|  |  |
| --- | --- |
|  | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ**

КАФЕДРА **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К КУРСОВОЙ РАБОТЕ***

***НА ТЕМУ:***

**Анализ установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях**

Студент: . ПС4-51 \_\_\_\_\_ **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** \_\_\_\_Д.А. Кучейко\_\_\_

(Группа) (Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель курсовой работы: \_\_\_\_ \_\_\_\_А.В. Ситников\_\_

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_ П.М. Дмиртиев\_

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

*2023 г.*

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана**

**(национальный исследовательский университет)»**

**(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ФН-7

(Индекс)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.Б. Красовский

(И.О.Фамилия)

«10 »февраля 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение курсовой работы**

по дисциплине: Электротехника

Студент группы \_\_\_\_ПС4-51\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Кучейко Данила Алексеевич \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, имя, отчество)

Тема курсовой работы **Анализ установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях**

Направленность КР (учебная)

Источник тематики (кафедра) ФН-7

График выполнения работы: 25% к 4 нед., 50% к 7 нед., 75% к 10 нед., 100% к 12 нед.

***Задание*** Расчет источника гармонических колебаний (ИГК). Расчет четырехполюсника. Расчет установившихся значений напряжений и токов в электрических цепях при несинусоидальном воздействии. Расчет переходных процессов классическим методом.

***Оформление курсовой работы:***

Расчетно-пояснительная записка на \_41\_ листах формата А4.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать:

1.Техническое задание.

2.Содержательную часть, включающую расчетную часть, текстовое пояснение и рисунки схем и графиков. Рисунки должны быть пронумерованы и следовать в тексте сразу после ссылки на них.

3.Выводы

4.Список литературы, использованной в работе.

5.Оглавление с указанием страниц выполненных пунктов и подпунктов работы.

Дата выдачи задания « \_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Руководитель курсовой работы**  **А.В. Ситников**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**Студент Д.А. Кучейко**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

1. **ОГЛАВЛЕНИЕ 3**
2. **Техническое задание 4**
3. **Расчет источника гармонических колебаний**

3.1. Определяем параметры эквивалентного источника и тока в катушке **8**

3.2. Найдем мгновенные значения тока и напряжения для этой катушки **11**

3.3. Определение индуктивностей и взаимных индукций **12**

1. **Расчет и анализ четырехполюсника**

4.1. Расчёт токов и выходного напряжения методом входного сопротивления **15**

4.2. Мгновенные напряжения **18**

4.3. Определение передаточных функций **18**

4.4. Определение АЧХ и ФЧХ uВЫХ при заданном uВХ. Сравнить с п. 2.2 **19**

4.5. Определить, какое реактивное сопротивление нужно подключить к схеме (резонанс напряжений). Определить входное сопротивление, входной ток и добротность колебательного контура  **20**

1. **Расчет установившихся значений напряжений и токов в электрических цепях при несинусоидальном воздействии**

5.1. Расчет законов изменения тока iвх(t) и напряжения uвых(t) частотным методом **22**

5.2. Построение графиков токов и напряжений **24**

5.3. Определение действующих значения несинусоидальных токов и напряжений, активную мощность, потребляемую четырехполюсником, коэффициенты искажения iвх(t), uвых(t), uвх(t) **25**

1. **Расчет переходных процессов классическим методом**

6.1. Определение и построение переходной и импульсной характеристик цепи четырехполюсника для входного тока и выходного напряжения **26**

6.2. Расчет и построение графиков изменения тока iвх и напряжения uвых четырёхполюсника  **32**

1. **Вывод 40**
2. **Список используемой литературы 41**

Техническое задание.

1. Расчет источника гармонических колебаний (ИГК).

* 1. . Выбрать в качестве первичной обмотки воздушного трансформатора одну из катушек индуктивностей ИГК (Ln) (Приложение 1, Рис. 1). Определить значения тока и напряжения первичной обмотки трансформатора методом эквивалентного источника (напряжения или тока).
  2. . Записать мгновенные значения тока и напряжения первичной обмотки трансформатора Т1 и построить их волновые диаграммы.
  3. . Определить значения Mnq, Mnp, Lq, Lp Т1 из условия, что индуктивность первичной обмотки Ln известна, U1 = 5 B, U2 = 10 B. Коэффициент магнитной связи обмоток k следует выбрать самостоятельно в диапазоне: 0,5 < k < 0,95 (n, p, q, - номера индуктивностей Т1).

2. Расчет четырехполюсника.

2.1 Рассчитать токи и напряжения методом входного сопротивления (или входной проводимости), построить векторные диаграммы токов и напряжений.

2.2 Записать мгновенные значения u1=u3=uвх, iвх и uвых , определить сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями, а также отношение их действующих значений.

2.3 Определить передаточные функции:

W(s)= Uвых(s)/ Uвх(s), W(jω) = Uвых/Uвх

2.4 Определить и построить амплитудно- и фазочастотные характеристики. Используя частотные характеристики, определить uвых при заданном uвх. Сравнить этот результат с полученным в п. 2.2.

2.5 Определить, какое реактивное сопротивление нужно подключить к схеме, чтобы uвх и iвх совпадали по фазе (резонанс напряжений). Определить входное сопротивление, входной ток и добротность колебательного контура.

3. Расчет установившихся значений напряжений и токов в электрических цепях при несинусоидальном воздействии.

Переключатель Кл перевести в положение 2 в момент времени, когда входное напряжение u3(t)=0, du3/dt > 0, т.е. в момент начала положительного импульса напряжения u4(t). Это условие будет выполнено при равенстве аргумента входного напряжения (ωt + ψu3) = 2 kπ, где k = 0, 1, 2, 3…

3.1 Рассчитать законы изменения тока iвх(t) и напряжения uвых(t) частотным методом, представив напряжение uвх(t) = u4(t) в виде ряда Фурье до 5-й гармоники:

5

uвх(t) = Σ (4 U m / kπ) sin kωt, где k – целое нечетное число.

1

3.2 Построить графики uвх(t), uвх(t), iвх(t), uвых(t) в одном масштабе времени один под

другим, где uвх(t), iвх(t),и uвых(t) - суммарные мгновенные значения.

3.3 Определить действующие значения несинусоидальных токов и напряжений из расчетов п., а также активную мощность, потребляемую четырехполюсником, коэффициенты искажения iвх(t), uвых(t), uвх(t).

4. Расчет переходных процессов классическим методом.

4.1 Определить и построить переходную и импульсную характеристики цепи четырехполюсника для входного тока и выходного напряжения.

4.2 Рассчитать и построить графики изменения тока iвх и напряжения uвых четырёхполюсника при подключении его к клеммам с напряжением u4(t) в момент времени, когда входное напряжение u3(t)=0, du3/dt > 0 (это условие будет выполнено при равенстве аргумента входного напряжения (ωt + ψu3) = 2 kπ, где k = 0, 1, 2, 3), с учетом запаса энергии в элементах цепи от предыдущего режима работы на интервале t [0+, 2.5T], где T- период изменения напряжения u4.

Сравнить графики iвх(t), uвых(t) с соответствующими в п. 3.2.

**Цель работы и описание схемы.**

**Цель работы:** закрепить теоретический материал, научиться приемам и методам познавательной деятельности, умению обращаться и вырабатывать навыки теоретического мышления и самостоятельной работы

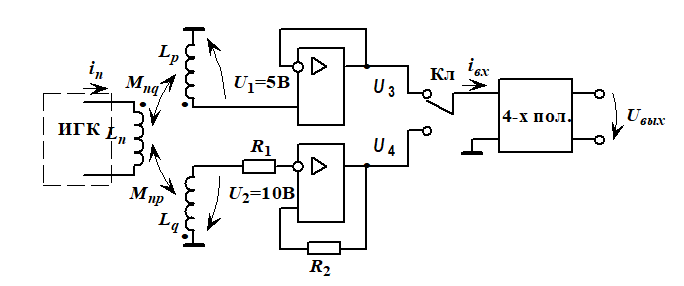
****

Рис 1. Общая схема цепи

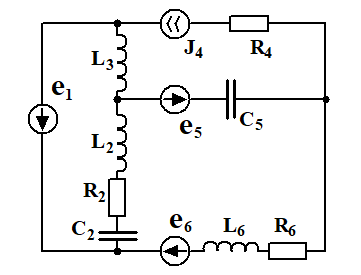
****

Рис 2. Электрическая схема источника гармонических колебаний

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 29 | E1 | e5 | e6 | J4 | R2 | R4 | R6 | L2 | L3 | L6 | C2 | C5 |
| А | 200+200j |  |  | -4j | 200 | 50 | 150 | 150 | 100 | 100 | 4 | 20/3 |

Единицы измерений: e [В], J [А], R [Ом], L [мГн], C [мкФ].

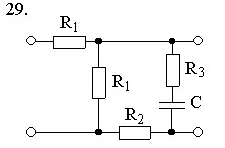


Рис. 3 Схема четырехполюсника

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| R1, Ом | R2, Ом | R3, Ом | C, Ф |
| 400 | 40 | 160 | 0,0000125 |

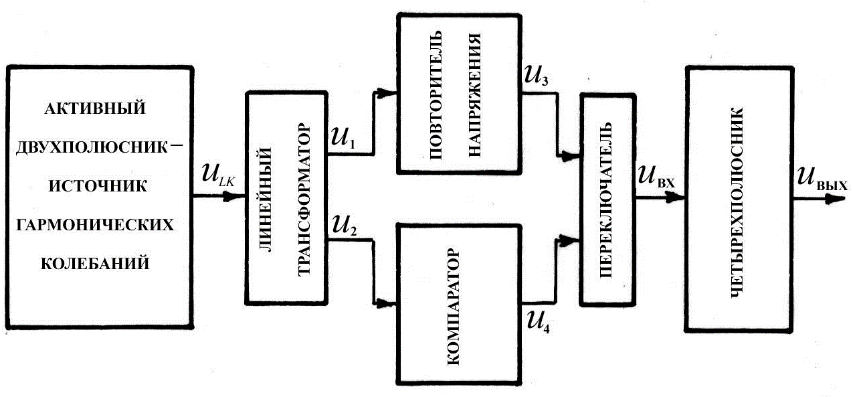


Рис. 4 Структурная схема электрической цепи

**3. Расчёт источника гармонических колебаний (ИГК)**

**3.1. Выбрать в качестве первичной обмотки воздушного трансформатора одну из катушек индуктивностей ИГК (Ln) (Приложение 1, Рис. 1). Определить значения тока и напряжения первичной обмотки трансформатора методом эквивалентного источника (напряжения или тока).**

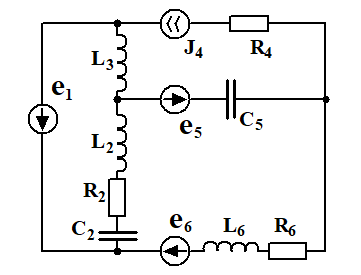
****

Рис 5 Электрическая схема источника гармонических колебаний

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 29 | E1 | e5 | e6 | J4 | R2 | R4 | R6 | L2 | L3 | L6 | C2 | C5 |
| А | 200+200j |  |  | -4j | 200 | 50 | 150 | 150 | 100 | 100 | 4 | 20/3 |

Определим сопротивление реактивных элементов на заданной частоте:

𝜔 = 1000 𝑐−1

𝑋𝐿2 = 𝜔𝐿2 =1000 \* 150 \* 10-3= 150

𝑋𝐿3 = 𝜔𝐿3 =1000 \* 100 \* 10-3= 100

𝑋𝐿6 = 𝜔𝐿3 =1000 \* 100 \* 10-3= 100

Запишем значения величин, заданных в мгновенных значениях, в комплексной форме:

Выбираем в качестве первичной катушки L6:

Согласно теореме об эквивалентном генераторе, любая цепь относительно нагрузки может быть представлена тремя элементами: идеальным источником ЭДС, его внутренним сопротивлением и сопротивлением нагрузки. Тогда ток в нагрузке можно найти по формуле:

Uxx – напряжение холостого хода.

Zr – сопротивление генератора.

ZH – сопротивление нагрузки.

Определим сопротивление генератора. Для этого нагрузка удаляется из расчётной цепи, а все источники тока и напряжения заменяются их внутренними сопротивлениями.

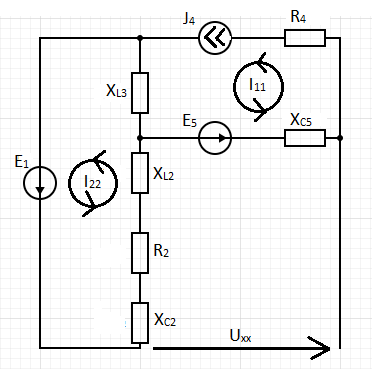


Рис. 6 Эквивалентная схема в комплексном виде в режиме холостого хода

Определим напряжение холостого хода

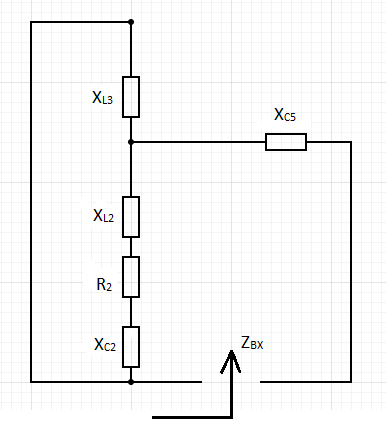


Рис. 7 Входное сопротивление ZВХ

Искомый ток через L6 (ток первичной обмотки)

Напряжение на первичной обмотке:

**3.2 Записать мгновенные значения тока и напряжений первичной обмотки трансформатора Т1 и построить их волновые диаграммы.**

Мгновенные значение искомых величин:

Волновые диаграммы искомого тока и напряжения: -0.005 до 0.01

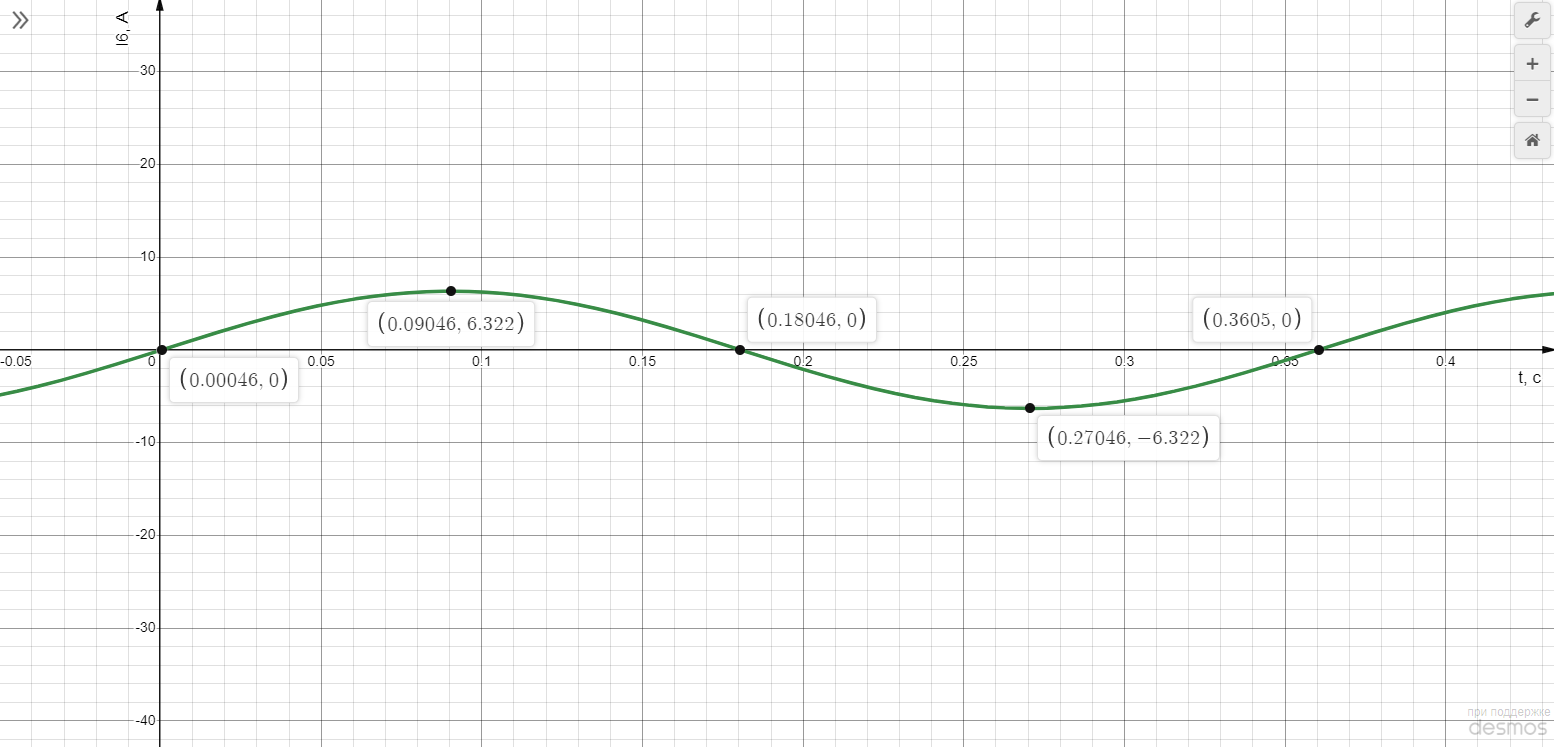


Рис. 8 Волновая диаграмма тока первичной катушки трансформатора

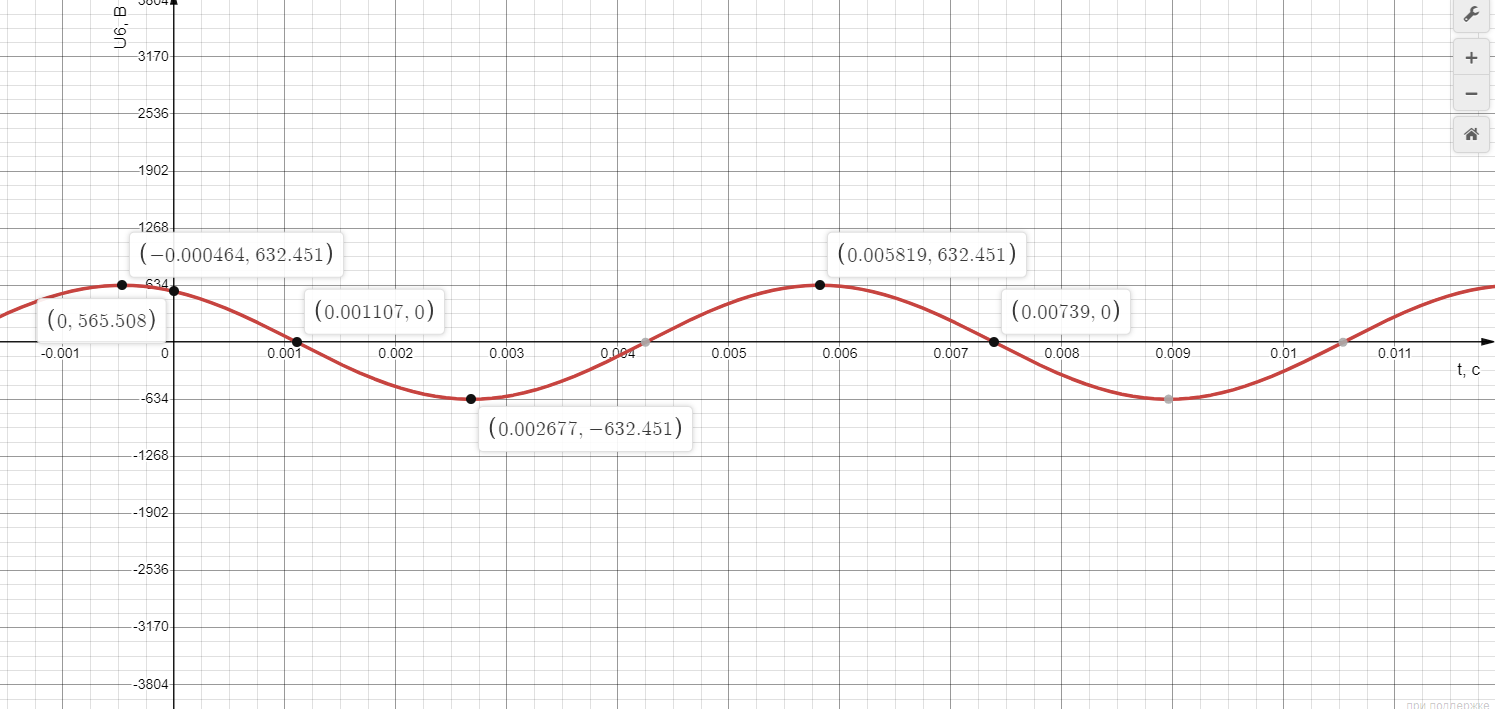


Рис. 9 Волновая диаграмма напряжения первичной катушки трансформатора

**3.3 Определить значения *Mnq, Mnp, Lq, Lp* Т1 из условия, что индуктивность первичной обмотки *Ln* известна, *U1* = 5 B, *U2* = 10 B. Коэффициент магнитной связи обмоток *k* следует выбрать самостоятельно в диапазоне: 0,5 <k <0,95 (n, p, q, - номера индуктивностей Т1).**

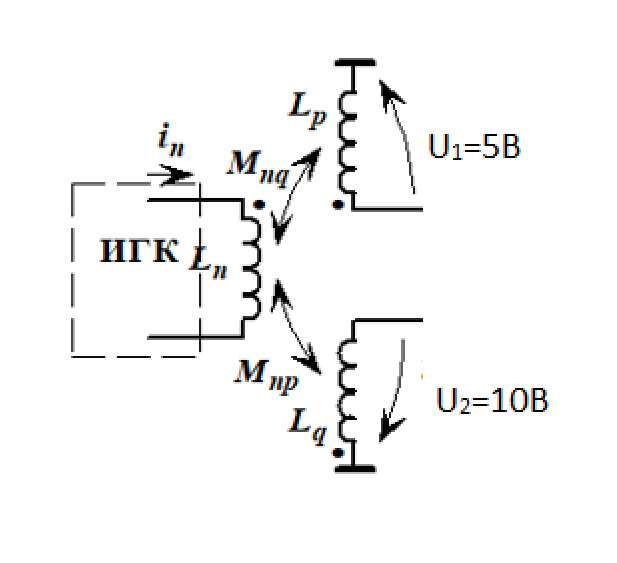


Рис. 10 Схема воздушного трансформатора

Пусть коэффициент связи катушек равна 0.75

Напряжение на вторичной обмотке:

Отсюда:

Взаимная индуктивность:

Взаимная индуктивность определяется по формуле

Отсюда

Аналогично для второй вторичной обмотки:

Отсюда:

Взаимная индуктивность:

Взаимная индуктивность определяется по формуле

Отсюда

Находим напряжение Lp и Lq

**4. Расчет четырёхполюсника**

**4.1 Рассчитать токи и напряжения методом входного сопротивления (или входной проводимости), построить векторные диаграммы токов и напряжений.**

Номиналы элементов:

𝑅1 = 400 Ом;

𝑅2 = 40 Ом;

𝑅3 = 160 Ом;

С1= 0.0000125=125\*10-7 Ф

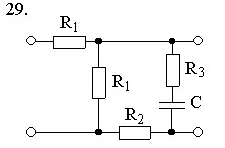


Рис. 11 Исходная схема четырехполюсника

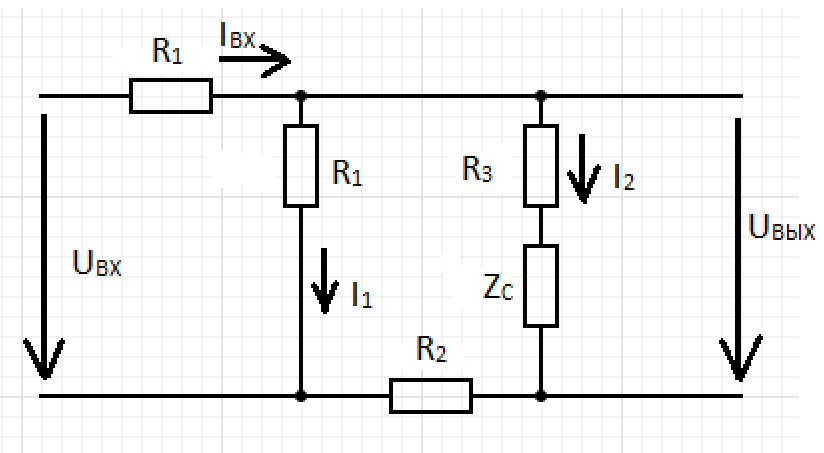


Рис. 12 Комплексная форма четырехполюсника

Из пункта 1.3:

Входное сопротивление четырехполюсника:

Входной ток:

Остальные токи:

Выходное напряжение:

Остальное напряжение на элементах цепи:

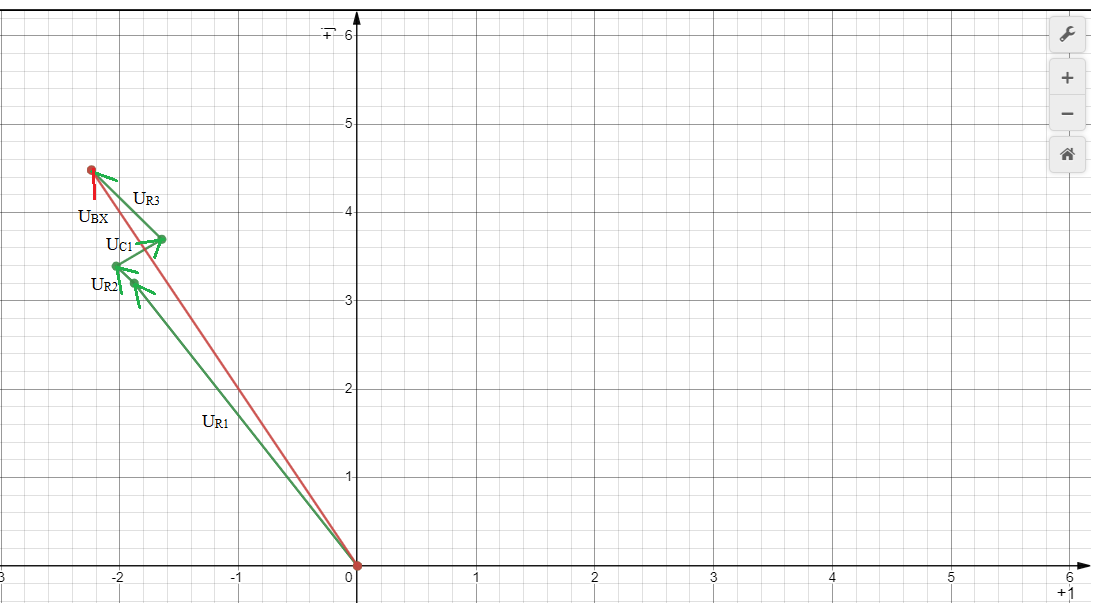
****

Рис. 13 Векторная диаграмма напряжений четырехполюсника

****

Рис. 14 Векторная диаграмма токов четырехполюсников

**4.2 Записать мгновенные значения *u1=u3=uвх*, *iвх*и *uвых* , определить сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями, а также отношение их действующих значений.**

Мгновенные значения искомых токов и напряжений:

Сдвиг по фазе между входным и выходным напряжением:

Отношение действующих значений входного и выходного напряжений:

**4.3 Определить передаточные функции: W(s)= Uвых(s)/ Uвх(s), W(jω) = Uвых/Uвх**

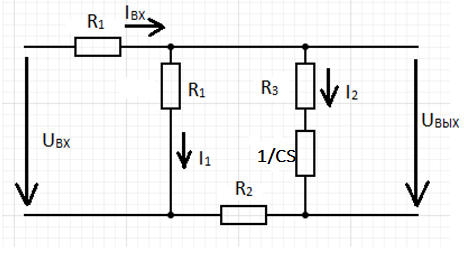


Рис. 15 Схема четырехполюсника в операторном виде

Определим комплексную передаточную функцию цепи:

В операторной записи:

**4.4 Определить и построить амплитудно- и фазочастотные характеристики. Используя частотные характеристики, определить uвых при заданном uвх. Сравнить этот результат с полученным в п. 2.2.**

Для заданной частоты ω = 1000 с-1:

A (1000) = 0.219

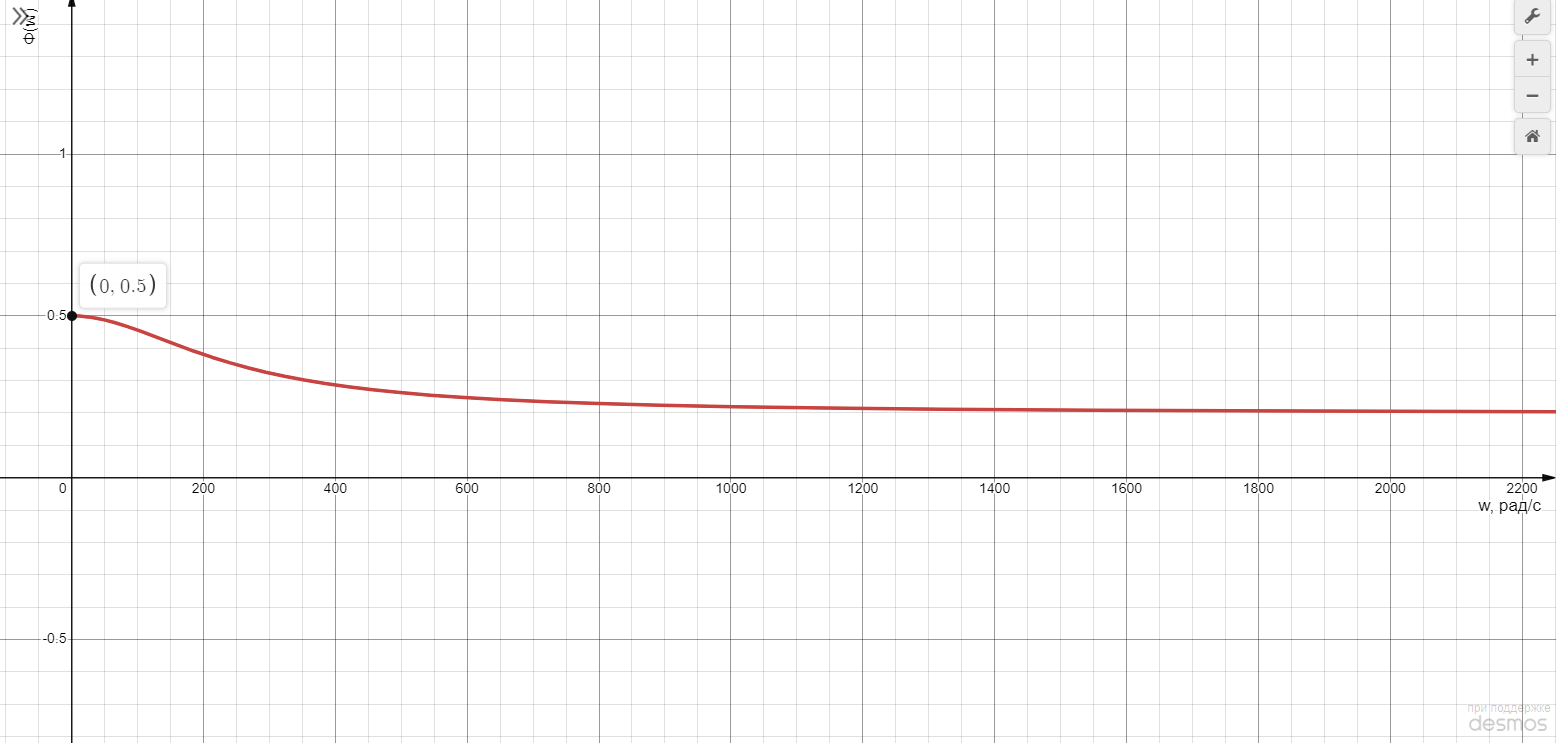


Рис. 16 АЧХ четырехполюсника

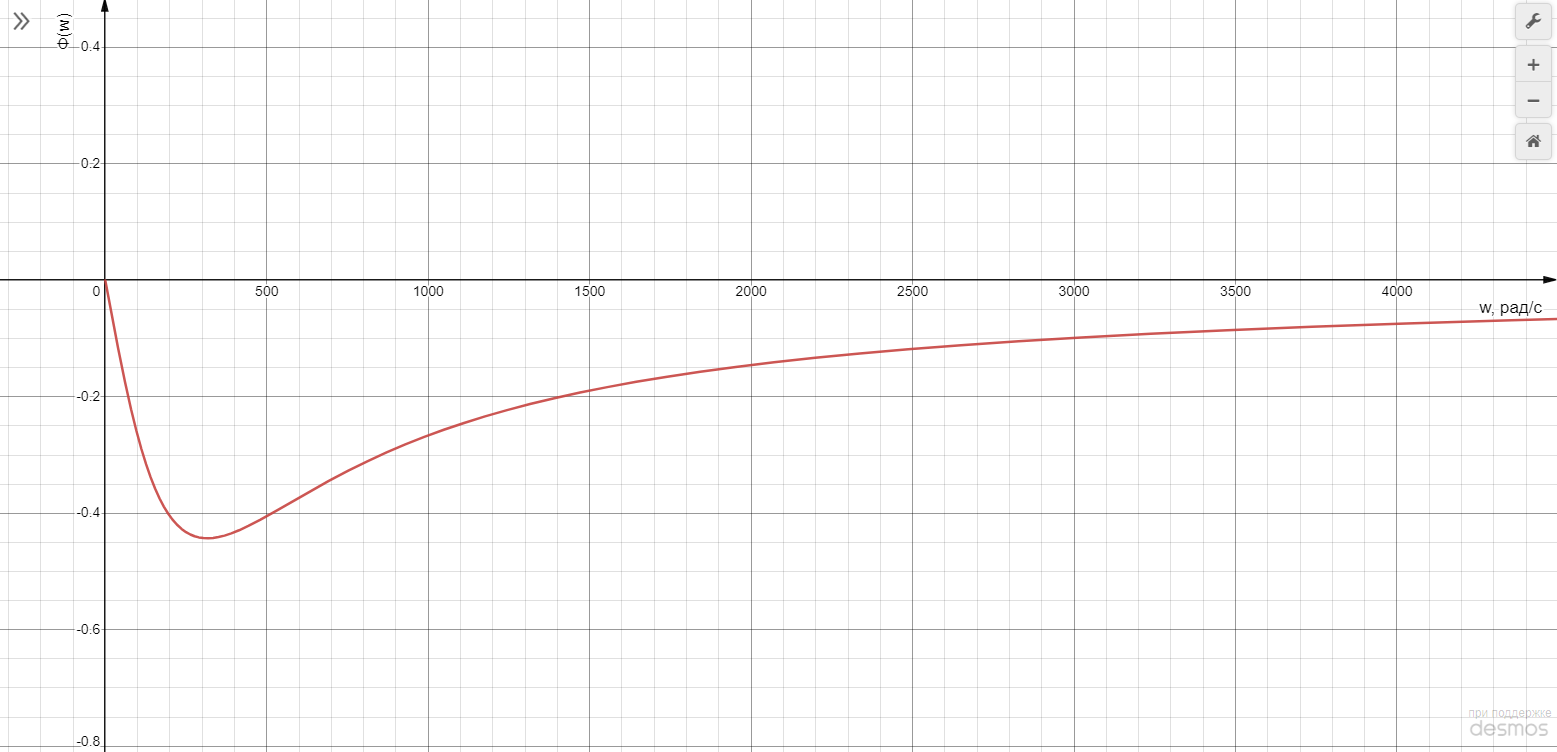


Рис. 17 ФЧХ четырехполюсника

Проверка значений с пунктом 4.2 выполняется – совпадают.

**4.5 Определить, какое реактивное сопротивление нужно подключить к схеме, чтобы uвх и iвх совпадали по фазе (резонанс напряжений). Определить входное сопротивление, входной ток и добротность колебательного контура**.

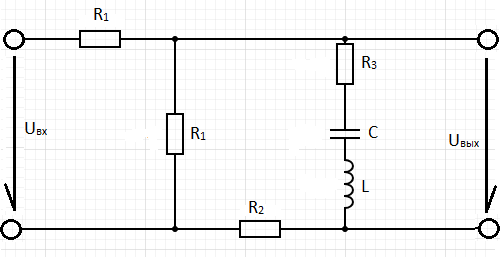


Рис. 18 Электрическая схема четырехполюсника в условии резонанса

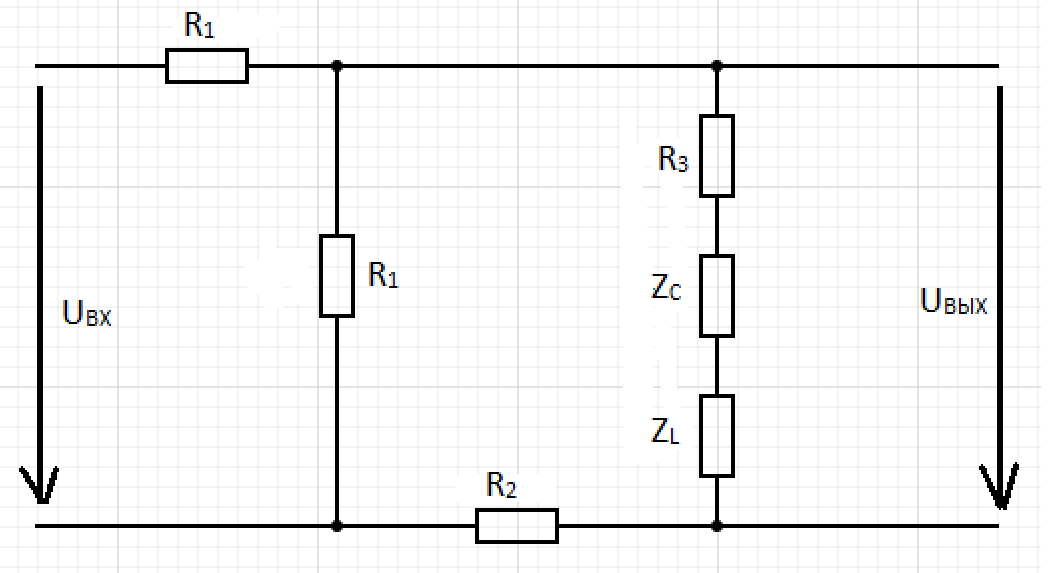


Рис. 19 Комплексная форма четырехполюсника

Входное сопротивление:

Условие резонанса:

Im (zвх) = 0

Тогда:

**5.Расчет установившихся значений напряжений и токов в электрических цепях при несинусоидальном воздействии.**

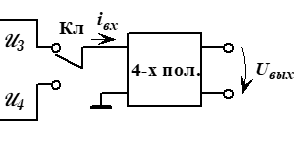


Рис. 20 Переключатель Кл в положении 2

Переключатель Кл перевести в положение 2 в момент времени, когда входное напряжение u3(t) = 0, du3/dt >0, т.е. в момент начала положительного импульса напряжения u4(t). Это условие будет выполнено при равенстве аргумента входного напряжения (ωt + ψu3) = 2kπ, где k = 0, 1, 2, 3...

**5.1 Рассчитать законы изменения тока iвх(t) и напряжения uвых(t) частотным методом, представив напряжение uвх(t) = u4(t) в виде ряда Фурье до 5-й гармоники:**

𝑅1 = 400 Ом;

𝑅2 = 40 Ом;

𝑅3 = 160 Ом;

С1= 0.0000125=125\*10-7 Ф

Разложение в ряд Фурье имеет вид:

Um = 10 B

В комплексной гармонике имеют вид:

Для расчетов выходных напряжений воспользуемся передаточной функцией :

Во временной форме имеют вид:

Для вычисления тока воспользуемся каждой гармоникой:

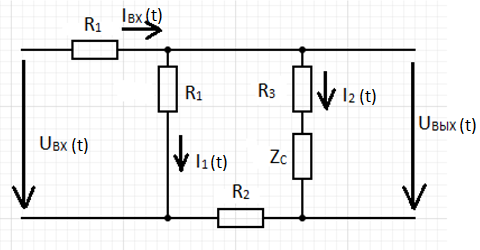


Рис. 21 Схема четырехполюсника

Комплексные сопротивления для каждой гармоники:

Расчет входного сопротивления:

**5.2 Построить графики uвх(t), uвх(t), iвх(t), uвых(t) в одном масштабе времени один под другим, где uвх(t), iвх(t),и uвых(t) - суммарные мгновенные значения.**

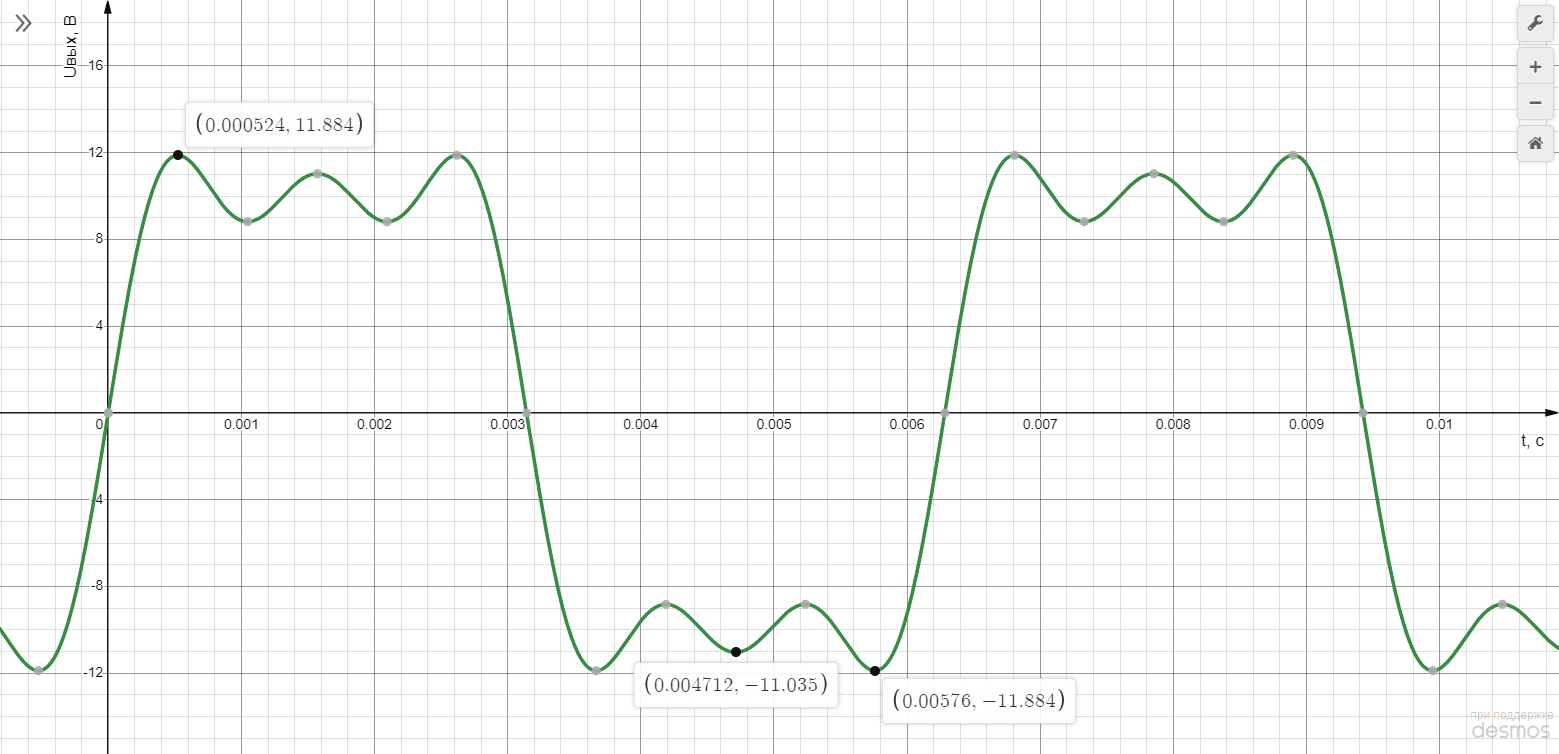
****

Рис. 22 Входное напряжение четырехполюсника при несинусоидальном воздействии

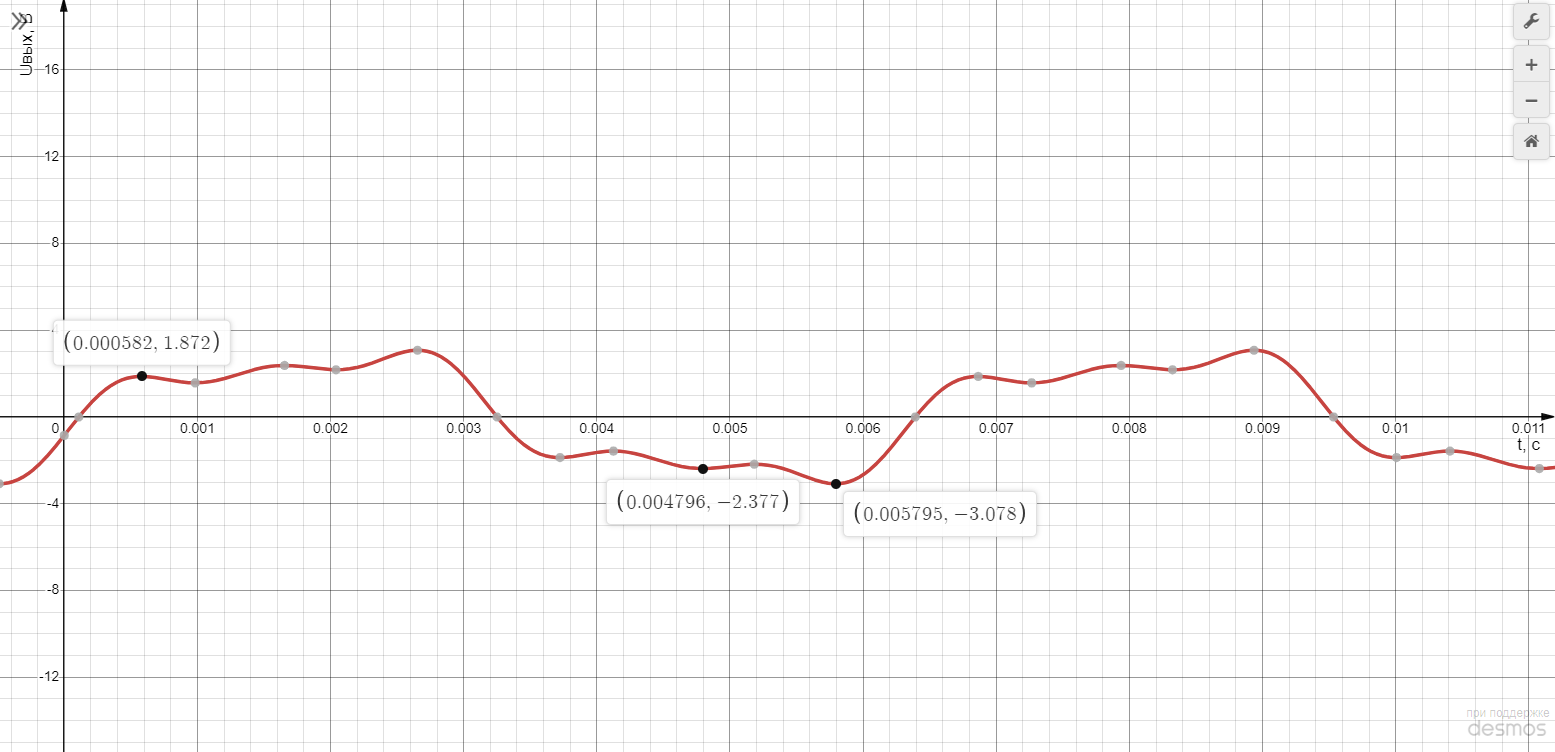


Рис. 23 выходное напряжение четырехполюсника при несинусоидальном воздействии

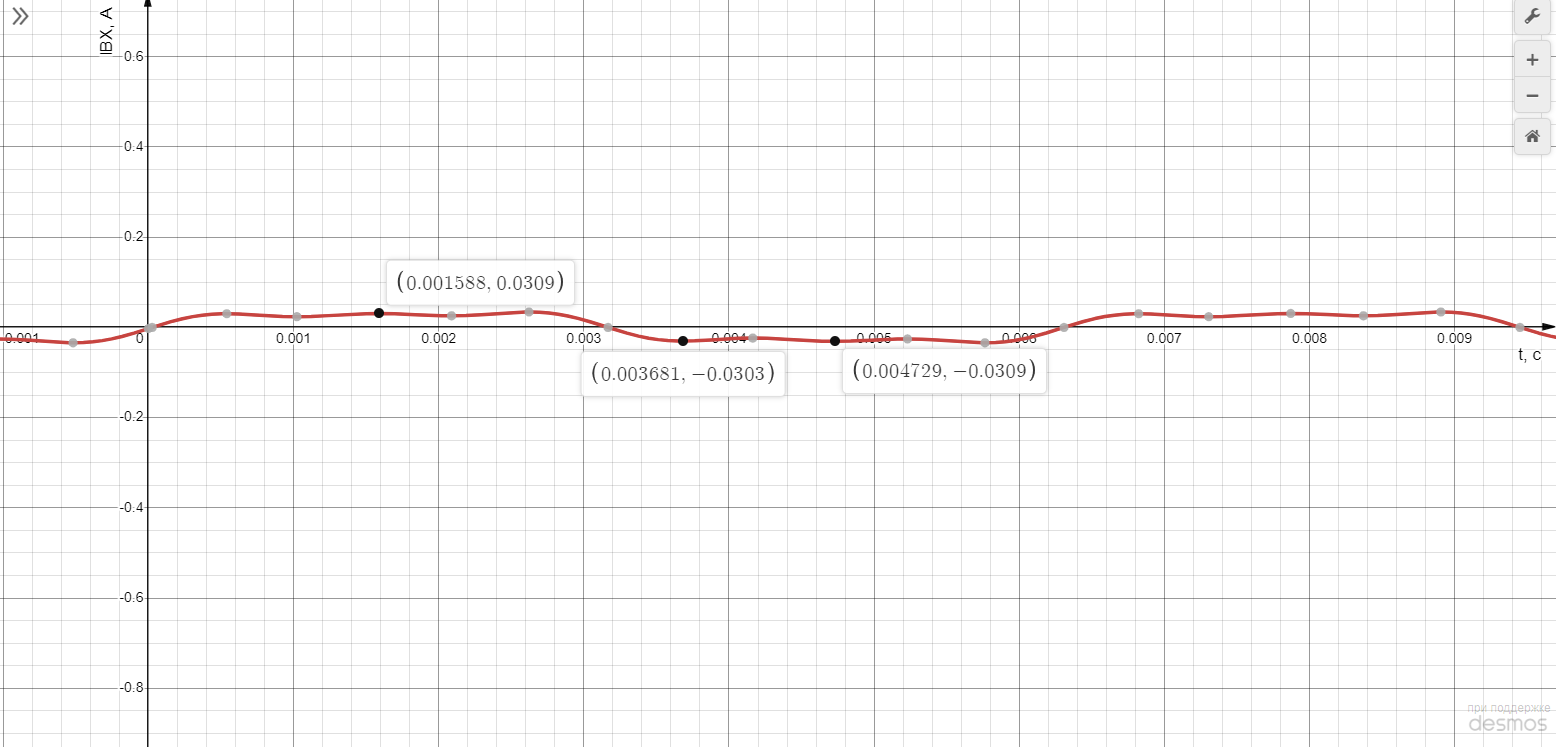


Рис. 24 Входной ток четырехполюсника при несинусоидальном воздействии

**5.3 Определить действующие значения несинусоидальных токов и напряжений из расчетов п., а также активную мощность, потребляемую четырехполюсником, коэффициенты искажения iвх(t), uвых(t), uвх(t).**

Активная мощность, потребляемая четырехполюсником:

Коэффициент искажения:

**6. Расчет переходных процессов классическим методом.**

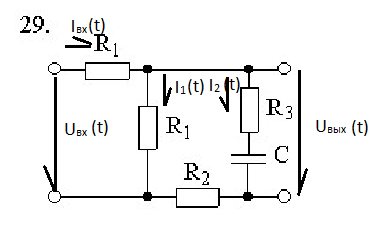
****

Рис. 25 Схема четырехполюсника

**6.1 Определить и построить переходную и импульсную характеристики цепи четырехполюсника для входного тока и выходного напряжения**.

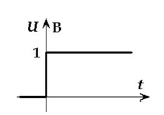


Рис. 26 Ступенчатое входное воздействие

Определим переходную и импульсную характеристику цепи для единичного ступенчатого входного воздействия.

Определим независимые начальные условия (t=0-):

В установившемся режиме нет входного напряжения, значит все токи в цепи и выходное напряжение равны нулю.

𝑅1 = 400 Ом;

𝑅2 = 40 Ом;

𝑅3 = 160 Ом;

С1= 0.0000125=125\*10-7 Ф

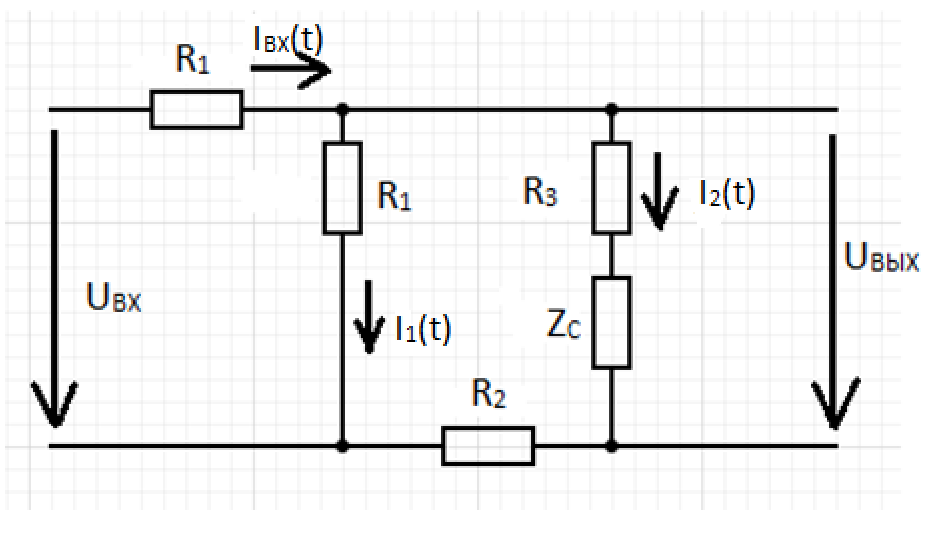


Рис. 27 Схема четырехполюсника

При  имеем:

Определим параметры цепи при неустановившемся режиме работы (t=0+):

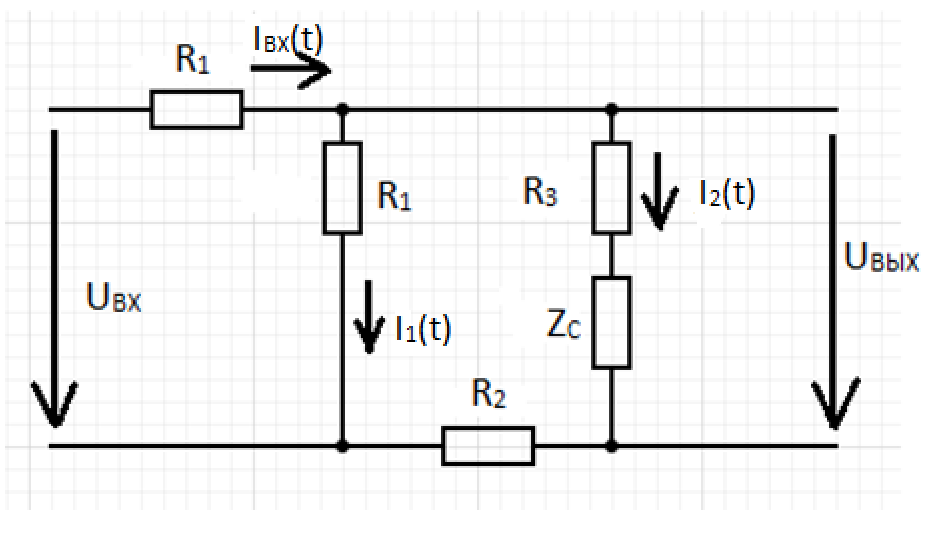


Рис. 28 Схема при неустановившемся режиме работ

Определим параметры цепи при установившемся режиме работы (t=∞):

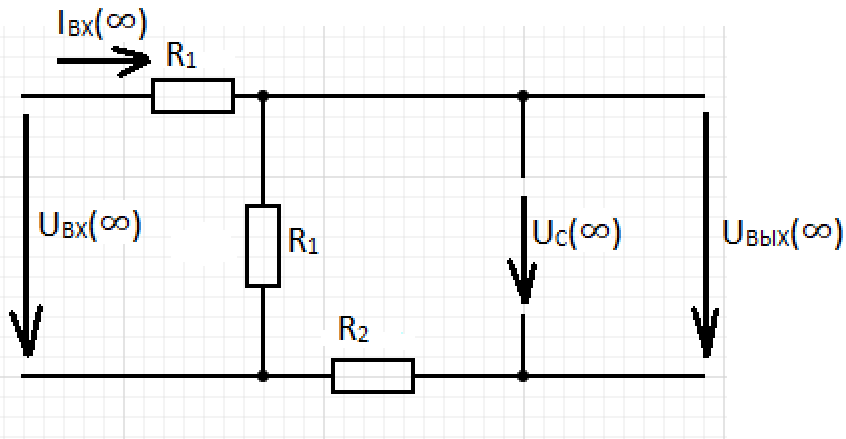


Рис. 29 Схема четырехполюсника при t(∞)

Тогда:

Составимдифференциальные уравнения:

Переходные характеристики:

**

Рис. 30 Переходная характеристика входного тока

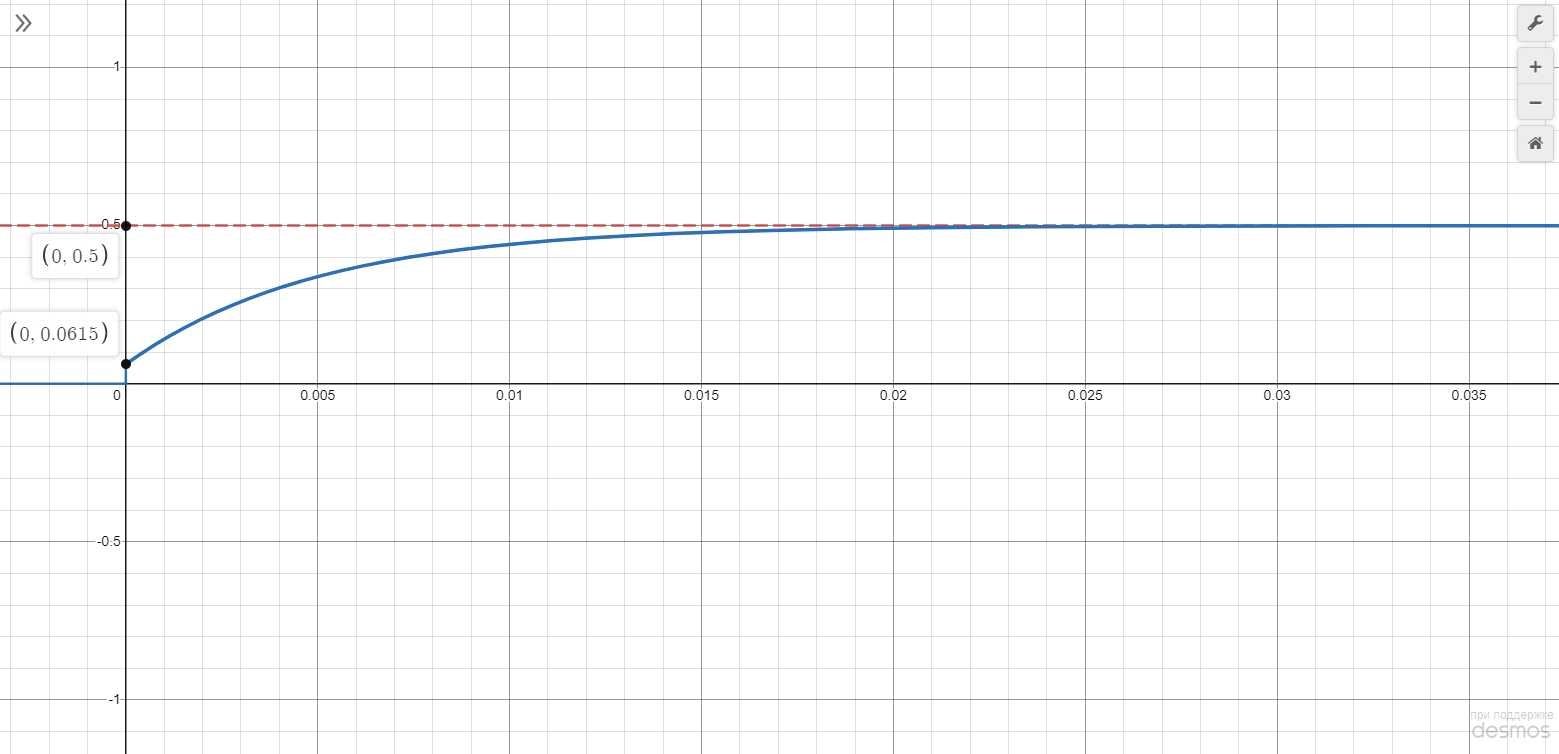


Рис. 31 Переходная характеристика выходного напряжения

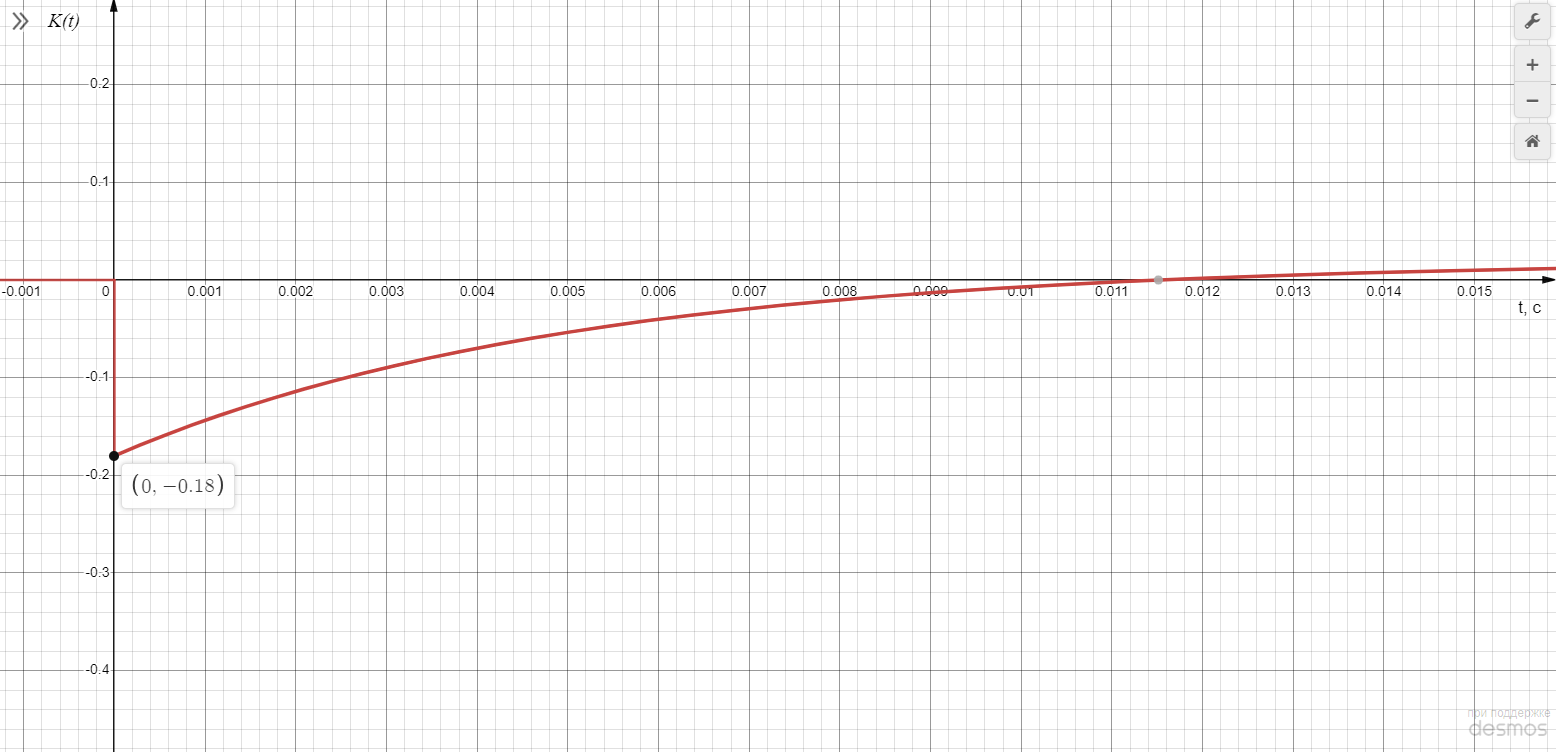


Рис. 32 Импульсная характеристика входного тока

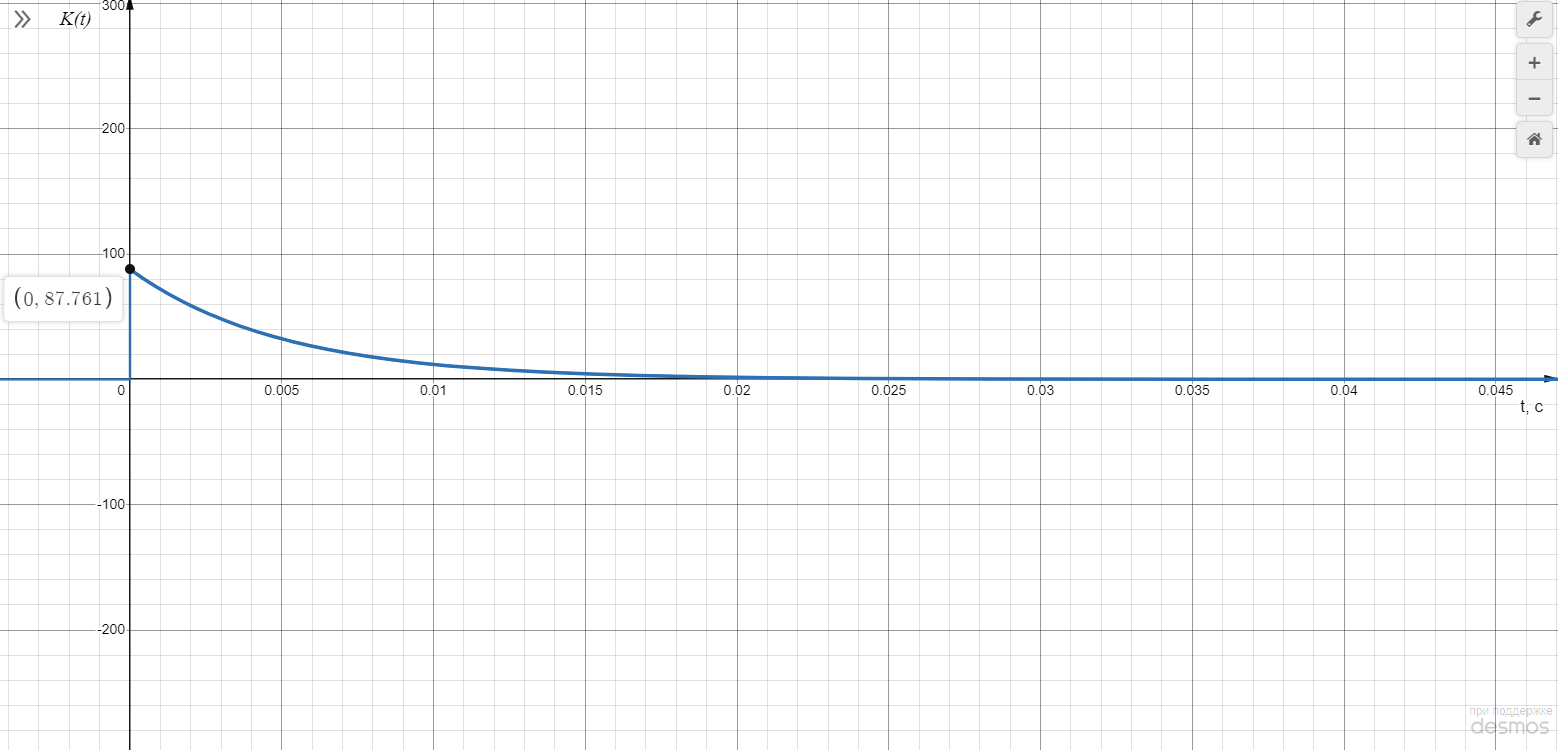


Рис. 33 Импульсная характеристика выходного напряжения **6.2 Рассчитать и построить графики изменения тока iвх и напряжения uвых четырёхполюсника при подключении его к клеммам с напряжением u4(t) в момент времени, когда входное напряжение u3(t)=0, du3/dt > 0 (это условие будет выполнено при равенстве аргумента входного напряжения (ωt + ψu3) = 2 kπ, где k = 0, 1, 2, 3), с учетом запаса энергии в элементах цепи от предыдущего режима работы на интервале t [0+, 2.5T], где T- период изменения напряжения u4.**

**Сравнить графики iвх(t), uвых(t) с соответствующими в п. 3.2.**

При работе в этом пункте из-3 малых значений токов и напряжений будем считать до пятого знака после запятой, чтоб избежать искажений результатов.



Посчитаем оператор S:



Перепишем значения из пунктов, полученных ранее:

1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при** :

Произведем расчет при :





Произведём расчет при :





1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при** :

Произведем расчет при :



Составим систему уравнений используя законы Киргофа:



Решив которую, мы найдём  и :







Произведем расчет при **t =** :



**Определяем коэффициенты ДУ**



1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при , :**

Произведём расчет при :



Составим систему уравнений используя законы Киргофа:



Решив которую, мы найдём  и :







Произведем расчет при **t =** :



**Определяем коэффициенты ДУ**



1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при** :







Составим систему уравнений используя законы Киргофа:



Решив которую мы найдём  и :







Произведем расчет при **t =** :



**Определяем коэффициенты ДУ**



1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при** ,:

Произведём расчет при :



Составим систему уравнений используя законы Киргофа:



Решив которую, мы найдём  и :







Произведем расчет при **t =** :



**Определяем коэффициенты ДУ**



1. **Рассчитаем входной ток и выходное напряжение при**:







Составим систему уравнений используя законы Киргофа:



Решив которую мы найдём  и :







Произведем расчет при **t =** :



**Определяем коэффициенты ДУ**



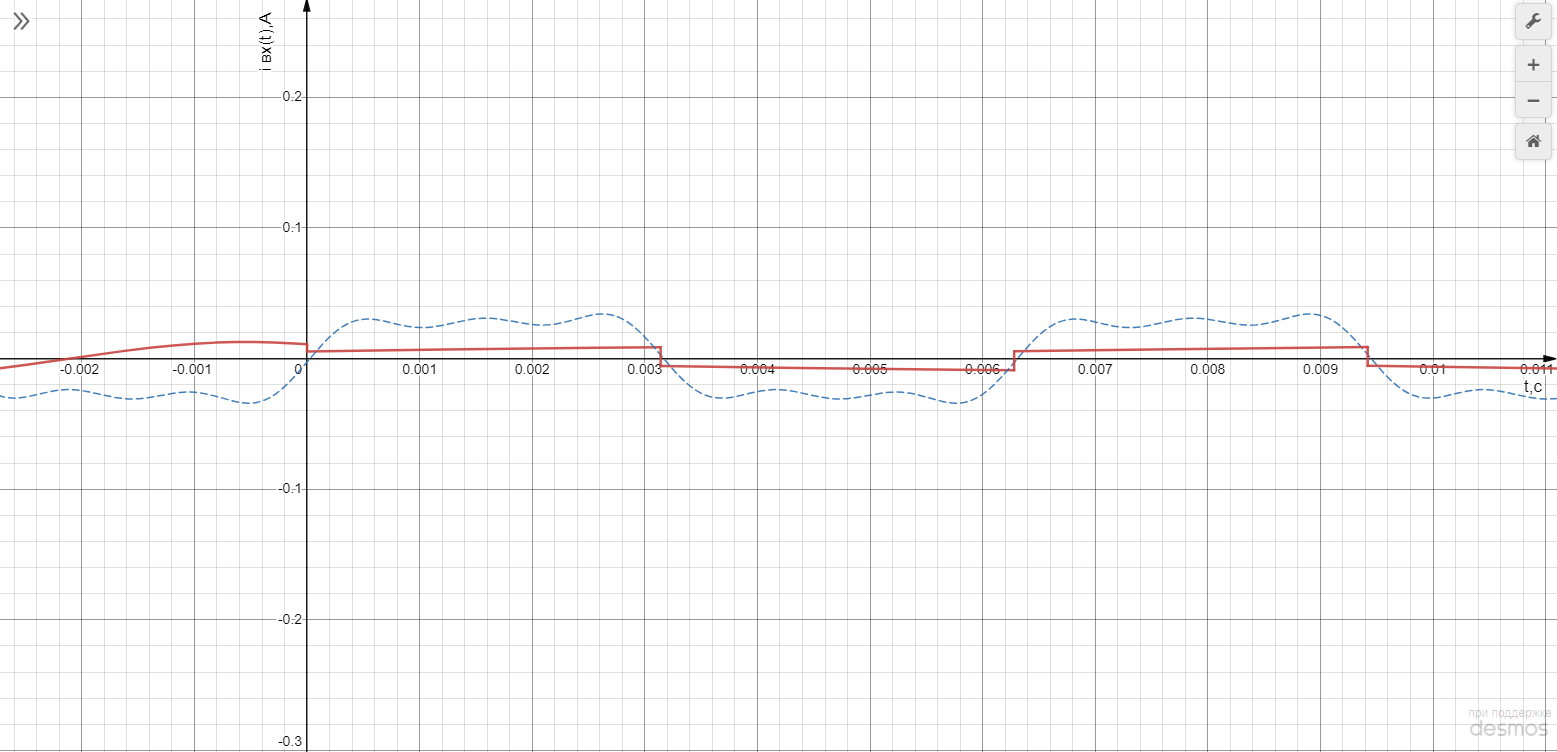


Рис. 31 Наложение графика разложенного в ряд Фурье на сигнал входного тока

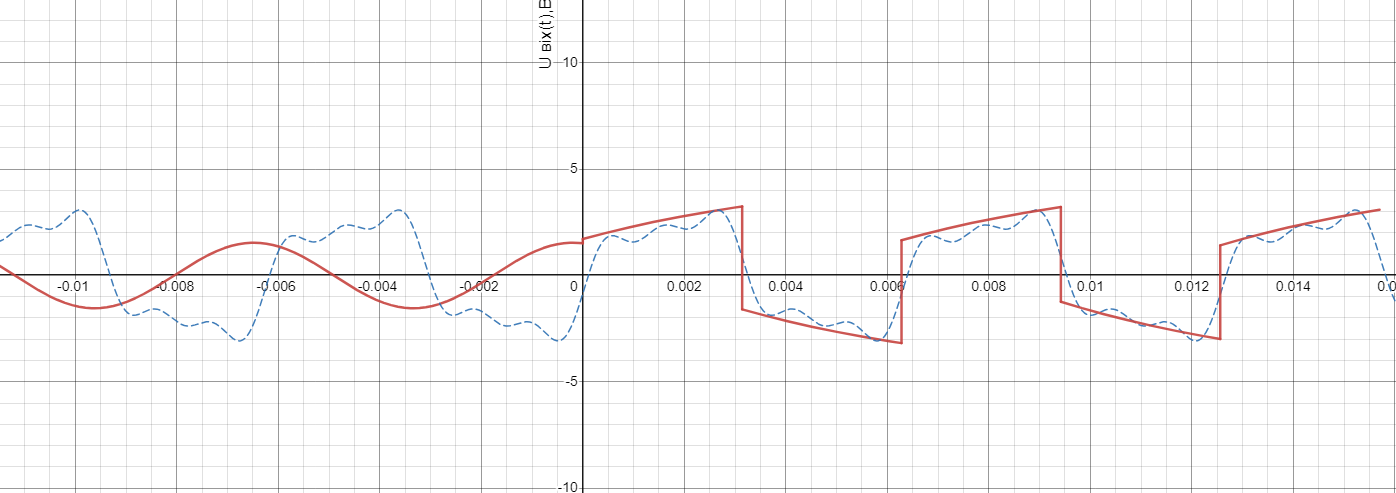


Рис. 32 Наложение графика разложенного в ряд Фурье на сигнал выходного напряжения

**7.Вывод:**

В курсовой работе проведен анализ установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях. В рамках работы было выполнено техническое задание, включающее следующие этапы:

1.В первой части курсовой работы был проведён расчёт источника гармонических колебаний методом эквивалентного генератора, а также расчёт параметров первичной обмотки катушки трансформатора.

2.Во второй части был проведён анализ установившегося режима работы четырёхполюсника при синусоидальном входном токе. Были найдены передаточная функция по напряжению, определены АЧХ и ФЧХ, реактивное сопротивление, при подключении которого к цепи, входной ток и входное напряжение совпадали по фазе.

3.В третьем разделе с помощью разложения в ряд Фурье был произведен расчет установившихся в четырехполюснике значений токов и напряжений при несинусоидальном воздействии и построены соответствующие графики. Как видно из графиков, четырехполюсник меняет вид воздействия: форма входного и выходного напряжений различна.

4.В последнем расчете в четвертом разделе были рассмотрены переходные процессы, для которых мы определили переходные и импульсные характеристики для входного тока и выходного напряжения цепи четырехполюсника.

Также, хочется сказать про курсовую работу в целом. Это довольно интересный опыт. Для её написания, потребовалось изучить много разной информации из разных источников: лекции, семинары, учебники, да и просто поискать в интернет. Также эта работа позволила применить полученные теоретические знания на практики. Я понимаю, что работа не класс, и в ней точно будут ошибки, я всё равно доволен проделанной мною работой.

**8.Список литературы:**

1. Ситников А.В. Основы электротехники: Учебник / А.В. Ситников – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2017. 288 с.

2. Кузовкин В.А. Теоретическая электротехника: Уч. Пособие / В.А. Кузовкин – М.: Логос, 2005.

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996.

4. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003.

5. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей / А.К. Лосев. – М.: Высшая.школа,1987.