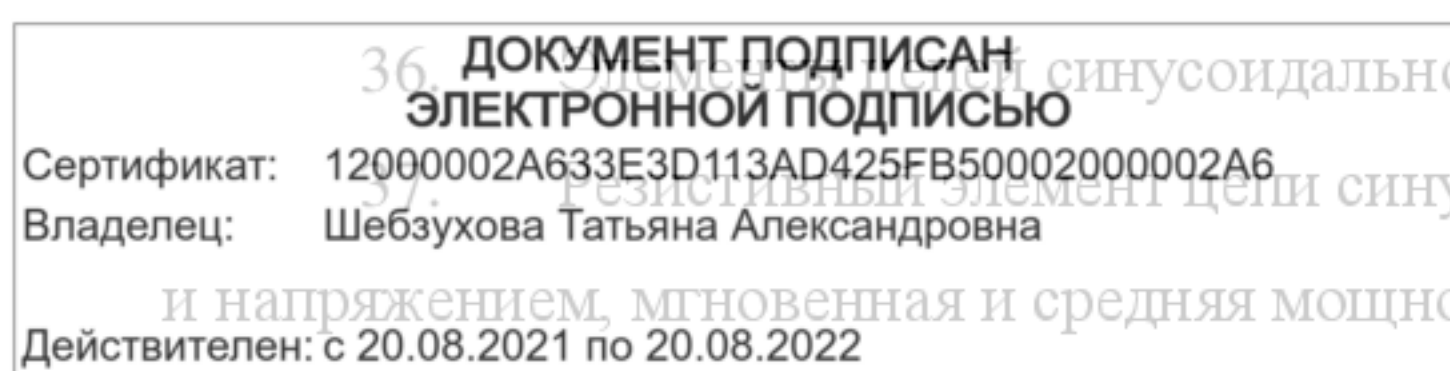
Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

### Вопросы к экзамену

1. Электрическая цепь. Принципиальные электрические схемы и схемы замещения. Топологические понятия, используемые в схемах замещения.
2. Линейные и нелинейные элементы схем замещения. Вольтамперные и ваттамперные характеристики.
3. Источники ЭДС и источники тока.
4. Закон Ома для участков цепи, содержащих и не содержащих источники ЭДС.
5. Законы Кирхгофа.
6. Расчет электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
7. Расчет электрической цепи методом преобразования схемы.
8. Расчет электрической цепи методом контурных токов.
9. Расчет электрической цепи методом узловых потенциалов.

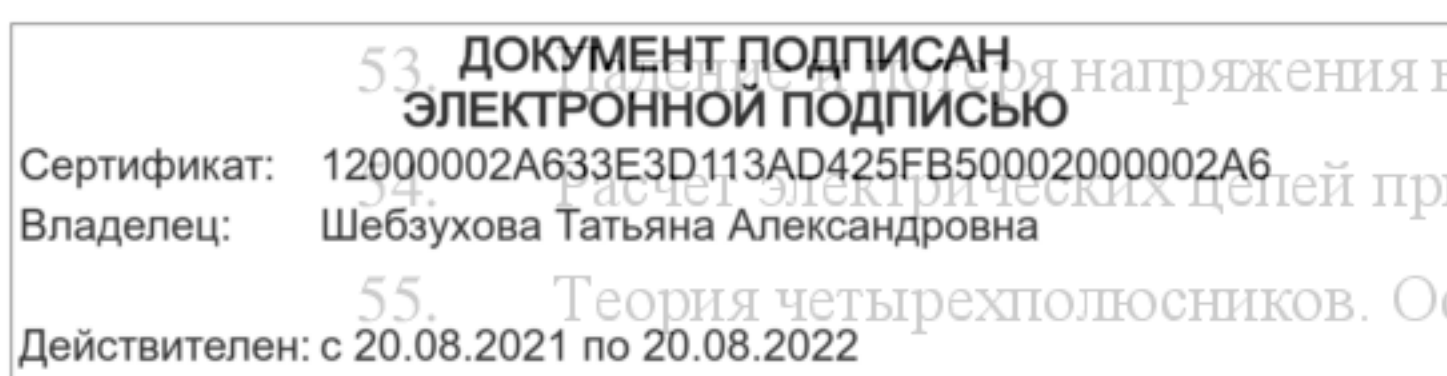
10. ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
11. Расчет электрической цепи методом наложения.  
12. Активный и пассивный двухполюсники.  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

13. Использование метода холостого хода и короткого замыкания для расчета электрической цепи.
14. Передача электроэнергии по линии электропередач. Условие передачи максимальной мощности. Влияние величины напряжения на КПД передачи.
15. Нелинейные цепи постоянного тока. Вольтамперные характеристики нелинейных элементов.
16. Вольтамперные характеристики при последовательном включении нелинейных элементов.
17. Вольтамперные характеристики при параллельном включении нелинейных элементов.
18. Два метода расчета нелинейных цепей при последовательном соединении элементов.
19. Статические и дифференциальные сопротивления нелинейных элементов. Замена нелинейного сопротивления эквивалентным линейным и источником ЭДС.
20. Магнитные цепи, их разновидности.
21. Ферромагнитные материалы, их параметры и характеристики.
22. Физические величины, характеризующие магнитные поля.
23. Закон полного тока. Магнитодвижущая сила.
24. Вебер-амперные характеристики. Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.
25. Методы расчета магнитных цепей.
26. Определение М.Д.С. неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку.
27. Определение потока в неразветвленной магнитной цепи по заданной М.Д.С.
28. Электромагнитная индукция. Самоиндукция и ЭДС самоиндукции.
29. Индуктивность. Взаимоиндуктивность.
30. Энергия магнитного поля катушки с током.
31. Магнитная энергия двух магнитосвязанных контуров.
32. Механические силы в магнитном поле. Закон электромагнитной инерции.
33. Синусоидальный ток. Получение энергии синусоидального тока. Параметры синусоидально изменяющихся величин.
34. Среднее и действующее значения синусоидальных тока и напряжения.
35. Способы представления синусоидально изменяющихся величин.



36. Расчеты в цепи синусоидального тока.
37. Резистивный элемент цепи синусоидального тока: соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.

38. Индуктивный элемент цепи синусоидального тока. Индуктивное сопротивление и проводимость, соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.
39. Емкостный элемент в цепи синусоидального тока. Емкостные сопротивления и проводимость, соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.
40. Последовательное соединение активного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивление, треугольник сопротивлений. Мгновенная и средняя мощности.
41. Последовательное соединение активного и емкостного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивления, треугольник сопротивлений. Мгновенная, активная и реактивная мощности.
42. Последовательное соединения активного, емкостного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивления.
43. Резонанс напряжений.
44. Полная, активная и реактивная мощности в цепи синусоидального тока. Коэффициент мощности.
45. Параллельное соединение активного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полная и комплексная проводимости. Треугольник проводимостей. Мгновенная, активная и реактивная мощности. Коэффициент мощности.
46. Параллельные соединения активного емкостного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полная и комплексная проводимости.
47. Резонанс токов.
48. Связь между сопротивлениями и проводимостями цепи синусоидального тока.
49. Использование законов Ома и Кирхгофа для расчета цепей синусоидального тока.
50. Символический метод расчёта цепей синусоидального тока.
51. Изображение синусоидально изменяющихся величин векторами на комплексной плоскости. Векторные диаграммы.
52. Двухполосники в цепи переменного тока. Частотная характеристика двухполосника.

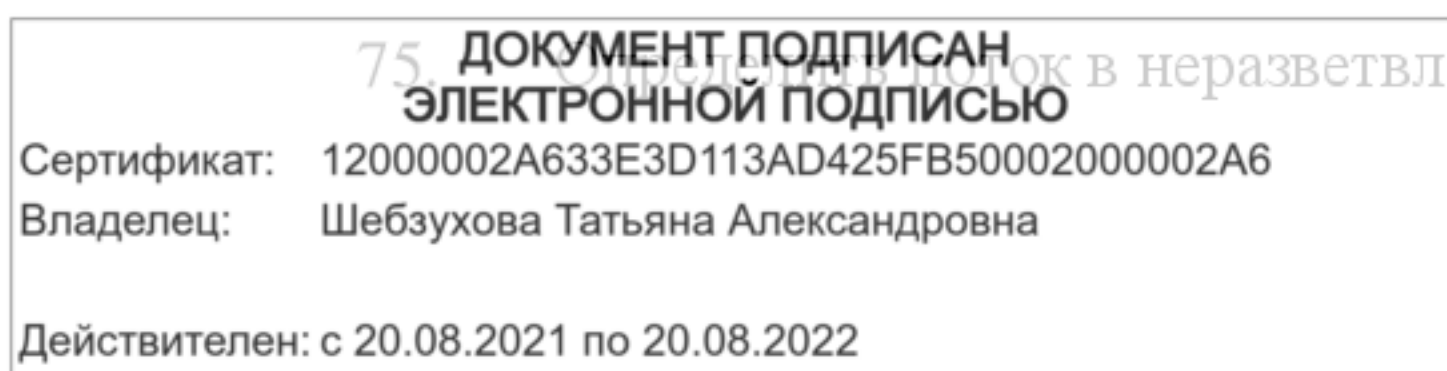


линии передачи энергии переменного тока.

при наличии в них магнитосвязанных катушек.

Основы теории четырехполосников. Основные уравнения четырехполосника.

56. Определение коэффициентов четырехполюсника.
57. Т - образная схема замещения пассивного четырехполюсника.
58. П – образная схема замещения пассивного четырёхполюсника.
59. Формы коэффициентов четырёхполюсников.
60. Круговые диаграммы. Круговая диаграмма тока для последовательно соединенных двух сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ , одно из которых постоянно, а второе имеет постоянный аргумент и переменный модуль.
61. Вывести закон Ома для участков цепи, содержащих Э.Д.С.
62. Рассчитать разветвленную электрическую цепь методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
63. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом преобразования схемы.
64. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом контурных токов.
65. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом узловых потенциалов.
66. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом узлового напряжения.
67. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом наложения.
68. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом холостого хода и короткого замыкания.
69. Определить мощность, потребляемую электрической цепью постоянного тока.
70. Составить и рассчитать баланс мощности разветвленной цепи постоянного тока.
71. Построить потенциальную диаграмму замкнутого контура электрической цепи постоянного тока.
72. Определить КПД линии при заданных: напряжении в начале линии, сопротивлении линии сопротивлении нагрузки.
73. Определить токи в разветвленной цепи постоянного тока, содержащей нелинейные сопротивления.
74. Определить М.Д.С. неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку.
75. Определить ток в неразветвленной магнитной цепи по заданной М.Д.С.



76. Преобразовать параметры величин переменного тока, представленных в комплексной форме, в параметры величин, представленных в показательной форме. Преобразовать параметры величин переменного тока, представленных в показательной форме, в параметры величин, представленных в комплексной форме.

77. Рассчитать разветвлённую цепь переменного тока методом сопротивлений и проводимостей.

78. Рассчитать разветвлённую цепь переменного тока комплексным методом.

79. Построить векторную диаграмму токов и напряжений разветвлённой цепи переменного тока.

80. Определить полную, активную и реактивную мощность, потребляемую последовательной цепью  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов.

81. Определить полную, активную и реактивную мощность, потребляемую параллельной цепью  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов.

82. Составить и рассчитать баланс мощности разветвлённой цепи переменного тока.

83. Определить коэффициент мощности последовательной цепи переменного тока, содержащей  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементы.

84. Определить частоту возникновения резонанса напряжений последовательно соединённых  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов.

85. Определить частоту возникновения резонанса токов параллельно соединённых  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов.

86. Рассчитать электрическую цепь при наличии в ней магнитосвязанных катушек.

87. Построить векторную диаграмму токов и напряжений электрической цепи при наличии в ней магнитосвязанных катушек.

88. Определить коэффициенты четырёхполюсника на основании полученных экспериментальных данных.

89. Пересчитать коэффициенты четырёхполюсника из  $Z$  формы в  $H$  форму.

90. Построить круговую диаграмму тока для последовательно соединённых двух сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ , одно из которых постоянно, а второе имеет постоянный аргумент и переменный модуль.

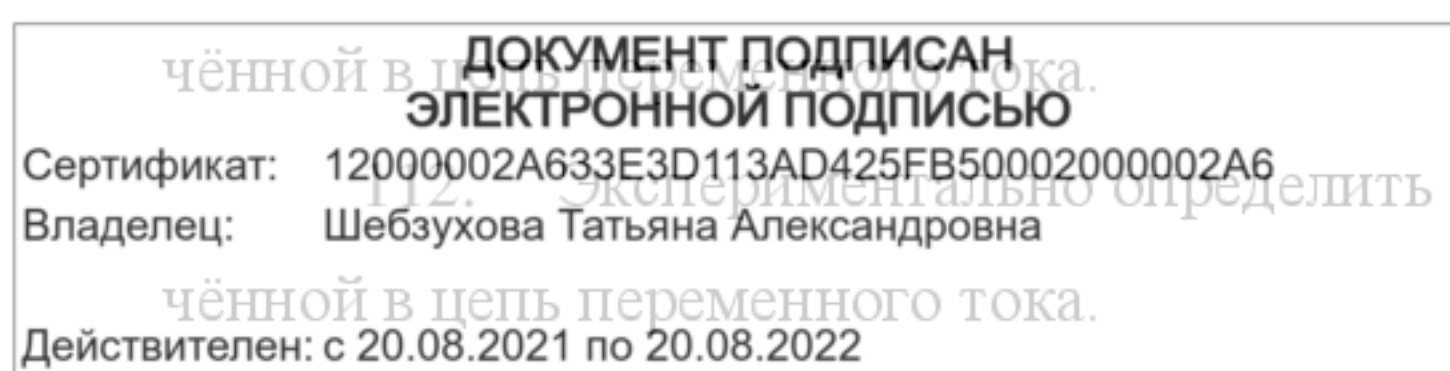
91. Определить внутреннее сопротивление источника ЭДС.

92. Определить падение напряжения на указанных элементах электрической

|                                          |                                                   |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| цепи.                                    | <b>ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br/>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</b> |
| Сертификат:                              | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6            |
| Владелец:                                | Шебзухова Татьяна Александровна                   |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022 |                                                   |

93. Определить ток в указанных ветвях электрической цепи.

94. Определить омическое сопротивление указанных элементов электрической цепи.
95. Определить ЭДС и напряжение на зажимах источника напряжения.
96. Снять вольт-амперную характеристику линейного сопротивления.
97. Снять вольт-амперную характеристику нелинейного сопротивления.
98. Определить сопротивление проводника из нихрома постоянному току на основании закона Ома.
99. Произвести экспериментальную проверку расчёта разветвлённой электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
100. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом преобразования схемы.
101. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.
102. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом узлового напряжения.
103. Определить входное сопротивление двухполюсника методом холостого хода и короткого замыкания.
104. Экспериментально определить статическое сопротивление нелинейного сопротивления в указанной точке.
105. Экспериментально определить динамическое сопротивление нелинейного сопротивления в указанной точке.
106. Экспериментально определить индуктивность катушки, включённой в цепь переменного тока.
107. Экспериментально определить ёмкость конденсатора, включённого в цепь переменного тока.
108. Экспериментально определить мощность, потребляемую активным сопротивлением, включённым в цепь переменного тока.
109. Экспериментально определить полную, активную, и реактивную мощность, потребляемую катушкой, включённой в цепь переменного тока.
110. Экспериментально определить полную, активную, и реактивную мощность, потребляемую R-L-C цепью, включённой в цепь переменного тока.
111. Экспериментально определить комплексное сопротивление R-L цепи, вклю-



112. Экспериментально определить комплексное сопротивление R- C цепи, вклю-

113. Экспериментально определить комплексное сопротивление R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.

114. Экспериментально определить комплексную проводимость R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.

115. Экспериментально определить резонансную частоту последовательной R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.

116. Экспериментально определить резонансную частоту параллельной R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.

117. Экспериментально определить h- параметры транзистора, включённого по схеме четырёхполюсника.

118. Определить индуктивность катушки измерителем иммитанса.

119. Определить ёмкость конденсатора измерителем иммитанса.

120. Сделать вывод относительно магнитных свойств материала сердечника по изменению индуктивности катушки с соответствующим сердечником.

121. Трёхфазная система ЭДС. Связанные и не связанные системы ЭДС.

122. Соединение трёхфазной цепи звездой, соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями.

123. Определение напряжения смещения нейтрали при отсутствии нулевого провода.

124. Роль нулевого провода.

125. Соединение трёхфазной цепи треугольником. Соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями.

126. Активная, реактивная и полная мощности трёхфазной системы.

127. Измерение активной мощности в трёхфазной системе.

128. Измерение реактивной мощности в трёхфазной системе.

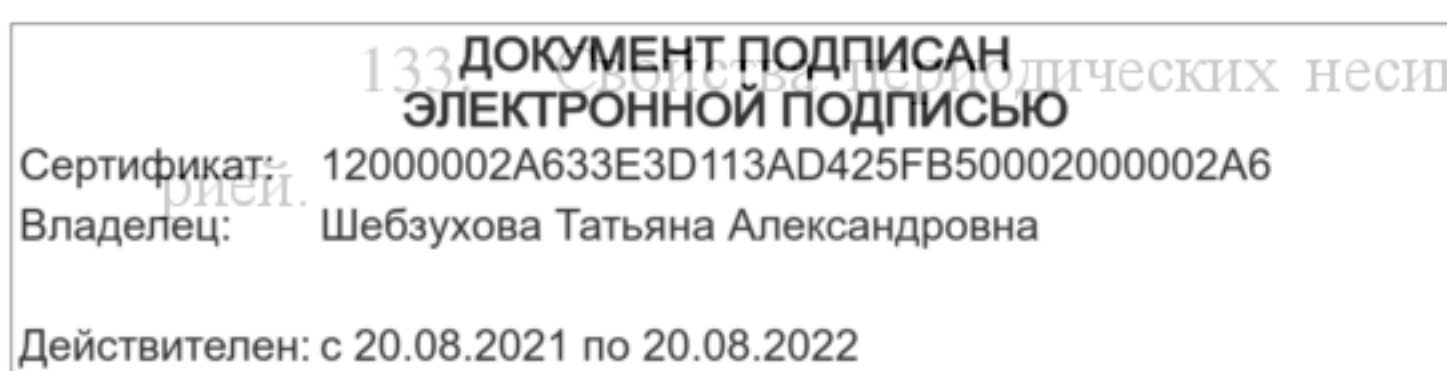
129. Оператор трёхфазной системы.

130. Разложение несимметричной трёхфазной системы на системы нулевой, прямой и обратной последовательностей фаз.

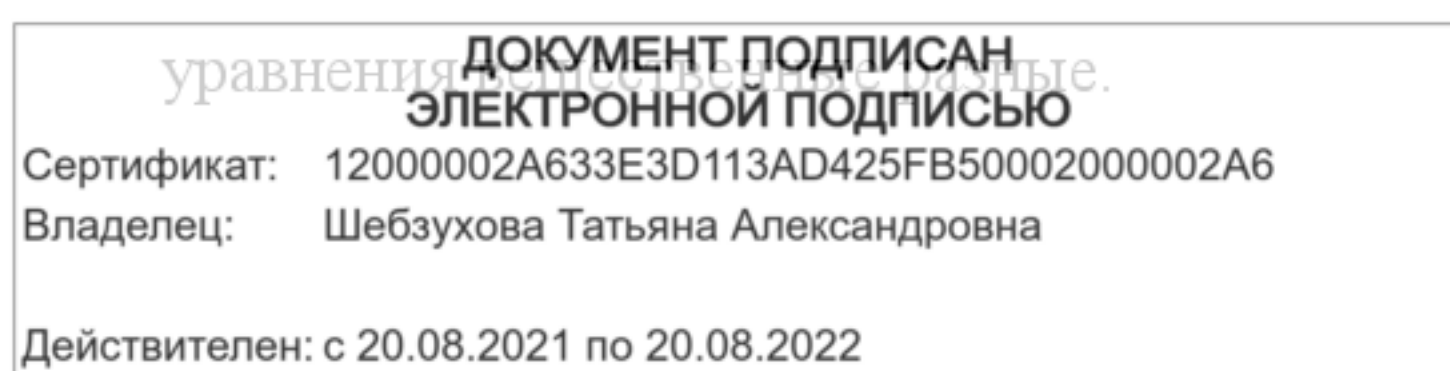
131. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях, причины их возникновения.

132. Разложение периодических несинусоидальных токов и напряжений на гармонические составляющие.

133. Разложение периодических несинусоидальных кривых, обладающих симмет-



134. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье.
135. Расчёт токов и напряжений в линейных электрических цепях при действии несинусоидальных Э.Д.С.
136. Действующие значения несинусоидальных токов и напряжений.
137. Активная и полная мощности периодического несинусоидального тока.
138. Особенности работы трёхфазных систем, вызванные наличием гармоник, кратных трём.
139. Биения. Модулированные колебания.
140. Нелинейные цепи переменного тока. Подразделение нелинейных сопротивлений на три основные группы, их общая характеристика.
141. Основные преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей.
142. Последовательная феррорезонансная цепь.
143. Параллельная феррорезонансная цепь.
144. Переходные процессы в линейных электрических цепях, причины их возникновения.
145. Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы.
146. Принуждённые и свободные составляющие переходных процессов.
147. Законы коммутации, их физическое и математическое обоснование.
148. Докоммутационные и послекоммутационные начальные значения, их нахождение. Независимые и зависимые послекоммутационные значения. Нулевые и ненулевые начальные условия.
149. Составление дифференциальных уравнений для свободных токов и напряжений.
150. Алгебраизация систем уравнений для свободных токов.
151. Составление характеристических уравнений при исследовании переходных процессов в линейных электрических цепях.
152. Степень характеристического уравнения. Зависимость характера переходного процесса от вида корней характеристического уравнения.
153. Определение постоянных интегрирования в классическом методе. Цепь описывается дифференциальным уравнением второго порядка, корни характеристического



154. Определение постоянных интегрирования в классическом методе. Цель описывается дифференциальным уравнением второго порядка, корни характеристического уравнения комплексные.

155. Переходный процесс при подключении на постоянное напряжение катушки индуктивности.

156. Переходный процесс при подключении к источнику постоянной э.д.с. активно-емкостной цепи.

157. Переходный процесс при подключении цепи, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора, к источнику постоянной э.д.с (случай вещественных корней характеристического уравнения).

158. Переходный процесс при подключении цепи, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора, к источнику постоянной э.д.с. (случай комплексных корней характеристического уравнения).

159. Операторный метод. Преобразование Лапласа. Изображение постоянной.

160. Изображение первой производной. Изображение напряжения на индуктивности.

161. Изображение интеграла. Изображение напряжения на конденсаторе.

162. Переходный процесс при включении катушки индуктивности на синусоидальное напряжение.

163. Закон Ома в операторной форме. Внутренние Э.Д.С.

164. Законы Кирхгофа в операторной форме.

165. Составление систем уравнений для изображений при анализе переходных процессов в электрических цепях.

166. Переход от изображений к оригиналам. Формула теоремы разложения.

167. Последовательность расчёта переходных процессов в операторной форме.

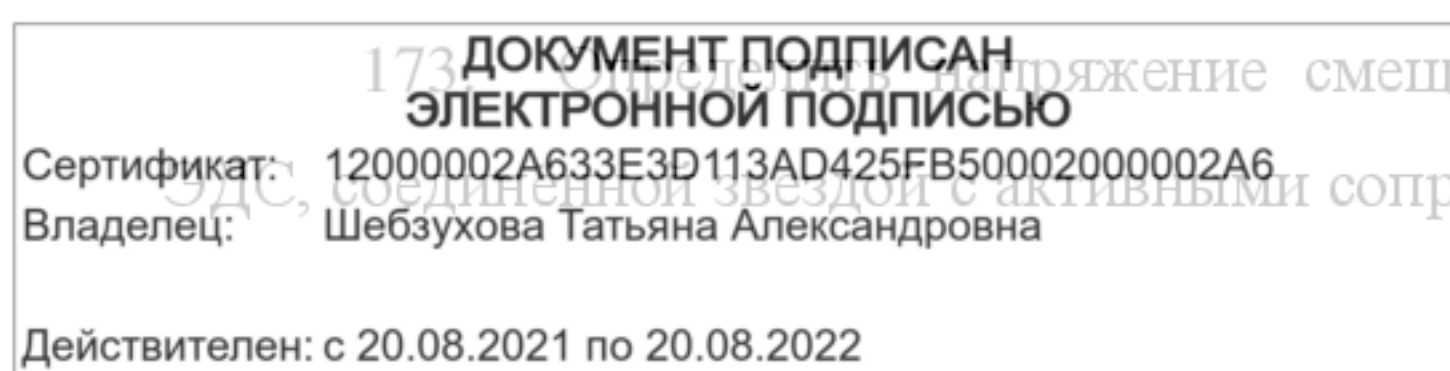
168. Понятие переходной проводимости. Нахождение переходной проводимости.

169. Интеграл Дюамеля.

170. Последовательность расчёта переходного процесса с использованием интеграла Дюамеля.

171. Представить связанную и несвязанную системы трёхфазных ЭДС.

172. Представить трёхфазную систему ЭДС, соединённую звездой и вывести соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.



174. Определить напряжение смещения нейтрали несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с реактивными сопротивлениями.

175. Построить векторную диаграмму несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с активными сопротивлениями.

176. Построить векторную диаграмму несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с реактивными сопротивлениями.

177. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой при обрыве одного из фазных проводов.

178. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой при КЗ в одной из фаз.

179. Представить трёхфазную систему ЭДС, соединённую треугольником и вывести соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.

180. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником с активными сопротивлениями.

181. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником с реактивными сопротивлениями.

182. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником при обрыве одного из фазных проводов.

183. Определить полную, активную и реактивную мощность симметричной трёхфазной системы.

184. Определить полную, активную и реактивную мощность несимметричной трёхфазной системы.

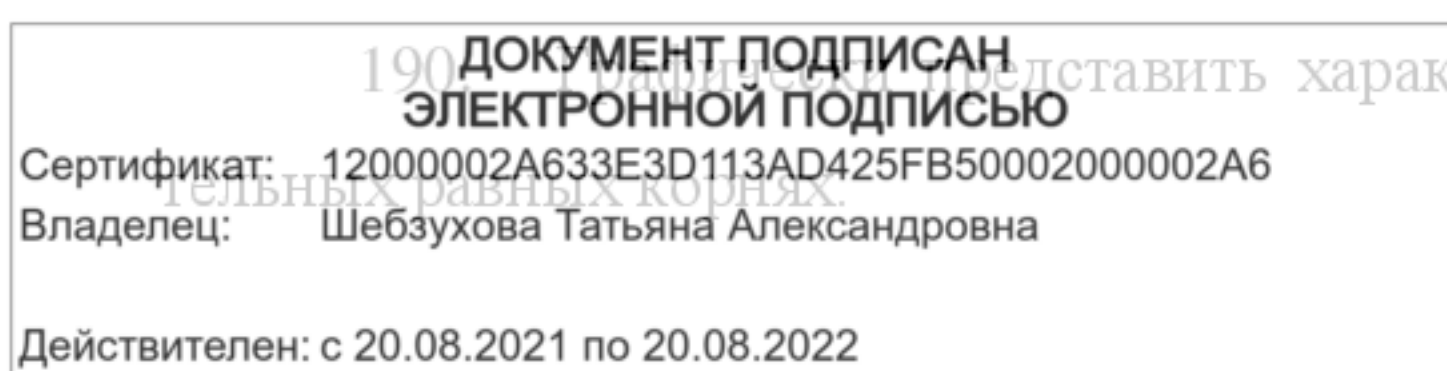
185. Разложить несимметричную трёхфазную систему на системы нулевой, прямой и обратной последовательностей фаз.

186. Рассчитать токи и напряжения в линейной электрической цепи при действии несинусоидальной Э.Д.С.

187. Определить действующие значения несинусоидальных токов и напряжений, а также активную и полную мощности периодического несинусоидального тока.

188. Составить систему дифференциальных уравнений для определения свободных токов и напряжений последовательно-параллельной R-L-C цепи.

189. Графически представить характер свободного процесса при двух действительных неравных корнях.



191. Графически представить характер свободного процесса при двух комплексно сопряжённых корнях.

192. Рассчитать классическим методом переходной процесс при подключении последовательно-параллельной R-C цепи к постоянной ЭДС.

193. Рассчитать классическим методом переходной процесс в последовательной L-C цепи с синусоидальной ЭДС при закорачивании одного из активных сопротивлений.

194. Рассчитать операторным методом переходной процесс в последовательно-параллельной цепи с постоянной ЭДС.

195. Рассчитать операторным методом переходной процесс в последовательно-параллельной цепи с синусоидальной ЭДС.

196. Реализовать трёхфазную симметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить фазные и линейные токи и напряжения.

197. Реализовать трёхфазную несимметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить фазные и линейные токи и напряжения.

198. Реализовать трёхфазную несимметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить напряжение смещения нейтрали и ток нулевого провода.

199. Реализовать трёхфазную систему ЭДС, соединённую треугольником, измерить фазные и линейные токи и напряжения.

200. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой звездой, при обрыве одного из фазных проводов.

201. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой звездой, при КЗ одной из фаз.

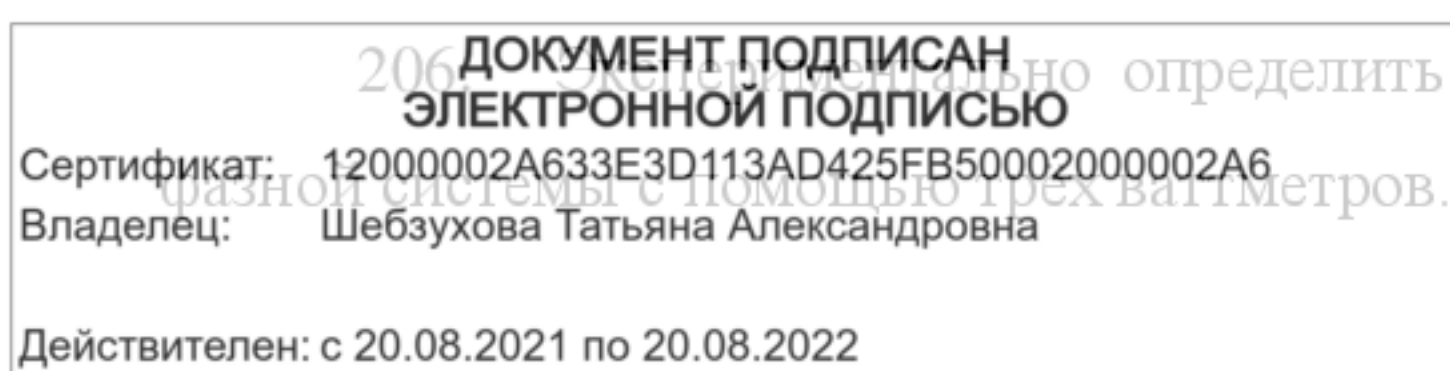
202. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой треугольником, при обрыве одного из фазных проводов.

203. Экспериментально определить активную мощность симметричной трёхфазной системы методом трёх ваттметров.

204. Экспериментально определить активную мощность симметричной трёхфазной системы с помощью одного ваттметра.

205. Экспериментально определить реактивную мощность симметричной трёхфазной системы с помощью двух ваттметров.

206. Экспериментально определить активную мощность несимметричной трёхфазной системы с помощью трёх ваттметров.



207. Экспериментально определить активную мощность несимметричной трёхфазной системы с помощью двух ваттметров.

208. Обосновать возможность применения двух ваттметров для измерения мощности трёхфазной системы вне зависимости от схемы соединения нагрузки (звезда или треугольник).

209. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения модулированных колебаний.

210. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения фигур Лиссажу.

211. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения перемagnичивания ферромагнитного сердечника.

212. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-C цепи.

213. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-C цепи.

214. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной L-C цепи.

215. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-L-C цепи (корни характеристического уравнения действительные неравные).

216. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-L-C цепи (корни характеристического уравнения комплексно сопряжённые).

217. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью наблюдения форм напряжений на активном сопротивлении и L-C фильтре.

218. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью вычисления 3-й, 5-й и 7-й гармоник.

219. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью вычисления углов фазовых сдвигов гармоник.

220. Реализовать схему электрическую принципиальную с целью получения фер-

222. Решение уравнений линии с распределёнными параметрами при установившемся синусоидальном процессе.
223. Определение комплексов тока и напряжения в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в начале линии.
224. Определение комплексов тока и напряжения в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в конце линии.
225. Падающая и отраженная волны в линии с распределёнными параметрами. Фазовая скорость. Длина волны.
226. Линия без искажений. Согласованная нагрузка. Определение тока и напряжения в линии при согласованной нагрузке. К.п.д. передачи при согласованной нагрузке. Единица измерения затухания.
227. Входное сопротивление нагруженной линии. Определение тока и напряжения в линии без потерь.
228. Входное сопротивление в линии без потерь при её холостом ходе. Входное сопротивление в линии без потерь при коротком замыкании в конце линии.
229. Стоячие электромагнитные волны в линии без потерь. Стоячие волны в линии без потерь при её холостом ходе.
230. Стоячие электромагнитные волны в линии без потерь. Стоячие волны в линии без потерь при коротком замыкании на конце линии.
231. Электростатическое поле. Закон Кулона.
232. Потенциал и напряженность в электростатическом поле. Разность потенциалов. Потенциальный характер электростатического поля.
233. Силовые и эквипотенциальные линии электростатического поля. Выражение напряженности в виде градиента от потенциала.
234. Дифференциальный оператор Гамильтона, его использование для записи градиента потенциала.
235. Поток вектора напряженности через элемент поверхности и через поверхность.
236. Свободные и связанные заряды. Поляризация вещества.
237. Вектор поляризации. Вектор электрической индукции.
238. Теорема Гаусса в интегральной форме. Применение теоремы Гаусса для определения напряженности и потенциала в поле точечного заряда.

239. Теорема Гаусса в дифференциальной форме. Дивергенция вектора электрической индукции и вектора напряжённости электрического поля. Вывод дивергенции напряжённости электрического поля в декартовой системе координат. Использование оператора набла для записи операции взятия дивергенции.

240. Уравнение Пуассона и уравнение Лапласа для электростатического поля.

241. Граничные условия. Условия на границе раздела проводящего тела и диэлектрика.

242. Граничные условия. Условия на границе раздела двух диэлектриков.

243. Общая характеристика задач электростатики и методы их решения. Теорема единственности решения.

244. Метод зеркальных изображений. Поле заряженной оси. Поле двухпроводной линии.

245. Ёмкость.

246. Потенциальные коэффициенты. Первая группа формул Максвелла.

247. Ёмкостные коэффициенты. Вторая группа формул Максвелла.

248. Частичные ёмкости. Третья группа формул Максвелла.

249. Плотность тока и ток. Закон Ома и второй закон Кирхгофа в дифференциальной форме.

250. Первый закон Кирхгофа в дифференциальной форме. Дифференциальная форма закона Джоуля – Ленца.

251. Уравнение Лапласа для электрического поля в проводящей среде.

252. Переход тока через среды с различной проводимостью. Соотношение между проводимостью и ёмкостью.

253. Связь основных величин, характеризующих магнитное поле. Механические силы в магнитном поле.

254. Интегральная и дифференциальная формы закона полного тока.

255. Раскрытие ротора напряжённости магнитного поля в различных формах и выражение его проекций в различных системах координат.

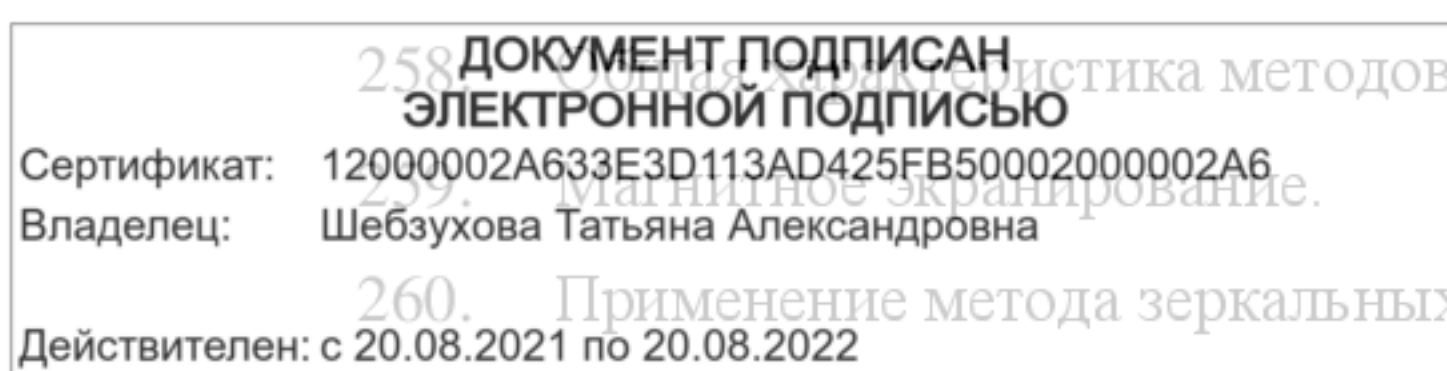
256. Принцип непрерывности магнитного потока. Скалярный потенциал магнитного поля.

257. Граничные условия в магнитном поле. Векторный потенциал магнитного поля. Выражение магнитного потока через циркуляцию вектора-потенциала.

258. Методы характеристики методов расчёта и исследования магнитных полей.

259. Магнитное экранирование.

260. Применение метода зеркальных изображений для расчёта магнитных полей.



- 261. Закон Био – Савара – Лапласа.
- 262. Определение переменного электромагнитного поля. Первое уравнение Максвелла.
- 263. Определение переменного электромагнитного поля. Второе уравнение Максвелла.
- 264. Определение переменного электромагнитного поля. Уравнение непрерывности.
- 265. Уравнение Максвелла в комплексной форме записи.
- 266. Теорема Умова – Пойнтинга для мгновенных значений.
- 267. Теорема Умова – Пойнтинга в комплексной форме.
- 268. Уравнения Максвелла для проводящей среды.
- 269. Распространение плоской электромагнитной волны в однородном проводящем полупространстве.
- 270. Плоская электромагнитная волна.
- 271. Глубина проникновения и длина волны.
- 272. Магнитный поверхностный эффект.
- 273. Электрический поверхностный эффект в плоской шине.
- 274. Применение теоремы Умова – Пойнтинга для определения активного внутреннего индуктивного сопротивлений проводников при переменном токе.
- 275. Распространение электромагнитных волн в анизотропном и изотропном диэлектриках.
- 276. Плоские волны в однородных и изотропных полупроводящих средах.
- 277. Вывод уравнений для векторного и скалярного потенциалов в переменном электромагнитном поле и их решение.
- 278. Запаздывающие потенциалы переменного электромагнитного поля.
- 279. Комплексная форма записи запаздывающего векторного потенциала.
- 280. Излучение электромагнитной энергии.

**Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

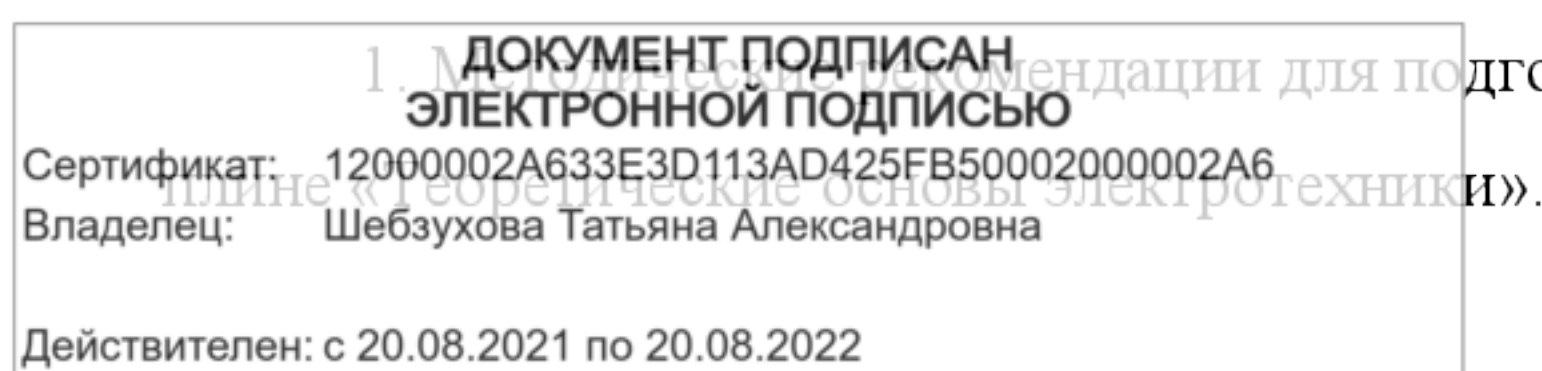
**Перечень основной литературы:**

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>
3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

**Перечень дополнительной литературы:**

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>
2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

**Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**



подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

***Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022