

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»  
(ОмГУПС (ОмИИТ))

Кафедра «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети»

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДВУХПОЛЮСНИКОВ И ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Пояснительная записка к курсовой работе  
по дисциплине «Теория линейных электрических цепей»

Студент группы 29а

(подпись)

\_\_\_\_\_  
ФИО

Руководитель –

ст.преподаватель кафедры ТРСиС

Д.А. Федотов

Омск 2021

Бланк задания

## Р Е Ф Е Р А Т

Курсовой проект содержит 27 страниц, 26 рисунков, 3 таблицы, использовано 6 источников.

ДВУХПОЛЮСНИК, ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИК, ХОЛОСТОЙ ХОД, КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ, ОБРАТНЫЙ ХОЛОСТОЙ ХОД, ОБРАТНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ, РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ

В данном курсовом проекте выполняется синтез схем реактивных двухполусников(ДП), входящих в состав исследуемого четырехполусника(ЧП), расчет входных сопротивлений четырехполусника в режимах холостого хода(ХХ) и короткого замыкания(КЗ), нахождение основной матрицы типа А исследуемого четырехполусника, расчет характеристических, повторных и рабочих параметров четырехполусника, экспериментальная проверка на учебных стендах в лабораториях ТЛЭЦ зависимости  $b_c(\omega)$  методом холостого хода и короткого замыкания, расчет элементов эквивалентного четырехполусника.

## СОДЕРЖАНИЕ

Задание на курсовую работу .....	2
Введение.....	5
1 Синтез схем реактивных двухполюсников.....	6
2 Расчёт входных сопротивлений четырёхполюсника .....	11
2.1 Холостой ход .....	11
2.2 Короткое замыкание .....	12
3 Нахождение матрицы А исследуемого четырехполюсника .....	13
4 Расчёт параметров четырёхполюсника .....	15
4.1 Расчет характеристических параметров .....	15
4.1.1 Характеристическое сопротивление .....	15
4.1.2 Характеристическая постоянная передачи .....	15
4.2 Повторные параметры четырёхполюсника .....	18
4.3 Рабочие параметры четырёхполюсника.....	19
4.3.1 Входные сопротивления .....	19
4.3.2 Сопротивления передачи.....	19
4.3.3 Приведённые сопротивления .....	19
4.3.4 Расчет рабочих постоянных передачи .....	19
6 Расчет элементов эквивалентного ЧП.....	20
Заключение .....	27
Библиографический список.....	28

## Введение

Системы автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте представляют собой технические средства управления перевозочным процессом, способствующие повышению эффективности работы дорог и безопасности движения поездов. Новые системы автоматики, телемеханики, связи и управления основываются на последних достижениях науки и техники, все в большей степени здесь находят применение микроэлектроника и элементы вычислительной техники, составляющих ее устройств требует точных методов расчета, которые в значительной мере основываются на теории линейных электрических цепей (ТЛЭЦ).

Методы ТЛЭЦ широко применяются в инженерных расчетах элементов самых разнообразных устройств, состоящих из электронных, механических и других приборов, так как только представление разнообразных приборов эквивалентными схемами ТЛЭЦ позволяет рассматривать взаимодействие систем единым образом. Этим объясняется всевозрастающее использование методов ТЛЭЦ во всех отраслях автоматики, телемеханики и связи.

## 1 СИНТЕЗ СХЕМ РЕАКТИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ИССЛЕДУЕМОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Схема исследуемого четырехполюсника в обобщенном виде показана на рисунке 1.1.

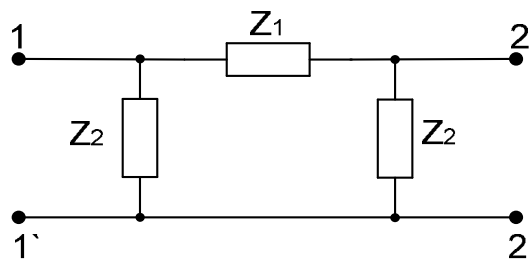


Рисунок 1.1 – Схема замещения исследуемого ЧП

Определим элементы, образующие данный четырехполюсник. Формулы операторных сопротивлений согласно заданию имеют следующий вид:

$$Z_1(p) = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot (p^2 + 10^8)}{p \cdot (p^2 + 10^9)} \quad (1.1)$$

$$Z_2(p) = \frac{10^7 \cdot p}{3 \cdot (p^2 + 10^8)} \quad (1.2)$$

Электрические цепи с двумя зажимами, состоящие из катушек индуктивности и конденсаторов, потери в которых не учитывают, называют реактивными двухполюсниками.

- Сопротивления и проводимости реактивных двухполюсников содержат только реактивные составляющие;
- Все коэффициенты при операторе  $p$  только вещественные и положительные числа;
- Высшая степень оператора  $p$  равна числу реактивных элементов в схеме;
- Высшие и низшие степени многочленов числителя и знаменателя функции  $Z(p)$  отличаются не более чем на единицу;
- Нули и полюсы функции  $Z(p)$  чередуются и расположены на положительных вещественных частотах;
- В реактивном двухполюснике формула сопротивления содержит в числителе только четные степени, а в знаменателе - только нечетные степени оператора  $p$  и наоборот, формула сопротивления в числителе содержит только нечетные степени, а в знаменателе - только четные степени оператора  $p$ ;
- Все корни функции сопротивления  $Z(p)$  расположены в левой полуплоскости комплексного переменного, кратных корней не бывает.

Двухполюсник  $Z_1(p)$  класса  $\infty - 0$  имеет резонанс тока и напряжения. Приравняв числитель (1.1) к нулю определим нули функции:

$$p_{01} = \pm j10000.$$

Приравняв знаменатель (1.1) к нулю определим полюсы функции:

$$p_{x1} = 0,$$

$$p_{x2} = \pm j31622.777.$$

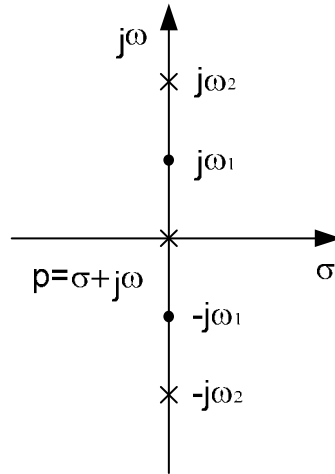


Рисунок 1.2 – Полусно-нулевое изображение  $Z_2$

Для синтеза двухполосника  $Z_1(p)$  по схемам Фостера и Кауэра запишем его общую формулу:

$$Z_1(p) = \frac{(p^2 + p_{01}^2)}{C_0 \cdot p \cdot (p^2 + p_{x2}^2)} \quad (1.3)$$

$$Z_1(j\omega) = \frac{(\omega_1^2 - \omega^2)}{C_0 \cdot j\omega \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)}$$

где  $\omega_1 = \omega_{PH} = 10000$  рад/с,  
 $\omega_2 = \omega_{PT} = 31622,777$  рад/с.

Схема синтезируемого ДП соответствует схеме Фостера и Каура 2-го рода приведенной на рисунке 1.3.

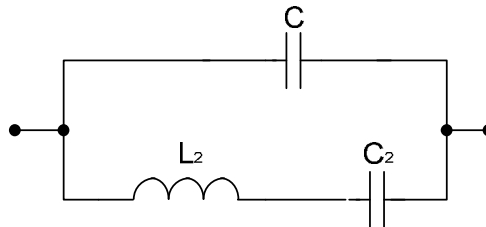


Рисунок 1.3 – Элементная схема операторного сопротивления  $Z_1(p)$  (2-го рода)  
 Сравнивая коэффициенты при  $\omega$  в (1.1) и (1.3). заключаем, что  $C_0 = 50$  нФ.

Для синтеза  $Z_1$  по схеме Фостера 2-го рода:

$$C_0 = C, \quad (1.4)$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_2 \cdot C_2}, \quad (1.5)$$

$$\omega_2^2 = \frac{C + C_2}{L_2 \cdot C \cdot C_2}. \quad (1.6)$$

$$\text{Выразим } C_2: C_2 = C \cdot \left( \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} - 1 \right) = 50 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{10^9}{10^8} - 1 \right) = 450 \text{ нФ.}$$

$$L_2 = \frac{1}{C_2 \cdot \omega_1^2} = \frac{1}{450 \cdot 10^{-9} \cdot 10^8} = 22 \text{ мГн.}$$

Операторное сопротивление  $Z_1(p)$  соответствует так же схеме Фостера и Каура 1-го рода приведенной на рисунке 1.4.

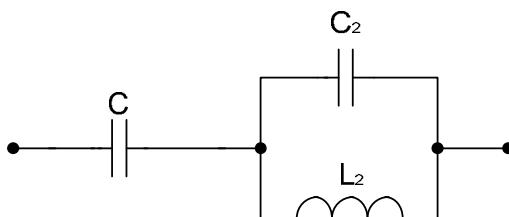


Рисунок 1.4 – Элементная схема операторного сопротивления  $Z_1(p)$  (1-го рода)

Для синтеза двухполюсника  $Z_1(p)$  по схемам Фостера и Кауэра запишем его общую формулу сопротивления:

$$Z_1(j\omega) = \frac{(C + C_2) \cdot (\omega_1^2 - \omega^2)}{j\omega \cdot C \cdot C_2 \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)}. \quad (1.7)$$

Отсюда имеем:  $C_0 = \frac{C \cdot C_2}{C + C_2}.$

Записываем условия резонанса:

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_2 \cdot (C_2 + C)}, \quad (1.8)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{L_2 \cdot C_2}. \quad (1.9)$$

Выразим  $C$ ,  $C_2$  и  $L_2$ :

$$C = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \cdot C_0 = \frac{10^9}{10^8} \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 500 \text{ нФ},$$

$$C_2 = \frac{C_0 \cdot C}{C - C_0} = \frac{50 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 10^{-9}}{500 \cdot 10^{-9} - 50 \cdot 10^{-9}} = 55.6 \text{ нФ},$$

$$L_2 = \frac{1}{C_2 \cdot \omega_2^2} = \frac{1}{55.6 \cdot 10^{-9} \cdot 10^9} = 18 \text{ мГн}.$$

Исходя из расчетов видно, что целесообразнее является схема синтезируемого ДП соответствующая схеме Фостера и Каура 2-го рода приведенной на рисунке 1.3., так как номинал элементов меньше, чем у схемы Фостера и Кауэра 1-го рода приведенной на рисунке 1.4. Дальнейшие расчеты выполняются для схемы приведенной на рисунке 1.3. Сопротивление  $Z_1(p)$  представляет собой параллельное соединение емкости номиналом 50нФ с последовательно соединенными катушкой индуктивности индуктивностью  $L_2 = 22 \text{ мГн}$  и конденсатором емкостью  $C_2 = 450 \text{ нФ}$ .

Расчет  $Z_1(p)$  на контрольной частоте  $\omega = 5000 \text{ рад/с}$ :

$$Z_1(j5000) = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot (10^8 - 5000^2)}{j5000 \cdot (10^9 - 5000^2)} = 307.692 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Двухполюсник  $Z_2(p)$  класса  $0 - 0$  имеет резонанс токов. Приравняв числитель (1.2) к нулю определим нули функции:

$$p_0 = 0.$$

Приравняв знаменатель (1.2) к нулю, определим полюсы функции:

$$p_{x1-2} = \pm j10000.$$



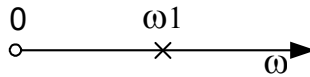


Рисунок 1.5 – Полусоносно-нулевое изображение  $Z_2(j\omega)$

Для синтеза двухполюсника  $Z_2(p)$  по схемам Фостера и Кауэра запишем его общую формулу:

$$Z_2(j\omega) = \frac{j\omega}{C_1(\omega_1^2 - \omega^2)}, \quad (1.10)$$

где  $\omega_1 = \omega_{\text{рт}} = 10000 \text{ рад/с}$ .

Схема синтезируемого ДП соответствует схеме приведенной на рисунке 1.6.

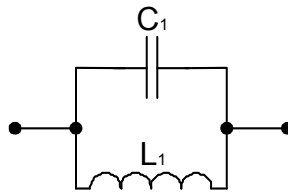


Рисунок 1.6 – Элементарная схема операторного сопротивления  $Z_2(p)$

Сравнивая коэффициенты при  $\omega$  в (1.2) и (1.10), заключаем, что  $\tilde{N}_1 = 300i \hat{O}$ .  
Записываем условия резонанса:

$$\omega_1^2 = \frac{1}{C_1 \cdot L_1}. \quad (1.11)$$

Выражая  $L_1$  из (1.11) получаем:

$$L_1 = \frac{1}{10^8 \cdot 300 \cdot 10^{-9}} = 33 \text{ мГн}.$$

Таким образом, синтезируемый ДП состоит из параллельного соединения индуктивности  $L_1 = 33 \text{ мГн}$  и емкости  $C_1 = 300 \text{ нФ}$  и соответствует схеме, приведенной на рисунке 1.6.

Расчет  $Z_2(p)$  на контрольной частоте  $\omega = 5000 \text{ рад/с}$ :

$$Z_2(p) = \frac{10^7 \cdot j5000}{3 \cdot (10^8 - 5000^2)} = 222.222 e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Частотная зависимость сопротивлений ДП приведена в таблице 1.1. Графики частотной зависимости сопротивлений ДП представлены на рисунке 1.7.

Таблица 1.1 – Частотная зависимость сопротивлений двухполюсников, входящих в состав исследуемого четырехполюсника

$\omega$ , рад/с	f, Гц	$Z_1$ , Ом	$Z_2$ , Ом
0	0	$-j\infty$	0
5000	796	-j307.692	j222.222
7000	1114	-j153.222	j457.516
9000	1432	-j45.944	j1579
<u>10000</u>	1591	0	$j\infty$
11000	1751	j43.438	-j1746
20000	3183	j500	-j222.222
30000	4775	j5333	-j125
<u>31622,777</u>	5033	$j\infty$	-j117.121
35000	5570	-j2857	-j103.704
40000	6366	-j1250	-j88.889
45000	7162	-j834.688	-j77.922
$\infty$	$\infty$	0	0

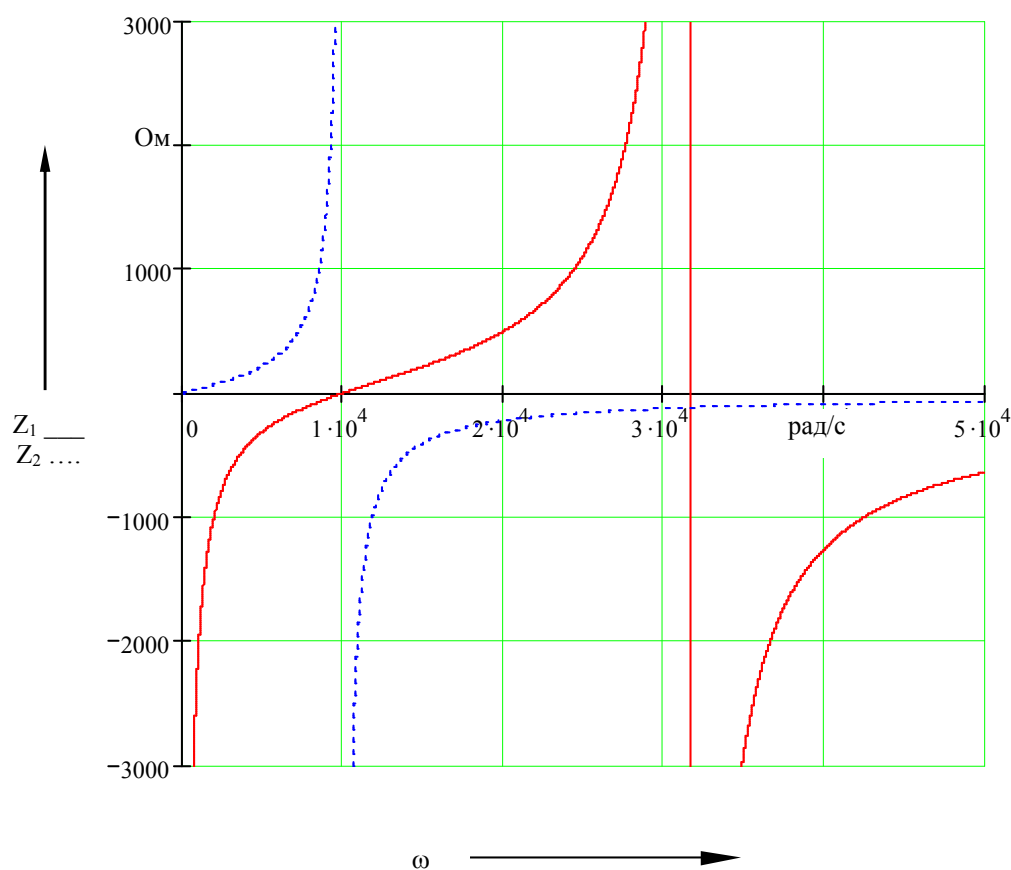


Рисунок 1.7 – График частотной зависимости  $Z_1(j\omega)$  и  $Z_2(j\omega)$ .

## 2 РАСЧЕТ ВХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Элементная схема исследуемого ЧП, после проведенных расчетов, имеет вид, представленный на рисунке 2.1.

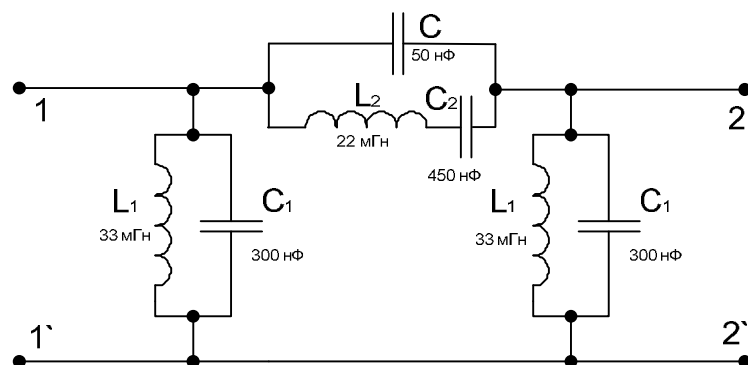


Рисунок 2.1 – Элементная схема ЧП

Так как ЧП является симметричным, то расчёт входных сопротивлений производится в одном направлении.

### 2.1 Режим холостого хода:

Произведем расчет для прямой передачи входного сопротивления при холостом ходе. Схема включения четырехполюсника для нахождения входного сопротивления представлена на рисунке 2.2.

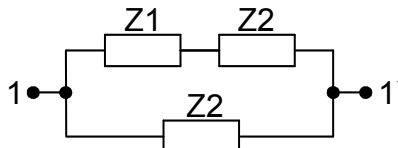


Рисунок 2.2 – Схема ЧП для нахождения  $Z_{вх}$  в режиме ХХ

$$Z^{\infty}(p) = \frac{(Z_1(p) + Z_2(p)) \cdot Z_2(p)}{2 \cdot Z_2(p) + Z_1(p)} \quad (2.1)$$

Подставляя в (2.1) сопротивления ДП (1.1) и (1.2) получили

$$Z^{\infty}(j\omega) = \frac{7 \cdot 10^7 \cdot j\omega \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{24 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (10^8 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)} \quad (2.2)$$

Приравнивая числитель и знаменатель (2.2) к нулю находим корни, которые являются нулями и полюсами сопротивления  $Z^{\infty}(j\omega)$ .

Нули:  $\omega_1 = 0$  рад/с,  $\omega_3 = 5492.722$  рад/с,  $\omega_5 = 16855.266$  рад/с.

Полюсы:  $\omega_2 = 4440.721$  рад/с,  $\omega_4 = 10000$  рад/с,  $\omega_6 = 19501.282$  рад/с.

Это ДП класса 0 – 0.

Расчет  $Z^{\infty}(j\omega)$  на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с :

$$Z^{\infty}(j5000) = \frac{7 \cdot 10^7 \cdot j5000 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - 5000^2)}{24 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (10^8 - 5000^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - 5000^2)} = -j138.889 \text{ Ом.}$$

Значения сопротивления  $Z^{\infty}(j\omega)$  приведены в таблице 2.1.

## 2.2 Режим короткого замыкания:

Произведем расчет для прямой передачи входного сопротивления при КЗ. Схема включения четырехполюсника для нахождения входного сопротивления представлена на рисунке 2.3.

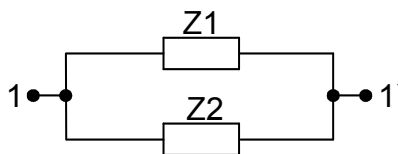


Рисунок 2.3 – Схема ЧП для нахождения  $Z_{вх}$  в режиме КЗ

$$Z^0(p) = \frac{Z_1(p) \cdot Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)} \quad (2.3)$$

Подставляя в (2.3) сопротивления ДП (1.1) и (1.2) получим

$$Z^0(j\omega) = \frac{j\omega \cdot 2 \cdot 10^7 \cdot (10^8 - \omega^2)}{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)} \quad (2.4)$$

Приравнявая числитель и знаменатель (2.4) к нулю находим корни, которые являются нулями и полюсами сопротивления  $Z^0(j\omega)$ .

Нули:  $\omega = 0$ ,  $\omega_2 = 10000$  рад/с.

Полюсы:  $\omega_1 = 5492.722$  рад/с,  $\omega_3 = 16855.226$  рад/с.

Это ДП класса  $0-0$ .

Расчет  $Z^0(j\omega)$  на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с :

$$Z^0(j5000) = \frac{j5000 \cdot 2 \cdot 10^7 \cdot (10^8 - 5000^2)}{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - 5000^2)} = j800 \text{ Ом.}$$

Значения сопротивления  $Z^0(j\omega)$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Частотная зависимость входных сопротивлений при ХХ и КЗ на выходе

$\omega$ , рад/с	f, Гц	$Z^\infty$ , Ом	$Z^0$ , Ом
0	0	0	0
1000	159	j34.262	j34.252
3000	477	j140.665	j133.932
<u>4440,720</u>	707	$j\infty$	j368.702
4500	716	-j2268	j391.776
4800	764	-j285.669	j567.103
5000	796	-j138.889	j800
<u>5492,722</u>	874	0	$j\infty$
6000	955	j70.597	-j758.294
8000	1273	j344.663	-j110.497
9000	1432	j777.818	-j47.321
<u>10000</u>	1591	$j\infty$	0
12000	1910	-j432.069	j94.583
14000	2228	-j191.338	j262.787
15000	2387	-j126.324	j465.116
<u>16855,266</u>	2683	0	$j\infty$
17000	2706	j13.49	-j7263
18000	2865	j160.395	-j983.031

Продолжение таблицы 2.1

$\omega$ , рад/с	$f$ , Гц	$Z^\infty$ , Ом	$Z^0$ , Ом
19000	3024	$j820.874$	$-j557.044$
<u>19501,282</u>	3104	$j\infty$	$-j463.756$
20000	3183	$-j1111$	$-j400$
25000	3979	$-j190.125$	$-j184.941$
30000	4775	$-j128.074$	$-j128$
$\infty$	$\infty$	0	0

Графики частотной зависимости входных сопротивлений исследуемого ЧП в режимах ХХ и КЗ приведены на рисунке 2.6

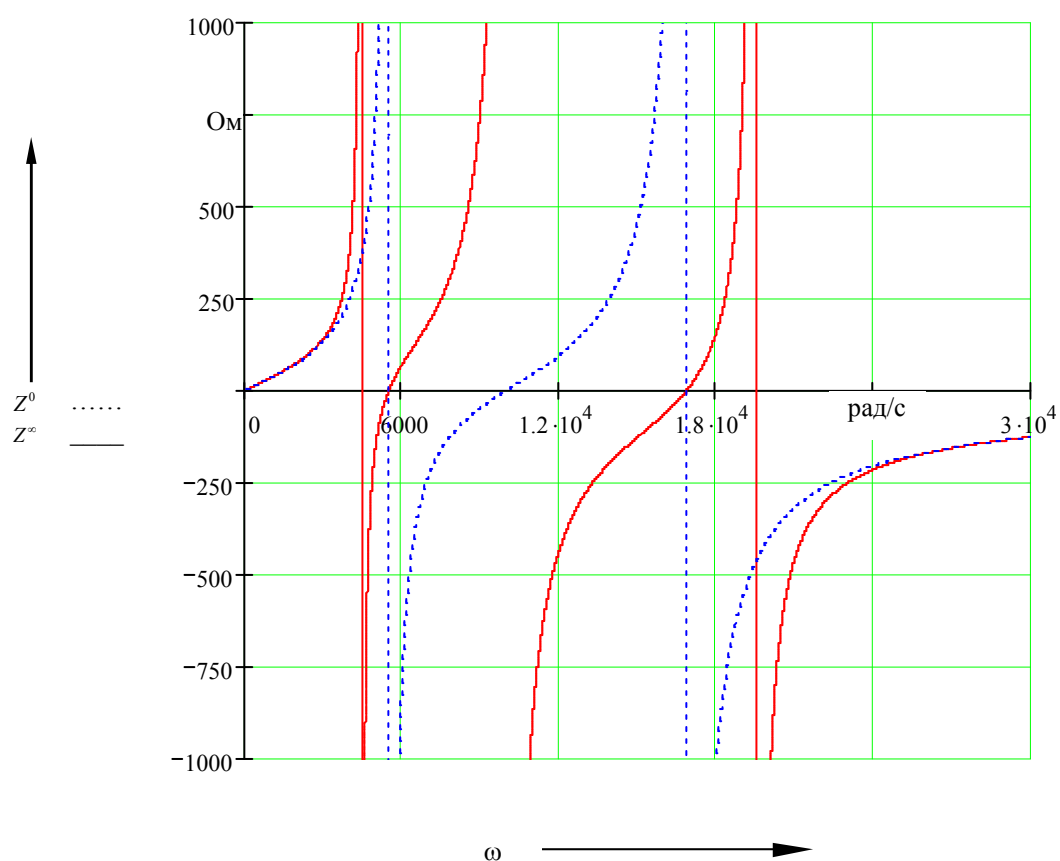


Рисунок 2.6 – График частотной зависимости  $Z^\infty(j\omega)$  и  $Z^0(j\omega)$ .

### 3 НАХОЖДЕНИЕ ОСНОВНОЙ МАТРИЦЫ ТИПА А ИССЛЕДУЕМОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Матрица А имеет вид:

$$(A) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 \\ \frac{2}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_2^2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Подставляем значения сопротивлений ДП в матрицу А получим:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)} \\ A_{12} &= \frac{2 \cdot 10^7 \cdot (10^8 - \omega^2)}{j\omega \cdot (10^9 - \omega^2)} \\ A_{21} &= \frac{24 \cdot 10^{-7} \cdot (10^8 - \omega^2) \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-j\omega^3 \cdot (10^9 - \omega^2)} \\ A_{22} &= \frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Проверим правильность расчёта А-матрицы по формуле:

$$|A| = A_{11} \cdot A_{22} - A_{12} \cdot A_{21} = 1. \quad (3.3)$$

$$|A| = \frac{49 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2)^2 \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)^2}{\omega^4 \cdot (10^9 - \omega^2)^2} - \frac{48 \cdot (10^8 - \omega^2)^2 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)}{\omega^4 \cdot (10^9 - \omega^2)^2} = 1$$

Следовательно, формулы (3.2) верны.

Рассчитаем коэффициенты А на контрольной частоте  $\omega = 5000 \text{ рад/с}$ .

$$\begin{aligned} A_{11} &= -0.385 \\ A_{12} &= -j307.692 \text{ Ом} \\ A_{21} &= -j0.002768 \text{ См} \\ A_{22} &= -0.385 \end{aligned}$$

$$|A| = -0.385 \cdot (-0.385) - (-j307.692) \cdot (-j0.002768) = 1$$

Определитель матрицы А равен 1, что свидетельствует о пассивности ЧП.

Матрица А примет окончательный вид:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)} & \frac{2 \cdot 10^7 \cdot (10^8 - \omega^2)}{j\omega \cdot (10^9 - \omega^2)} \\ \frac{24 \cdot 10^{-7} \cdot (10^8 - \omega^2) \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-j\omega^3 \cdot (10^9 - \omega^2)} & \frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)} \end{pmatrix}$$

Данная матрица используется для расчета эквивалентного четырехполюсника и расчета его параметров.

## 4 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ, ПОВТОРНЫХ И РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

### 4.1 Характеристические параметры

При исследовании работы четырехполюсника в качестве различных устройств автоматики, телемеханики и связи удобно пользоваться характеристическими параметрами. К характеристическим параметрам относятся: характеристические сопротивления и характеристическая постоянная передачи.

#### 4.1.1 Характеристические сопротивления ( $Z_{C1}, Z_{C2}$ )

Характеристическое сопротивление – это такое сопротивление, при подключении которого в качестве нагрузки входное сопротивление четырехполюсника становится равным соответственно характеристическому сопротивлению.

Так как ЧП симметричный, то  $Z_{C1} = Z_{C2}$ .

Выразим характеристическое сопротивление  $Z_C$  через сопротивления ХХ и КЗ:

$$Z_C = \sqrt{Z_{XX} \cdot Z_{KЗ}}. \quad (4.1)$$

Подставив в (4.1) выражения для сопротивлений ХХ (2.2) и КЗ (2.4) получим:

$$Z_C = \frac{10^7 \cdot j\omega}{\sqrt{12 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)}}. \quad (4.2)$$

Произведём расчёт  $Z_C$  на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с:

$$Z_C = \frac{10^7 \cdot j5000}{\sqrt{12 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - 5000^2)}} = 333.333 \text{ Ом}.$$

Частотная зависимость характеристического сопротивления приведена в таблице 4.1. График частотной зависимости  $Z_C$  приведен на рисунке 4.1.

#### 4.1.2 Характеристическая постоянная передачи ( $g_C$ )

Характеристическая постоянная передачи оценивает потери мощности в ЧП, не зависит от направления передачи энергии через ЧП:

$$g_c = \ln \left( \sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}} \right), \quad (4.3)$$

где  $g_c = a_c + jb_c$  - комплексная величина.

Вещественной частью  $g_c$  является постоянная затухания  $a_c [\text{Hn}]$ , которая показывает степень потери мощности в ЧП или степень уменьшения амплитуды тока (напряжения) на выходе четырехполюсника по сравнению с этими величинами на входе:

$$a_c = \ln \left| \sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}} \right|. \quad (4.4)$$

Мнимой частью  $g_c$  является фазовая постоянная  $b_c$  [град], которая показывает смещение по фазе между токами и напряжениями на входе и выходе четырехполюсника:

$$b_c = \arg\left(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}}\right). \quad (4.5)$$

Подставив в (4.3) выражения А-параметров получим следующее выражение для постоянной передачи:

$$g_c = \ln\left(\frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - \omega^2)}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)} + \frac{4 \cdot (10^8 - \omega^2) \sqrt{3 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - \omega^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - \omega^2)}}{-\omega^2 \cdot (10^9 - \omega^2)}\right).$$

Рассчитаем постоянную передачи на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с:

$$g_c = \ln\left(\frac{7 \cdot (3.017 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (2.841 \cdot 10^8 - 5000^2)}{-5000^2 \cdot (10^9 - 5000^2)} + \frac{4 \cdot (10^8 - 5000^2) \sqrt{3 \cdot (1.972 \cdot 10^7 - 5000^2) \cdot (3.803 \cdot 10^8 - 5000^2)}}{-5000^2 \cdot (10^9 - 5000^2)}\right) = j1.966 \text{ Нп}.$$

Частотная зависимость  $g_c$  приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Частотная зависимость  $Z_c(\omega)$ ,  $a_c(\omega)$  и  $b_c(\omega)$

$\omega$ рад/с	f Гц	$Z_c(\omega)$ Ом	$a_c$ Нп	$b_c$ град
0	0	0	$\infty$	180
1000	159	j34.257	4.751	180
3000	477	j137.257	2.201	180
<u>4440,720</u>	707	j $\infty$	0	180
4500	716	942.576	0	157.43
5000	796	333.333	0	112.62
<u>5492,722</u>	874	262.174	0	90
6000	955	231.372	0	73.032
9000	1432	191.851	0	13.856
<u>10000</u>	1591	192.45	0	0
12000	1910	202.154	0	25.074
15000	2387	242.536	0	62.46
<u>16855,266</u>	2683	305.138	0	90
17000	2706	313.023	0	92.468
19000	3024	676.212	0	140.519
<u>19501,282</u>	3104	$\infty$	0	180
20000	3183	-j666.667	0.693	180
30000	4775	-j128.037	4.423	180
<u>31622,777</u>	5033	-j117.121	$\infty$	0
35000	5570	-j100.133	4.045	0
40000	6366	-j83.171	3.404	0
$\infty$	$\infty$	0	2.634	0



Графики частотной зависимости собственного затухания  $a_c$  и фазовой постоянной  $b_c$  представлены на рисунке 4.2 и 4.3.

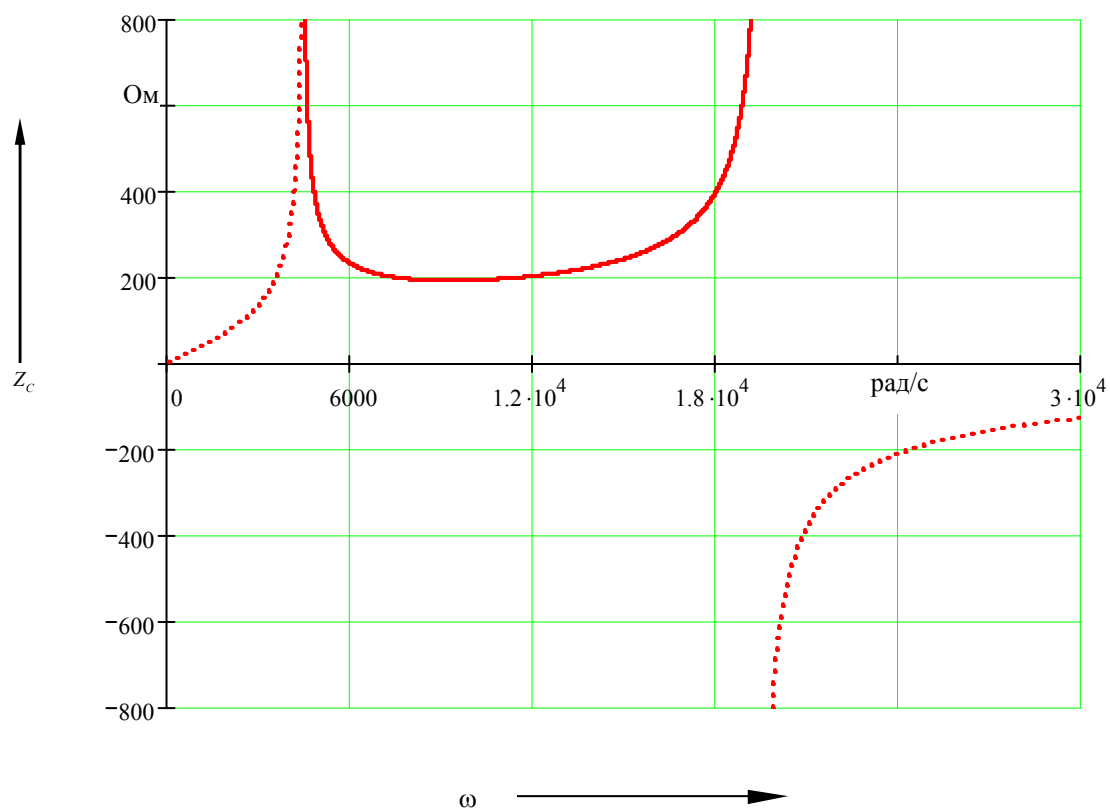


Рисунок 4.1 – График частотной зависимости  $Z_c$ .

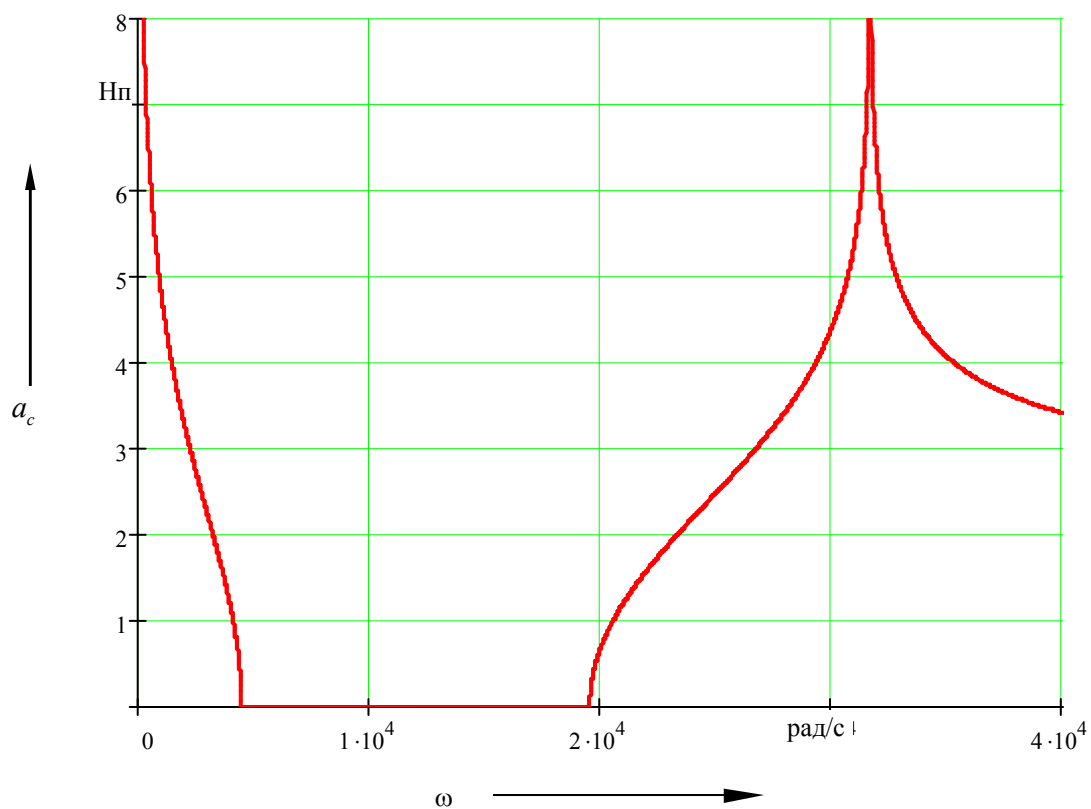


Рисунок 4.2 – График частотной зависимости собственного затухания  $a_c$

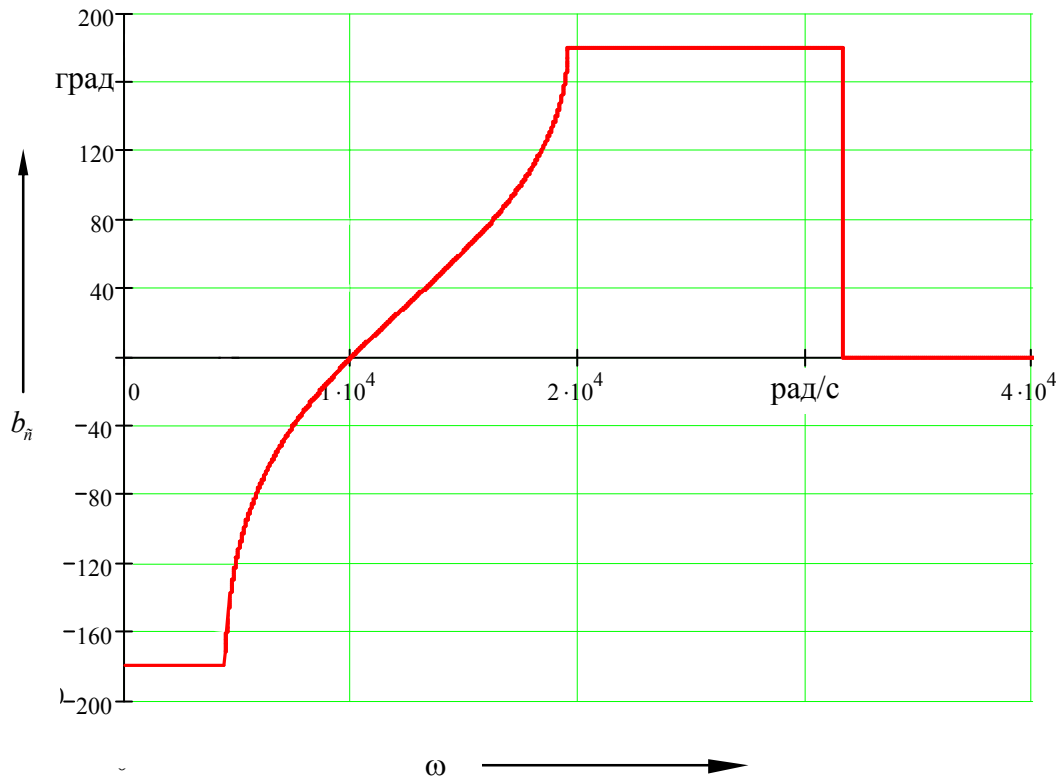


Рисунок 4.3 – График частотной зависимости фазовой постоянной  $b_c$

#### 4.2 Повторные параметры четырехполюсника

Повторным сопротивлением называется такое сопротивление когда, при подключении которого к качестве нагрузки входное сопротивление четырехполюсника становится равным нагрузочному.

$$Z_{повт} = \frac{A_{11} - A_{22} + \sqrt{(A_{11} + A_{22})^2 - 4}}{2 \cdot A_{21}} \quad (4.7)$$

Повторная постоянная передачи  $g_{\Pi}$  - характеризует соотношения между входными и выходными токами, напряжениями и мощностями в режиме, при котором ЧП нагружен на соответствующее выбранному направлению передачи повторное сопротивление:

$$g_{\Pi} = \ln \left( \frac{A_{11} + A_{22}}{2} + \sqrt{\frac{(A_{11} + A_{22})^2}{4} - 1} \right) \quad (4.8)$$

Подставим в выражения (4.7) и (4.8) значения А-параметров, рассмотренных на частоте  $\omega=5000$  рад/с, получим следующие значения повторных сопротивлений и постоянной передачи:

$$Z_{повт} = \frac{-0.385 + 0.385 + \sqrt{(-0.385 - 0.385)^2 - 4}}{-2 \cdot j0.002768} = 333.333 \text{ Ом};$$

$$g_{\Pi} = \ln \left( \frac{-0.385 - 0.385}{2} + \sqrt{\frac{(-0.385 - 0.385)^2}{4} - 1} \right) = j1.966 .$$

## 4.3 Рабочие параметры четырехполюсника

### 4.3.1 Расчет входных сопротивлений

Входным сопротивлением четырехполюсника называется то полное сопротивление четырехполюсника переменному току, которое может быть измерено со стороны его входных зажимов при условии замыкания его выходных зажимов на заранее заданное сопротивление.

$$Z_{\text{вх1}} = \frac{A_{11}Z_H + A_{12}}{A_{21}Z_H + A_{22}}; \quad (4.9)$$

$$Z_{\text{вх2}} = Z_{\text{вх1}}; \quad (4.10)$$

где  $Z_H$  - сопротивление нагрузки четырехполюсника.

Произведем расчет на контрольной частоте. Подставим в выражение (4.9) и (4.10) значения А-параметров, рассчитанных на частоте  $\omega = 5000$  рад/с:

$$Z_{\text{вх1}} = \frac{-0.385 \cdot 180 - j307.692}{-j0.002768 \cdot 180 - 0.385} = 453.971 + j211.703 \text{ Ом.}$$

### 4.3.2 Расчет сопротивлений передачи

Сопротивление передачи – это отношение входного напряжения к выходному току.

$$\begin{aligned} Z_{\text{пер1}} &= A_{11}Z_H + A_{12} \\ Z_{\text{пер2}} &= Z_{\text{пер1}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Произведем расчет на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с

$$Z_{\text{пер1}} = -0.385 \cdot 180 - j307.692 = -69.3 - j307.692 \text{ Ом.}$$

В ряде случаев при определении условий передачи энергии от входа к выходу четырехполюсника требуется учитывать  $Z_\Gamma$ . Тогда используют приведенное сопротивление четырехполюсника.

### 4.3.3 Расчет приведенных сопротивлений

Приведенное сопротивление четырехполюсника – это отношение ЭДС генератора к току в нагрузке:

$$Z_{\text{прив1}} = A_{11}Z_H + A_{12} + Z_\Gamma(A_{21}Z_H + A_{22}); \quad (4.12)$$

$$Z_{\text{прив2}} = Z_{\text{прив1}}. \quad (4.13)$$

Подставив значения А – параметров на частоте  $\omega = 5000$  рад/с в выражение (4.12), то получим следующее численное значение приведенного сопротивления:

$$Z_{\text{прив1}} = -0.385 \cdot 180 - j307.692 + 135 \cdot (-j0.002768 \cdot 180 - 0.385) = -121.275 - j374.954 \text{ Ом.}$$

### 4.3.4 Расчет рабочих постоянных передачи

Для характеристики условий передачи мощности сигнала через ЧП используют логарифмическую меру рабочего коэффициента передачи по мощности четырехполюсника – рабочую постоянную передачи.

При прямом направлении передачи сигнала рабочая постоянная передачи будет вычисляться по следующей формуле:

$$g_{p1} = \ln \frac{Z_{\text{прив1}}}{2\sqrt{Z_H Z_\Gamma}}; \quad (4.14)$$

$$g_{p2} = g_{p1} \cdot \quad (4.15)$$

Произведем расчет рабочей постоянной передачи при прямом направлении передачи сигнала по формуле (4.14) на контрольной частоте  $\omega = 5000$  рад/с:

$$g_{p1}(5000) = \ln \frac{-121.275 - j374.954}{2 \cdot \sqrt{180 \cdot 135}} = 0.234 - j1.884.$$

Вносимая постоянная передачи при прямом направлении передачи

$$g_{вн1} = g_{p1} - \ln \frac{Z_H + Z_\Gamma}{2\sqrt{Z_H Z_\Gamma}}; \quad (4.16)$$

$$g_{вн2} = g_{вн1} \cdot \quad (4.17)$$

Подставляя в (4.16) значения рабочей постоянной передачи, найденной по (4.14) получаем:

$$g_{вн1} = 0.234 - j1.884 - \ln \frac{180 + 135}{2 \cdot \sqrt{180 \cdot 135}} = 0.224 - j1.884.$$

## 6 РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ЧП

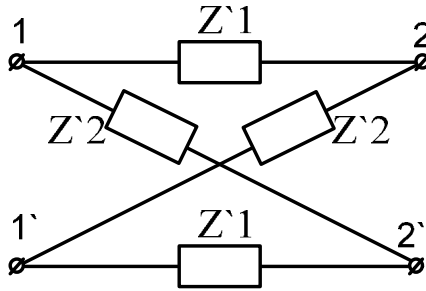


Рисунок 6.6 – Схема замещения эквивалентного ЧП

Для того чтобы найти сопротивления эквивалентного ЧП, а затем и параметры элементов двухполюсников  $Z'_1$  и  $Z'_2$ , необходимо записать А – параметры ЧП, затем приравнять соответствующие А – параметры, к примеру,  $A_{11}$  П – образного ЧП приравнять к  $A_{11}$  мостового ЧП.

Основная матрица эквивалентного четырехполюсника имеет вид (см. рисунок 6.6):

$$(A^M) = \begin{pmatrix} A_{11}^M & A_{12}^M \\ A_{21}^M & A_{22}^M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Z'_1(p) + Z'_2(p)}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} & \frac{2 \cdot Z'_1(p) \cdot Z'_2(p)}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} \\ \frac{2}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} & \frac{Z'_1(p) + Z'_2(p)}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Найдем коэффициенты  $A^M$  матрицы:

$$A_{11}^M = \frac{Z'_1(p) + Z'_2(p)}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} = A_{11}^П = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}, \quad (6.8)$$

$$A_{12}^M = \frac{2 \cdot Z'_1(p) \cdot Z'_2(p)}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} = A_{12}^П = Z_1, \quad (6.9)$$

$$A_{21}^M = \frac{2}{Z'_2(p) - Z'_1(p)} = A_{21}^П = \frac{2}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_2^2}, \quad (6.10)$$

$$A_{22}^m = \frac{Z_1'(p) + Z_2'(p)}{Z_2'(p) - Z_1'(p)} = A_{22}^n = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (6.11)$$

Приравняем А – параметры П – образного ЧП к А – параметрам мостового, тогда получим следующие уравнение (достаточно приравнять параметры  $A_{11}$  и  $A_{21}$ ):

$$\begin{cases} \frac{Z_1'(p) + Z_2'(p)}{Z_2'(p) - Z_1'(p)} = A_{11}; \\ \frac{2}{Z_2'(p) - Z_1'(p)} = A_{21}. \end{cases}$$

Выполним преобразования и подстановку, и получим следующие выражения :

$$\begin{cases} Z_1'(p) = \frac{2Z_1(p) \cdot Z_2(p)}{2Z_2(p) + Z_1(p)} \\ Z_2'(p) = \frac{2 \cdot Z_2(p)(Z_2(p) + Z_1(p))}{2 \cdot Z_2(p) + Z_1(p)}. \end{cases}$$

Найдем сопротивления симметричного мостового ЧП:

$$\begin{cases} Z_1'(p) = \frac{10^7 p(p^2 + 10^8)}{2(p^2 + 1.972 \cdot 10^7) \cdot (p^2 + 3.803 \cdot 10^8)}; \\ Z_2'(p) = \frac{7 \cdot 10^7 p(p^2 + 3.017 \cdot 10^7) \cdot (p^2 + 2.841 \cdot 10^8)}{12(p^2 + 1.972 \cdot 10^7) \cdot (p^2 + 10^8) \cdot (p^2 + 3.803 \cdot 10^8)}. \end{cases}$$

Схемы полученных ДП изобразим на рисунке 6.7.

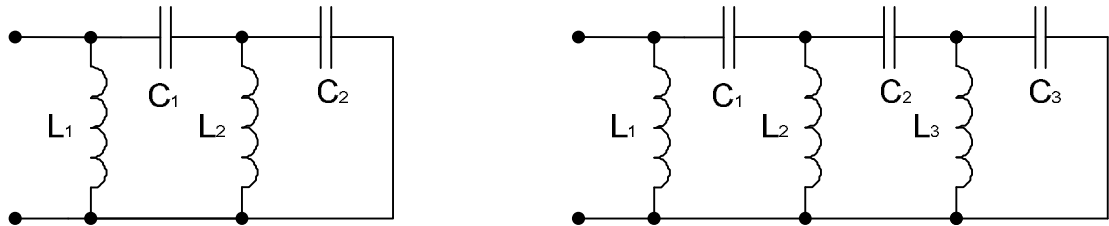


Рисунок 6.7 – Схемы полученных ДП

Произведем расчет элементов мостового ЧП.

Элементы ДП рассчитываются разложением в непрерывную дробь функций  $Y(p)$  по восходящей степени оператора  $p$ :

Определим элементы первого двухполюсника для схемы Кауэра 2-го рода.

$$\begin{array}{l} \frac{7.5 \cdot 10^{15} + 4 \cdot 10^8 \cdot p^2 + p^4}{7.5 \cdot 10^{15} + 7.5 \cdot 10^7 \cdot p^2} \left| \frac{5 \cdot 10^{14} \cdot p + 5 \cdot 10^6 \cdot p^3}{15 / p \rightarrow 1/(pL_1)} \right. \\ \frac{5 \cdot 10^{14} \cdot p + 5 \cdot 10^6 \cdot p^3}{5 \cdot 10^{14} \cdot p + 1.538 \cdot 10^6 \cdot p^3} \left| \frac{3.25 \cdot 10^8 \cdot p^2 + p^4}{1.538 \cdot 10^6} \rightarrow \frac{1}{pC_1} \right. \\ \frac{3.25 \cdot 10^8 \cdot p^2 + p^4}{3.25 \cdot 10^8 \cdot p^2} \left| \frac{3.462 \cdot 10^6 \cdot p^3}{93.876 / p \rightarrow 1/(pL_2)} \right. \\ \frac{3.462 \cdot 10^6 \cdot p^3}{3.462 \cdot 10^6 \cdot p^3} \left| \frac{p^4}{3.462 \cdot 10^6} \rightarrow \frac{1}{pC_2} \right. \\ 0 \end{array}$$

Определим элементы второго двухполюсника для схемы Кауэра 2-го рода.

$$\begin{array}{l|l} \frac{9 \cdot 10^{24} + 5.207 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 6 \cdot 10^9 \cdot p^4 + 12 \cdot p^6}{9 \cdot 10^{24} + 3.3 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 1.05 \cdot 10^9 \cdot p^4} & \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot p + 2.2 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 7 \cdot 10^7 \cdot p^5}{15 / p \rightarrow 1 / (pL_1)} \\ \hline \frac{\frac{6 \cdot 10^{23} \cdot p + 2.2 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 7 \cdot 10^7 \cdot p^5}{6 \cdot 10^{23} \cdot p + 1.236 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 3 \cdot 10^7 \cdot p^5}}{0.964 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 4 \cdot 10^7 \cdot p^5} & \frac{2.4 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 4.95 \cdot 10^9 \cdot p^4 + 12 \cdot p^6}{2.497 \cdot 10^6} \rightarrow \frac{1}{pC_1} \end{array}$$

$$\begin{array}{l|l} \frac{2.4 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 4.95 \cdot 10^9 \cdot p^4 + 12 \cdot p^6}{2.4 \cdot 10^{17} \cdot p^2 + 9.981 \cdot 10^8 \cdot p^4} & \frac{0.964 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 4 \cdot 10^7 \cdot p^5}{24.927 / p \rightarrow 1 / (pL_2)} \\ \hline \frac{\frac{0.964 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 4 \cdot 10^7 \cdot p^5}{0.964 \cdot 10^{16} \cdot p^3 + 2.9 \cdot 10^8 \cdot p^5}}{-2.5 \cdot 10^8 \cdot p^5} & \frac{3.952 \cdot 10^8 \cdot p^4 + 12 \cdot p^6}{2.439 \cdot 10^7} \rightarrow \frac{1}{pC_2} \end{array}$$

Т.к. при разложении получился отрицательный остаток, следовательно данная схема нереализуема.

## Заключение

В процессе выполнения данного курсового проекта мы ознакомились с основными разделами курса ТЛЭЦ, а так же давали обоснования основным выкладкам и формулам, производили анализ и синтез схем реактивных двухполюсников, входящих в состав исследуемого четырехполюсника. Рассчитали рабочие и повторные параметры четырехполюсника, а так же элементы эквивалентного четырехполюсника.

Таким образом, можно однозначно утверждать, что задача анализа состоит в качественной и количественной оценках свойств заданной электрической цепи, а задача синтеза – в построении цепи с заданными свойствами.

Изучение курса ТЛЭЦ основывается на знаниях курсов физики, математики, электронных и полупроводниковых приборах и др. специально-технических курсов ТЛЭЦ является базой для дальнейшего формирования профессиональных знаний.

## Список использованной литературы

1. Карпова Л. А. и др. Исследование и расчет характеристик двухполюсников и четырехполюсников: Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория линейных электрических цепей» / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.— Омск, 1991.— 42 с.
2. Карпова Л. А., Черноусова В. С. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Методические указания к лабораторным работам / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.— Омск, 1983.— 40 с.
3. Хьюлсман Л. П. Теория и расчет активных RC-цепей.— М.: Связь, 1973. — 240 с.
4. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей: Учебник для вузов.— М.: Радио и связь, 1986.—544 с.
5. Головин О. В., Кубицкий А. А. Электронные усилители: Учебник для техникумов связи.— М.: Радио и связь, 1983.— 320 с.
6. Стандарт предприятия. Курсовой и дипломный проекты. Требования к оформлению. СТП ОМИИТ-02-90.— Омск: ОМИИТ, 1990.