

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Н.С. Легостаев, Р.Ю. Куркин

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Томск 2026

УДК [621.374+621.38](075.8)
ББК 32.85я73
Л387

Рецензент:

Коцубинский В.П., доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа, кандидат технических наук

Легостаев Н. С., Куркин Р. Ю.

Л 387 Методы исследования электронных цепей : методические указания по выполнению лабораторных работ / Н. С. Легостаев, Р. Ю. Куркин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 63 с.

Методические указания содержат описание четырех лабораторных работ, образующих экспериментальный минимум, формирующий специалиста высшей квалификации в области электронной техники.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям.

Одобрено на заседании кафедры ПрЭ, протокол № 5 от 3 февраля 2026 г.

УДК [621.374+621.38](075.8)
ББК 32.85я73

© Легостаев Н. С.,
Куркин Р. Ю., 2026
© Томск. гос. ун-т систем. упр.
и радиоэлектроники, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ И ОТЧЕТНОСТЬ	6
2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ В УЗЛОВЫМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ	7
2.1 Содержание лабораторной работы	7
2.2 Пример выполнения лабораторной работы № 1. Исследование фильтра нижних частот методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом координатном базисе	7
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ КООРДИНАТНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ КООРДИНАТ В СОКРАЩЕННОМ ГИБРИДНОМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ	14
3.1 Содержание лабораторной работы	14
3.2 Пример выполнения лабораторной работы № 2. Исследование фильтра нижних частот методом эквивалентных схем на основе координатных уравнений для координат в сокращенном гибридном координатном базисе	15
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ СИГНАЛЬНОГО U-ГРАФА МЭЗОНА	31
4.1 Содержание лабораторной работы	31
4.2 Пример выполнения лабораторной работы № 3. Исследование фильтра нижних частот методом сигнального U-графа Мэзона	32
5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ В КОНТУРНОМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ	42

5.1 Содержание лабораторной работы	42
5.2 Пример выполнения лабораторной работы № 4. Исследование фильтра нижних частот методом эквивалентных схем в матричной форме в контурном координатном базисе	42
ЛИТЕРАТУРА	49
ПРИЛОЖЕНИЕ	50

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы являются одним из основных видов учебных занятий в вузе и играют важную роль в системе профессиональной подготовки по техническим специальностям, формируя способность к активной самостоятельной деятельности.

Отчет по лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально на листах формата А4 в рукописном или машинном варианте исполнения.

Лабораторная работа выполняется в два этапа. Первый этап предполагает подготовку вне лаборатории, а два последующих – в лаборатории.

Защита лабораторной работы осуществляется либо сразу же после завершения экспериментальных исследований и оформления в черновом виде результатов исследований в одном экземпляре на подгруппу, либо на следующем занятии.

1 Порядок выполнения лабораторной работы и отчетность

На первом этапе выполнения лабораторной работы необходимо изучить порядок выполнения работы и теоретический материал, приготовить эквивалентные схемы замещения по переменному току, математические модели активных электронных компонентов и другой максимально возможный материал, необходимый для выполнения лабораторной работы.

На втором этапе необходимо сформировать схему замещения электронной цепи по переменному току для полного диапазона частот, математическую модель электронной цепи, определить основные выражения схемных функции, рассчитать и построить семейства частотных характеристик основных схемных функций, произвести анализ полученных результатов.

Продолжительность каждой лабораторной работы – 4 часа. Работа выполняется группой из двух обучающихся, а по желанию – индивидуально.

Полученные данные вычислительного эксперимента оцениваются и сравниваются с теоретическими положениями, обрабатываются, обобщаются и представляются в виде отчета. Отчет сдается на первом после выполнения лабораторной работы практическом либо лабораторном занятии. Максимальный рейтинг лабораторной работы – 10 баллов.

Отчет должен содержать:

- титульный лист, на котором указывается название лабораторной работы, дата выполнения, номер студенческой группы, фамилии исполнителей;
- цель и программу работы, исходную схему, эквивалентную схему, математические модели и другой материал, необходимый и достаточный для выполнения лабораторной работы;
- краткие выводы по результатам вычислительного эксперимента.

Отчет составляется в соответствии с требованиями ЕСКД (Единая система конструкторской документации).

2 Лабораторная работа №1. Анализ электронной цепи непрерывного действия методом эквивалентных схем в матричной форме в однородном координатном базисе

2.1 Содержание лабораторной работы

Цель работы. Расчет и анализ линейной электронной схемы непрерывного действия в частотной области.

Программа работы.

1. Получить номер варианта лабораторной работы.
2. Провести параметрический синтез схемы.
3. Сформировать схему замещения по переменному току для полного диапазона частот.
4. Сформировать математическую модель электронной схемы методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом координатном базисе.
5. Определить выражения основных схемных функций.
6. Рассчитать и построить семейства частотных характеристик основных схемных функций.
7. Исследовать влияние на частотные характеристики варьируемых параметров электронной схемы.
8. Оформить отчет о проделанной работе. Сформулировать выводы по каждому из пунктов 2 – 7.

2.2 Пример выполнения лабораторной работы №1. Анализ фильтра нижних частот на операционном усилителе методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом координатном базисе

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: параметрический синтез и анализ фильтра нижних частот на операционном усилителе.

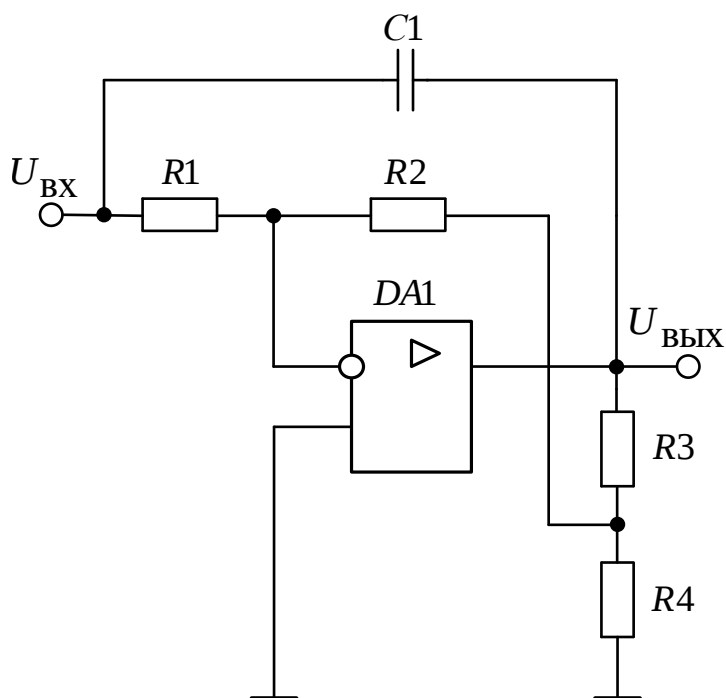


Рисунок 2.1 – Схема фильтра нижних частот на операционном усилителе

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ ДЛЯ ПОЛНОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Схема замещения фильтра нижних частот по переменному току в полном диапазоне частот, предназначенная для анализа методом эквивалентных схем в узловом координатном базисе, представлена на рисунке 2.2.

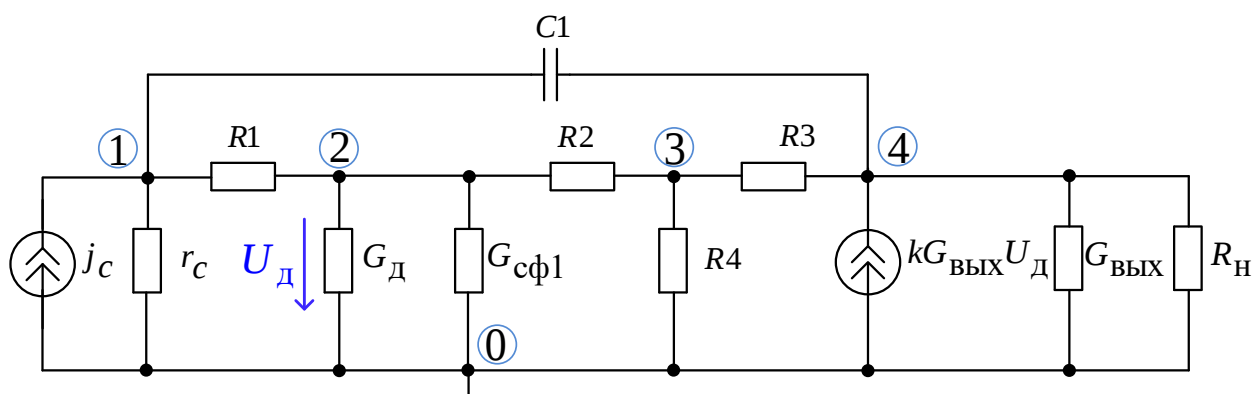


Рисунок 2.2 – Схема замещения фильтра нижних частот в полном диапазоне частот

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ В УЗЛОВОМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ

Укороченная матрица проводимостей фильтра нижних частот:

$$Y(p, C1, R2) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} pC1 + \frac{1}{R1} & -\frac{1}{R1} & 0 & -pC1 \\ -\frac{1}{R1} & \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}} & -\frac{1}{R2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} & -\frac{1}{R3} \\ -pC1 & kG_{\text{вых}} & -\frac{1}{R3} & \frac{1}{R3} + G_{\text{вых}} + pC1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Определение выражений для схемных функций по матрице проводимостей предполагает применение выражений, содержащих алгебраические дополнения матрицы, тип которых зависит от номеров входных (a и c) и выходных (b и d) узлов.

В схеме рисунок 2.1 источник тока подключен к узлу 1 относительно базисного узла, поэтому $a = 1$, $c = 0$. Ветвь нагрузки подключена между узлом 4 и базисным узлом, поэтому $b = 4$, $d = 0$.

$$\text{--коэффициент передачи напряжения } K_u = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + y_{\text{н}} \Delta_{aa,bb}} = \frac{\Delta_{14}}{\Delta_{11} + y_{\text{н}} \Delta_{11,44}}$$

где, Δ_{aa}, Δ_{bb} – простые симметричные алгебраические дополнения;

Δ – определитель укороченной матрицы проводимостей $Y^*(p, C1, R2)$;

$y_{\text{н}}$ – проводимость нагрузки;

$\Delta_{aa,bb}$ – двойное алгебраическое дополнение;

Δ_{ab} – простое несимметричное алгебраическое дополнение.

Подматрицы, необходимые для нахождения алгебраических дополнений:

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{ccc}
& 2 & 3 & 4 \\
2 & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}} & -\frac{1}{R_2} & 0 \\
3 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_3} \\
4 & kG_{\text{вых}} & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + G_{\text{вых}} + pC_1
\end{array} \\
Y_{11}(p, C_1, R_2) = \\
\begin{array}{ccc}
& 1 & 2 & 3 \\
2 & -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}} & -\frac{1}{R_2} \\
3 & 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \\
4 & -pC_1 & kG_{\text{вых}} & -\frac{1}{R_3}
\end{array} \\
Y_{14}(p, C_1, R_2) = \\
\begin{array}{cc}
& 2 & 3 \\
2 & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}} & -\frac{1}{R_2} \\
3 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}
\end{array} \\
Y_{1144}(p, C_1, R_2) =
\end{array}$$

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Схемная функция для расчета коэффициента передачи напряжения

$$K_u(p, C_1, R_2) := \frac{-|Y_{14}(p, C_1, R_2)|}{|Y_{11}(p, C_1, R_2)| + Y_{\text{н}} \cdot |Y_{1144}(p, C_1, R_2)|}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$A_u(p, C_1, R_2) := |K_u(p, C_1, R_2)|$$

Графики АЧХ фильтра нижних частот представлены на рисунке 2.3.

$w := 1, 1.1 \dots 13$

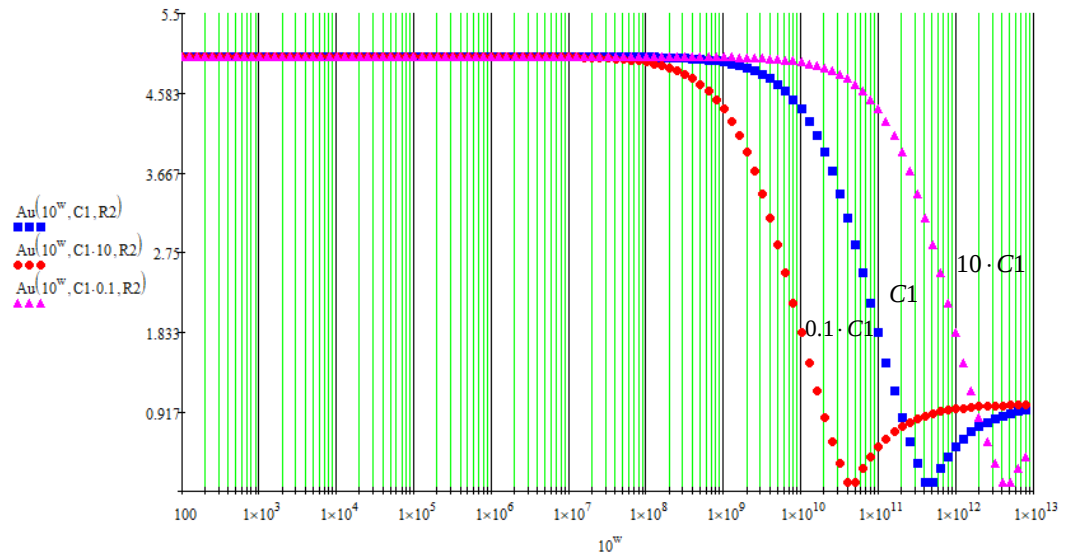


Рисунок 2.3 – График АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению

ВЫВОДЫ

Анализируя АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению, позволяет сделать ряд выводов. Увеличение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к уменьшению частоты среза, а уменьшение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к увеличению частоты среза.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Численные значения номинальных параметров элементов схемы

$$\begin{array}{llll} R1 := 10^4 & \text{Ом} & G_d := 5 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R2 := 5 \cdot 10^4 & \text{Ом} & G_{сф1} := 100 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R3 := 10 & \text{Ом} & G_{сф2} := 100 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R4 := 10^4 & \text{Ом} & G_{ввх} := 10 & \text{Ом}^{-1} \end{array} \quad \begin{array}{ll} Y_H := 10^{-3} & \text{Ом}^{-1} \\ C1 := 1 \cdot 10^{-6} & \text{Ф} \\ k := 10^5 & \end{array}$$

Укороченная матрица проводимостей

$$Y(p, C1, R2) := \begin{pmatrix} p \cdot C1 + \frac{1}{R1} & \frac{-1}{R1} & 0 & -p \cdot C1 \\ \frac{-1}{R1} & \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + G_d + G_{сф1} & \frac{-1}{R2} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} & \frac{-1}{R3} \\ -p \cdot C1 & k \cdot G_{ввх} & \frac{-1}{R3} & \frac{1}{R3} + G_{ввх} + p \cdot C1 \end{pmatrix}$$

Подматрицы, необходимые для нахождения алгебраических дополнений

$$Y11(p, C1, R2) := \begin{pmatrix} \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + G_d + G_{сф1} & \frac{-1}{R2} & 0 \\ \frac{-1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} & \frac{-1}{R3} \\ k \cdot G_{ввх} & \frac{-1}{R3} & \frac{1}{R3} + G_{ввх} + p \cdot C1 \end{pmatrix}$$

$$Y14(p, C1, R2) := \begin{pmatrix} \frac{-1}{R1} & \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + G_d + G_{сф1} & \frac{-1}{R2} \\ 0 & \frac{-1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \\ -p \cdot C1 & k \cdot G_{ввх} & \frac{-1}{R3} \end{pmatrix}$$

$$Y1144(p, C1, R2) := \begin{pmatrix} \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + G_d + G_{сф1} & \frac{-1}{R2} \\ \frac{-1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \end{pmatrix}$$

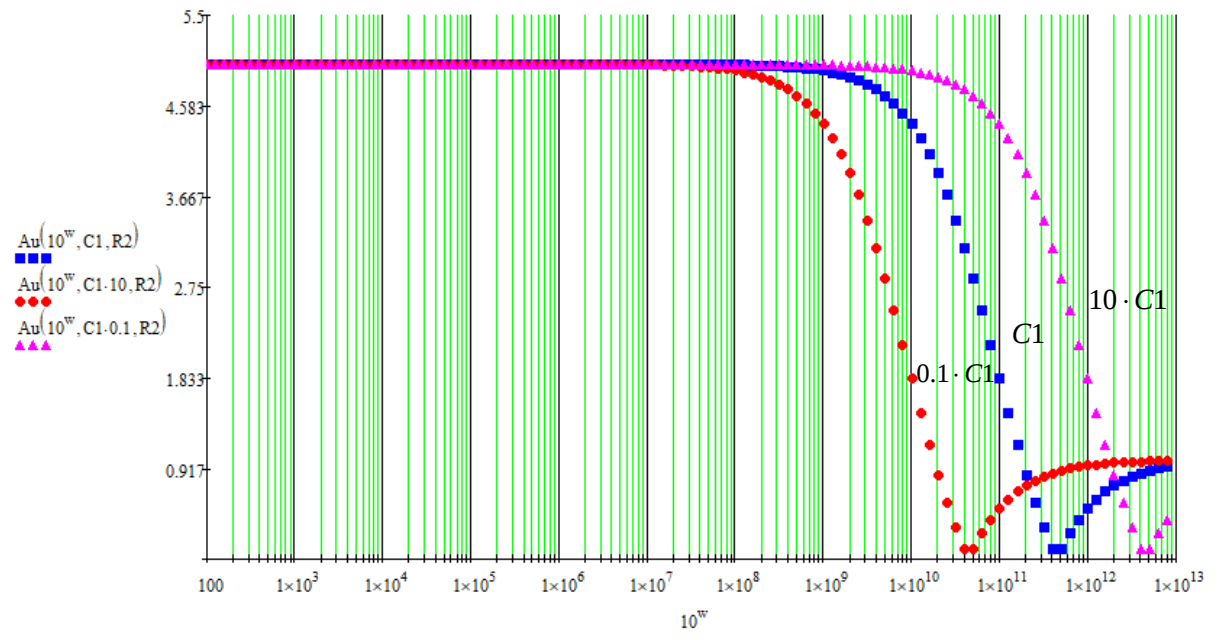
Коэффициент передачи напряжения

$$Ku(p, C1, R2) := \frac{-|Y14(p, C1, R2)|}{|Y11(p, C1, R2)| + Y_H \cdot |Y1144(p, C1, R2)|}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$Au(p, C1, R2) := |Ku(p, C1, R2)|$$

$$w := 1, 1.1 \dots 13$$



3 Лабораторная работа №2. Исследование электронной цепи методом эквивалентных на основе координатных уравнений для координат в сокращенном гибридном координатном базисе

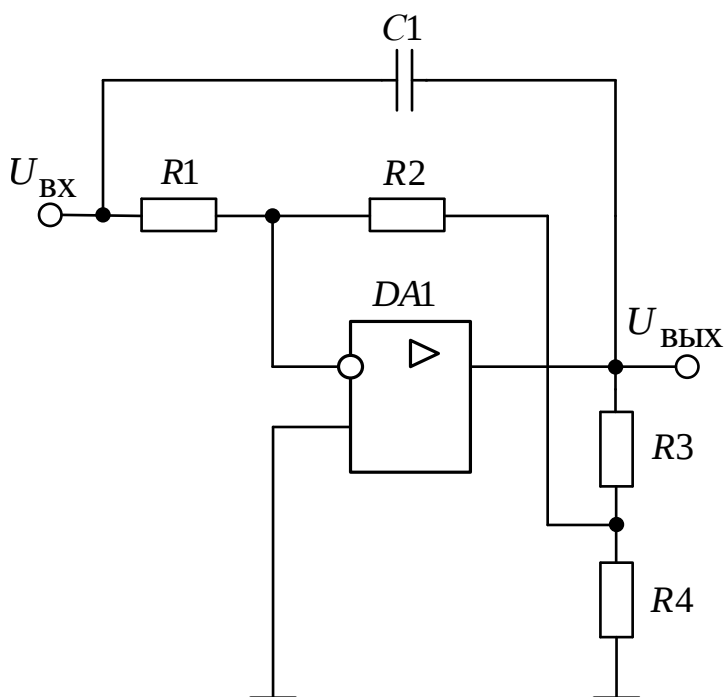


Рисунок 3.1 – Схема фильтра нижних частот на операционном усилителе

3.1 Содержание лабораторной работы

Цель работы. Формирование системы координатных уравнений для координат в матричной форме в сокращенном гибридном координатном базисе.

Программа работы.

1. Получить номер варианта лабораторной работы.
2. Провести параметрический синтез схемы.
3. Сформировать схему замещения по переменному току для полного диапазона частот.
4. Составить топологический граф, соответствующий схеме замещения по переменному току для полного диапазона частот.
5. Сформировать матрицы главных сечений и главных контуров, матрицу проводимостей y -ветвей, матрицу сопротивлений z -ветвей, матрицу

управляющих параметров ИТУТ, матрицу управляющих параметров ИНУН, матриц задающих токов и задающих э.д.с.

6. Оформить отчет о проделанной работе. Сформулировать выводы по каждому из пунктов 1 – 5.

3.2 Пример выполнения лабораторной работы № 2. Исследование фильтра нижних частот методом эквивалентных схем на основе координатных уравнений для координат в сокращенном гибридном координатном базисе

Схема замещения фильтра нижних частот по переменному току в полном диапазоне частот представлена на рисунке 3.2.

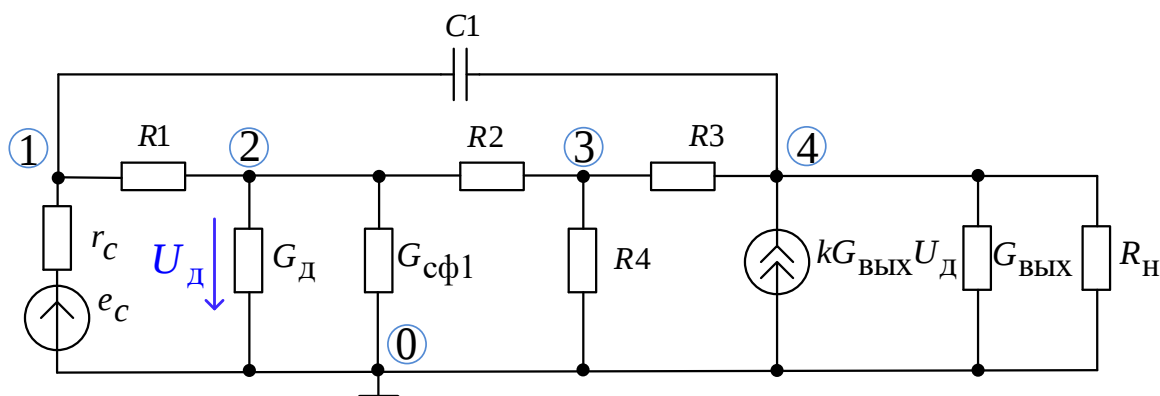


Рисунок 3.2 – Схема замещения фильтра нижних частот в полном диапазоне частот

ПОЛЮСНЫЙ ГРАФ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Составим полюсный граф фильтра низких частот, соответствующий схеме замещения рисунок 3.2, представлен на рисунке 3.3.

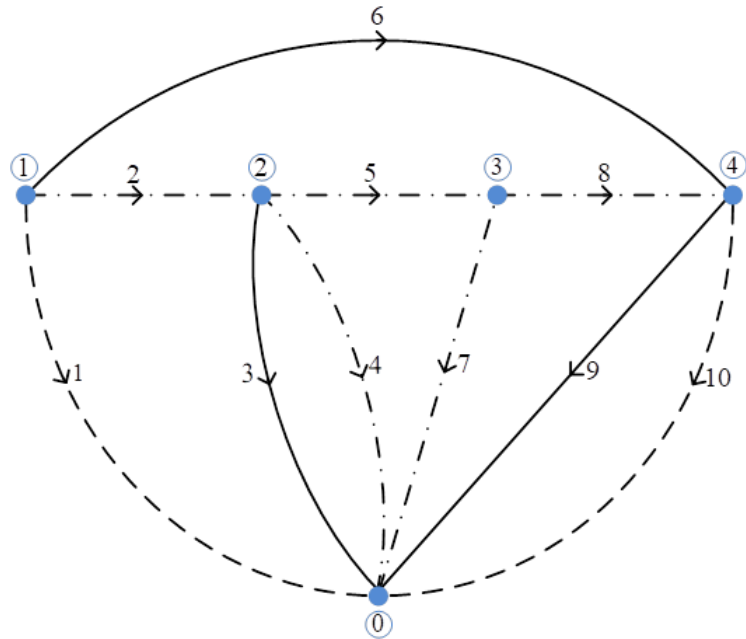


Рисунок 3.3 – Полусный граф фильтра низких частот

На рисунке 3.3 y -ребра показаны сплошными, z -ребра – пунктирными линиями, а взаимно определенные ребра – штрихпунктирными линиями.

С целью оптимального разбиения взаимно определенных ребер, обеспечивающего образование максимального количества вырожденных координат, преобразуем полюсный граф путем закорачивания всех y -ребер и размыкания всех z -ребер. В результате получаем граф, приведенный на рисунке 3.4.

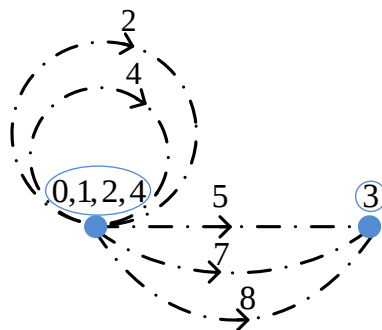


Рисунок 3.4 – Граф взаимно определенных ребер

Граф взаимно определенных ребер показывает, что ребра 2,4,5,7,8 следует отнести к y -ребрам. Полусный граф фильтра нижних частот с оптимальным разбиением ребер представлен на рисунке 3.5.

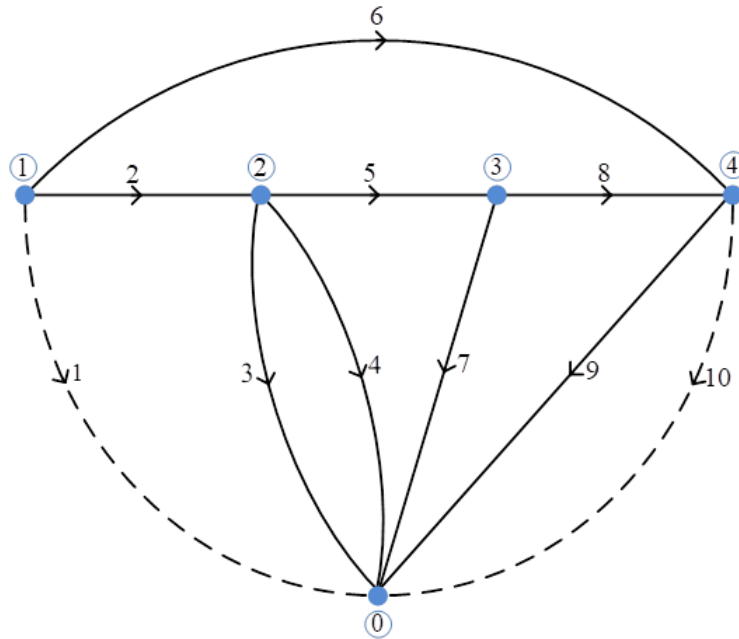


Рисунок 3.5 – Полюсный граф фильтра нижних частот с оптимальным разбиением ребер

Используя рисунок 3.5, определяем параметры полюсного графа схемы: количество y -ветвей графа $L_y = 8$; количество z -ветвей графа $L_z = 2$; количество вершин графа $v = 5$; количество частей исходного графа $n = 1$; количество главных контуров $\sigma = (L_y + L_z) - v + n = 6$; количество главных сечений $\nu = v - n = 4$.

На рисунке 3.6 показан один из вариантов выбора дерева графа, которое содержит ветви 2,3,7,9. Выбранное дерево определяет систему независимых координат, содержащую 6 независимых контуров (рисунок 3.6) и 4 независимых сечений (рисунок 3.7).

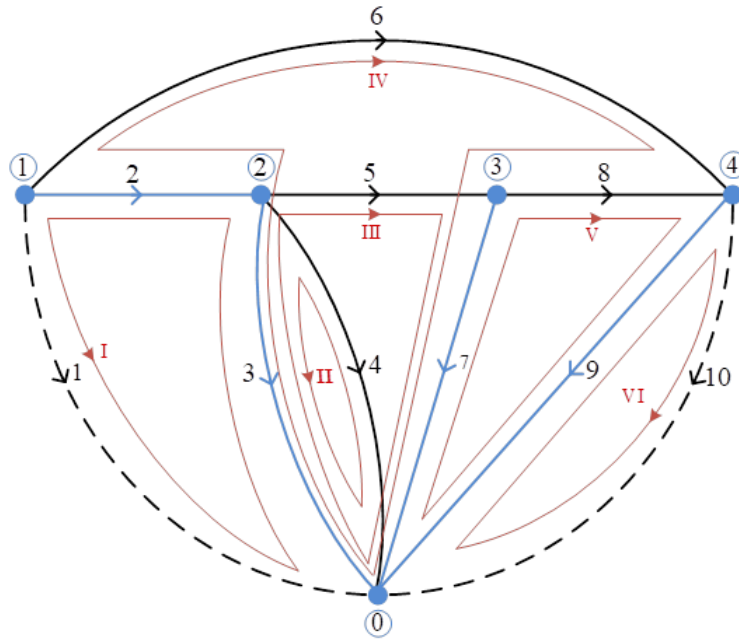


Рисунок 3.6 – Система независимых контуров

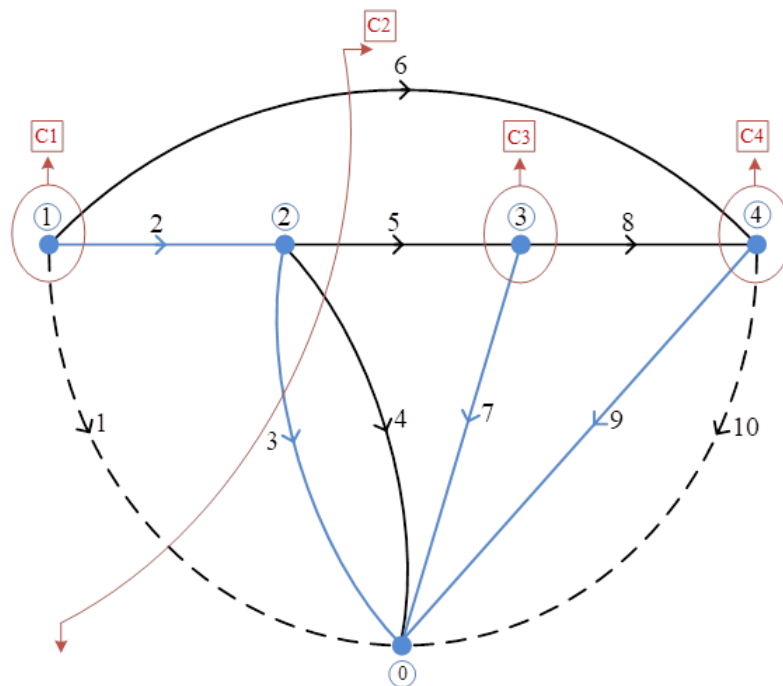


Рисунок 3.7 – Система независимых сечений

В сокращенном координатном базисе из состава системы координат необходимо исключить вырожденные сечения и контуры. Количество вырожденных контуров определяется выражением $\sigma'' = L_y - v + n_y$, где L_y – количество y -ветвей графа; v – количество вершин графа;

n_y – количество частей графа, полученного из исходного путем размыкания всех z -ветвей.

Для рассматриваемого графа $L_y = 8$; $v = 5$; $n_y = 1$, поэтому $\sigma'' = 8 - 5 + 1 = 4$. Вырожденными являются II, III, IV и V, контуры (рисунок 3.6).

Количество вырожденных сечений определяется выражением $v'' = n_y - n$, где n – количество частей исходного графа. Для рассматриваемого графа $n = 1$, $n_y = 1$, поэтому $v'' = 1 - 1 = 0$, то есть все сечения являются невырожденными (рисунок 3.7).

Система координат в сокращенном координатном базисе показана на рисунке 3.8.

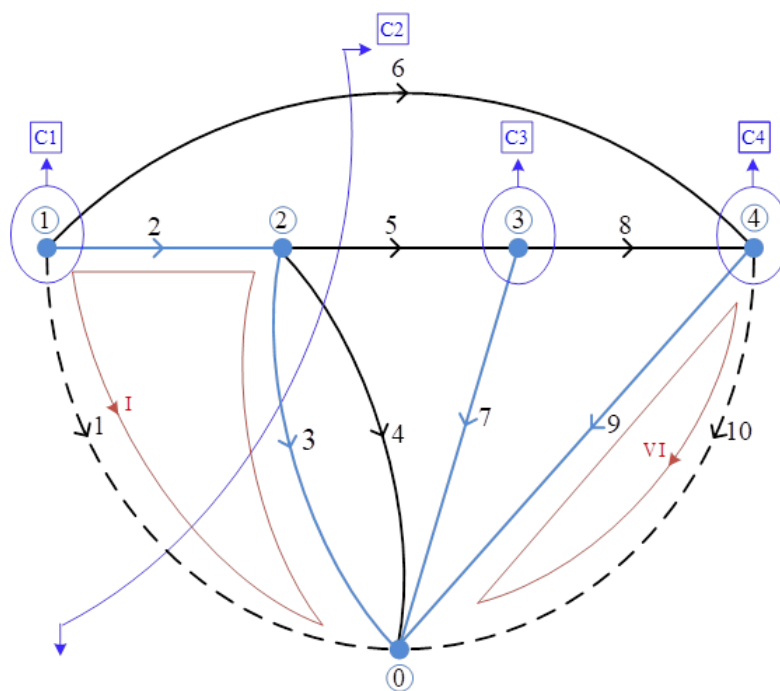


Рисунок 3.8 – Система координат в сокращенном координатном базисе

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Для формирования системы топологических уравнений составим следующие матрицы и подматрицы для графа (рисунок 3.7).

Матрица главных сечений имеет вид:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
2	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	-1	0	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	0	-1	1	1

Подматрица Π_y главных сечений для y -ветвей и подматрица Π_z главных сечений для z -ветвей:

	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	0	1	0	0	0
2	0	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	-1	0	1	1	0
4	0	0	0	0	-1	0	-1	1

	1	10
1	1	0
2	1	0
3	0	0
4	0	1

Матрица невырожденных контуров имеет вид:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

Подматрица P_y невырожденных контуров для y -ветвей и подматрицы P_z невырожденных контуров для z -ветвей.

	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-1	-1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	-1

$$P_z = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТНЫХ МАТРИЦ

Для формирования системы компонентных уравнений составим следующие матрицы и подматрицы в сокращенном гибридном координатном базисе, используя граф, представленный на рисунке 3.8:

Обобщенная матрица проводимостей и сопротивлений:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	r_c	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	$\frac{1}{R1}$	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	G_d	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	$G_{сф1}$	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	$\frac{1}{R2}$	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	$pC1$	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{R4}$	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{R3}$	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_{вых}$	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Z_n

Матрица сопротивлений z-ребер:

$$Z = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 10 \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_c & 0 \\ 0 & Z_n \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Матрица проводимостей у-ребер:

	2	3	4	5	6	7	8	9
2	$\frac{1}{R1}$	0	0	0	0	0	0	0
3	0	$G_{\text{д}}$	0	0	0	0	0	0
4	0	0	$G_{\text{сф1}}$	0	0	0	0	0
5	0	0	0	$\frac{1}{R2}$	0	0	0	0
6	0	0	0	0	$pC1$	0	0	0
7	0	0	0	0	0	$\frac{1}{R4}$	0	0
8	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{R3}$	0
9	0	0	0	0	0	0	0	$G_{\text{вых}}$

Матрица управляющих параметров источника тока, управляемого током:

	1	10
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0

Матрица управляющих параметров источника напряжения, управляемого напряжением:

	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0

Обобщенные топологические матрицы:

$$f(x, y) := 0$$

$$\Theta := \text{stack}(\text{augment}(\Pi y, \text{matrix}(\nu', Lz, f)), \text{augment}(\text{matrix}(\sigma', Ly, f), Pz))$$

$$\Theta 1 := \text{stack}(\text{augment}(\text{matrix}(\nu', Ly, f), \Pi z), \text{augment}(Py, \text{matrix}(\sigma', Lz, f)))$$

Обобщенная компонентная матрица:

$$V(p, C1) := \text{stack}(\text{augment}(Y(p, C1), N), \text{augment}(M, Z(p)))$$

Матрица эквивалентных параметров схемы:

$$W(p, C1) := \Theta \cdot V(p, C1) \cdot \Theta^T + \Theta 1 \cdot \Theta^T$$

Столбцы матрицы невырожденных контуров, соответствующие входному и выходному ребрам:

$$P_{ВХ} := Pz^{\langle 0 \rangle} \quad P_{ВЫХ} := Pz^{\langle 1 \rangle}$$

$$P_{ВХ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad P_{ВЫХ} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Преобразующие векторы для суммарных алгебраических дополнений матрицы эквивалентных параметров W

$$\Theta_{ВХ} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), -P_{ВХ})$$

$$\Theta_{ВЫХ} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), P_{ВЫХ})$$

$$\lambda_{ВХ} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{ВХ}^T)$$

$$\lambda_{ВЫХ} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{ВЫХ}^T)$$

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ

Схемная функция для расчета коэффициента передачи напряжения

$$Ku(p, C1) := \frac{Z_H \cdot \text{SumCofactor}(W(p, C1), \text{Converter}(\Theta_{ВХ}), \text{Converter}(\lambda_{ВЫХ}^T))}{|W(p, C1)| + Z_H \cdot \text{SumCofactor}(W(p, C1), \text{Converter}(\Theta_{ВЫХ}), \text{Converter}(\lambda_{ВЫХ}^T))}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$Au(\omega, C1) := |Ku(\omega \cdot i, C1)|$$

Графики АЧХ фильтра нижних частот представлены на рисунке 3.9.

$w := 0, 0.1 \dots 6$

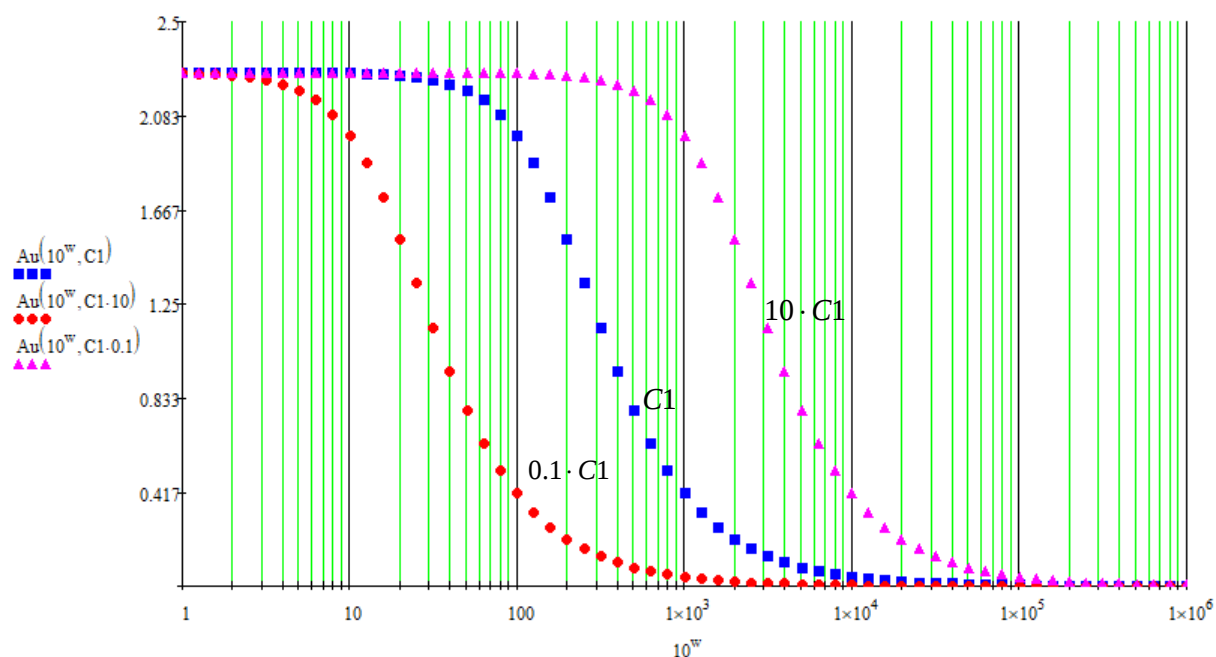


Рисунок 3.9 – График АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению

ВЫВОДЫ

Анализируя АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению, позволяет сделать ряд выводов. Увеличение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к уменьшению частоты среза, а уменьшение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к увеличению частоты среза.

Численные значения параметров компонентов схемы замещения

$R1 := 10^4$ Ом	$G_d := 5 \cdot 10^{-6}$ Ом ⁻¹	$Z_H := 10 \cdot 10^3$ Ом
$R2 := 5 \cdot 10^4$ Ом	$G_{сф1} := 100 \cdot 10^{-6}$ Ом ⁻¹	$r_c := 10^3$ Ом
$R3 := 10$ Ом	$G_{сф2} := 100 \cdot 10^{-6}$ Ом ⁻¹	$C1 := 1 \cdot 10^{-6}$ Ф
$R4 := 10^4$ Ом	$G_{ввх} := 10$ Ом ⁻¹	$k := 10^5$

Параметры полюсного графа схемы:

$L_y := 8$	число y-дуг
$L_z := 2$	число z-дуг
$v := 5$	число вершин
$\frac{1}{\infty} := 10$	число дуг
$n := 1$	количество частей исходного графа
$n_y := 1$	количество частей графа, полученного из исходного путем размыкания всех z-ветвей
$\nu := v - n$	$\nu = 4$ Количество ветвей древа графа
$\sigma := (L_y + L_z) - v + n$	$\sigma = 6$ Количество главных контуров
$\nu'' := n_y - n$	$\nu'' = 0$ Количество вырожденных сечений
$\sigma'' := L_y - v + n_y$	$\sigma'' = 4$ Количество вырожденных контуров
$\nu' := \nu - \nu''$	$\nu' = 4$ Количество невырожденных сечений
$\sigma' := \sigma - \sigma''$	$\sigma' = 2$ Количество невырожденных контуров
$\mu := \nu + \sigma$	$\mu = 10$
$\mu' := \nu' + \sigma''$	$\mu' = 4$
$\mu'' := \nu' + \sigma'$	$\mu'' = 6$

Компонентные матрицы:

Матрица сопротивлений z-ребер

$$Z(p) := \begin{pmatrix} r_c & 0 \\ 0 & Z_H \end{pmatrix}$$

Матрица проводимости y-ребер

$$Y(p, C1) := \begin{pmatrix} \frac{1}{R1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{сф1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p \cdot C1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R3} & 0 \\ 0 & k \cdot G_{ввх} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{ввх} \end{pmatrix}$$

Матрица управляющих параметров источника тока, управляемого током

$$\underline{N} := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица управляющих параметров источника напряжения, управляемого напряжением

$$M := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Обобщенная компонентная матрица:

$$\underline{V}(p, C1) := \text{stack}(\text{augment}(Y(p, C1), N), \text{augment}(M, Z(p)))$$

Матрица эквивалентных параметров схемы:

$$\underline{W}(p, C1) := \Theta \cdot \underline{V}(p, C1) \cdot \Theta^T + \Theta_1 \cdot \Theta_1^T$$

Столбцы матрицы невырожденных контуров, соответствующие входному и выходному ребрам:

$$P_{\text{вх}} := P_z^{(0)} \quad P_{\text{вых}} := P_z^{(1)}$$

$$P_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad P_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Преобразующие векторы для суммарных алгебраических дополнений матрицы эквивалентных параметров W

$$\Theta_{\text{вх}} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), -P_{\text{вх}})$$

$$\Theta_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\text{вх}} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{\text{вх}}^T)$$

$$\lambda_{\text{вх}} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$$

$$\Theta_{\text{вых}} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), P_{\text{вых}})$$

$$\Theta_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\text{вых}} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{\text{вых}}^T)$$

$$\lambda_{\text{вых}} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$$

Подпрограмма удаления из матрицы M a -ой строки и b -го столбца

```
Minor(M, a, b) :=
  r ← -1
  for i ∈ 0..rows(M) - 2
    r ← r + 1
    r ← r + 1 if r = a - 1
    s ← -1
    for j ∈ 0..cols(M) - 2
      s ← s + 1
      s ← s + 1 if s = b - 1
      Ai,j ← Mr,s
  A
```

Подпрограмма преобразования матрицы W в соответствии с преобразующими векторами $\theta = th$ и $\lambda = lam$

```
SumMinor(W, th, lam) :=
  Wr ← WT
  for i ∈ 2..длина(th) - 1
    if длина(th) > 2
      Wr<thi-1> ← Wr<thi-1> + Wr<th1-1> if i > (|th|)0
      Wr<thi-1> ← Wr<thi-1> - Wr<th1-1> otherwise
  Wr ← WrT
  for i ∈ 2..длина(lam) - 1
    if длина(lam) > 2
      Wr<lami-1> ← Wr<lami-1> + Wr<lam1-1> if i > (|lam|)0
      Wr<lami-1> ← Wr<lami-1> - Wr<lam1-1> otherwise
  Wr
```

Определение суммарного алгебраического дополнения $D(ql)$ матрицы W ($q=th, l=lam$)

$$\text{SumCofactor}(W, th, lam) := (-1)^{th_1 + lam_1} \cdot \text{sign}(th_0 \cdot lam_0) \cdot \left| \text{Minor}(\text{SumMinor}(W, th, lam), th_1, lam_1) \right|$$

Подпрограмма распределения элементов преобразующего вектора $q=th$ по подмножествам положительных и отрицательных элементов

```
Converter(th) :=
  p ← 0
  n ← 0
  for i ∈ 0..длина(th) - 1
    if thi = 1
      p ← p + 1
      vpp-1 ← i + 1
    if thi = -1
      n ← n + 1
      vnn-1 ← i + 1
  stack(p, vp) if n = 0
  stack(-n, vn) if p = 0
  stack(p, vp, vn) otherwise
```

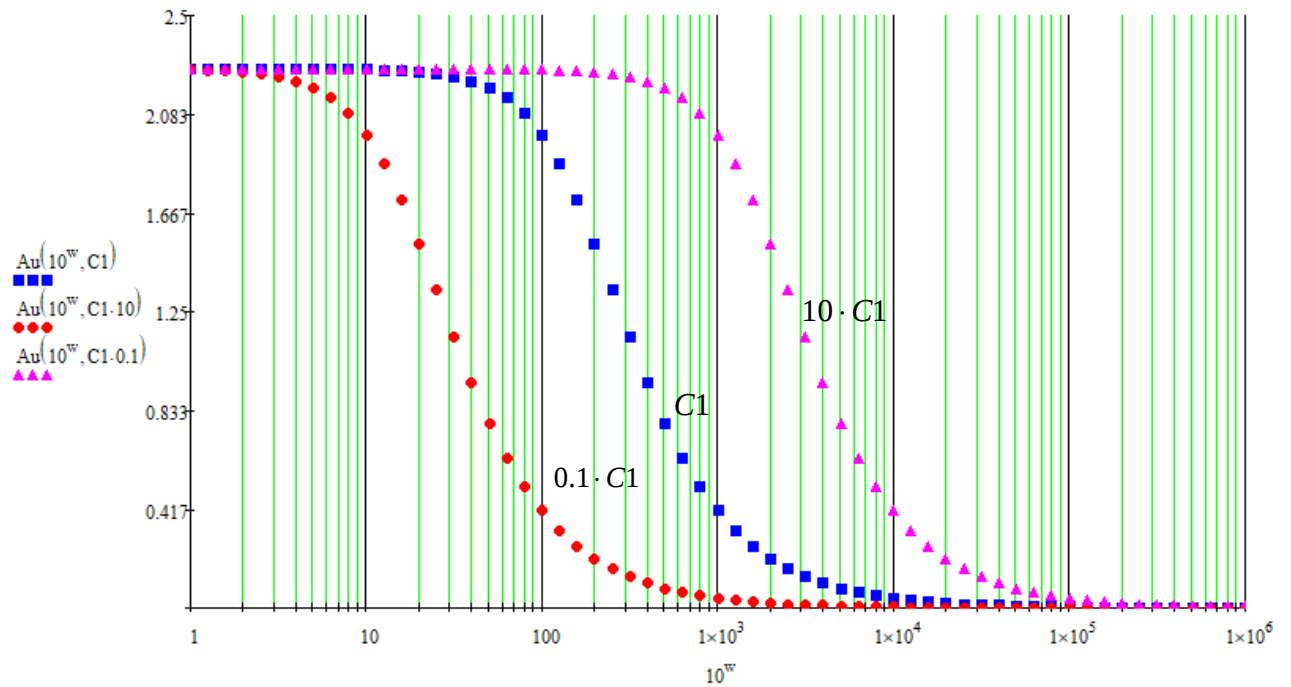
Определением коэффициента передачи по напряжению

$$Ku(p, C1) := \frac{Z_{\text{H}} \cdot \text{SumCofactor}(W(p, C1), \text{Converter}(\Theta_{\text{BX}}), \text{Converter}(\lambda_{\text{БВХ}}^T))}{|W(p, C1)| + Z_{\text{H}} \cdot \text{SumCofactor}(W(p, C1), \text{Converter}(\Theta_{\text{БВХ}}), \text{Converter}(\lambda_{\text{БВХ}}^T))}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$Au(\omega, C1) := |Ku(\omega \cdot i, C1)|$$

$$w := 0, 0.1 \dots 6$$



4 Лабораторная работа №3. Исследование электронной цепи методом сигнального U – графа Мэсона

4.1 Содержание лабораторной работы

Цель работы. Расчет и анализ линейной электронной цепи непрерывного действия в частотной области.

Программа работы.

1. Получить номер варианта лабораторной работы.
2. Провести параметрический синтез схемы.
3. Сформировать схему замещения по переменному току для полного диапазона частот.
4. Сформировать сигнальный U-граф Мэсона пассивной части схемы замещения.
5. Сформировать сигнальный U-граф Мэсона активной части схемы замещения.
6. Сформировать однородный суммарный сигнальный U-граф Мэсона.
7. Сформировать неоднородный сигнальный U-граф Мэсона.
8. Определить схемные функции с использованием топологической формулы общей передачи сигнального U-графа Мэсона.
9. Рассчитать и построить семейства частотных характеристик основных схемных функций.
10. Исследовать влияние на частотные характеристики варьируемых параметров электронной схемы.
11. Оформить отчет о проделанной работе. Сформулировать выводы по каждому из пунктов 2 – 10.

4.2 Пример выполнения лабораторной работы № 3. Исследование фильтра нижних частот методом сигнального U-графа Мэсона

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определение передаточных схемных функций фильтра нижних частот методом сигнального U-графа Мэсона.

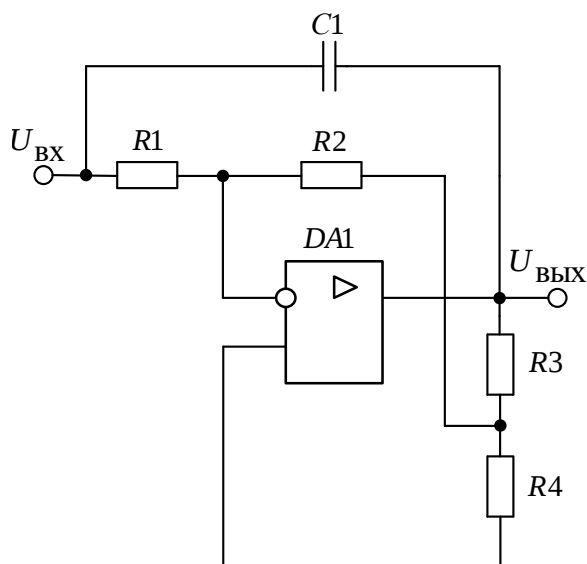


Рисунок 4.1 – Схема фильтра нижних частот на операционном усилителе

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ ДЛЯ ПОЛНОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Схема замещения фильтра нижних частот по переменному току в полном диапазоне частот представлена на рисунке 4.2.

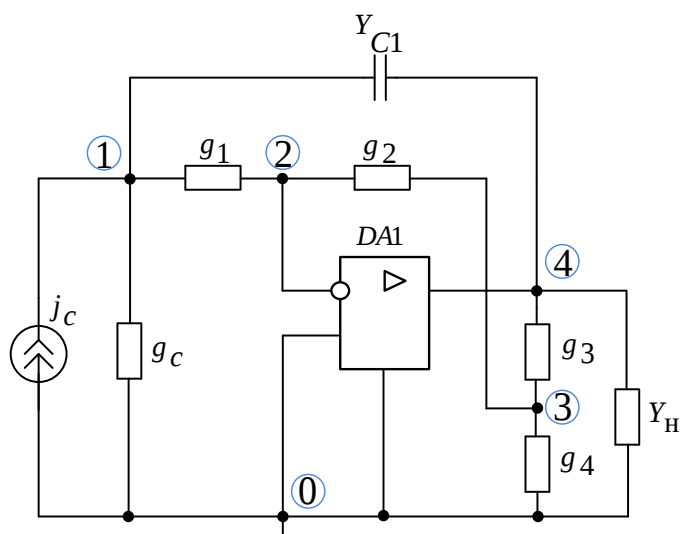


Рисунок 4.2 – Схема замещения фильтра нижних частот в полном диапазоне частот

Компоненты схемы замещения представлены как у-компоненты: источник входного сигнала – параллельно включенными идеальным источником переменного тока j_c и внутренней проводимостью g_c , пассивные двухполюсники – ветвями с операторными проводимостями:

$$g_1 = \frac{1}{R_1}; g_2 = \frac{1}{R_2}; g_3 = \frac{1}{R_3}; g_4 = \frac{1}{R_4}; Y_{C1} = pC_1; Y_H = \frac{1}{R_H}$$

Для построения сигнального U-графа Мэсона пассивной части схемы все узлы схемы замещения, за исключением базисного (узел 0), представляем вершинами графа. В каждой вершине формируем петлю с передачей $a_{ii, \text{пасс}} = 1 - Y_{ii, \text{пасс}}$, где $Y_{ii, \text{пасс}}$ собственная проводимость i -го узла схемы замещения (без учета внутренней проводимости источника сигнала):

$$a_{11, \text{пасс}} = 1 - (g_1 + Y_{C1});$$

$$a_{22, \text{пасс}} = 1 - (g_1 + g_2);$$

$$a_{33, \text{пасс}} = 1 - (g_2 + g_3 + g_4);$$

$$a_{44, \text{пасс}} = 1 - (g_3 + Y_{C1} + Z_H).$$

Сигнальный U-граф Мэсона пассивной части схемы фильтра нижних частот приведен на рисунке 4.3.

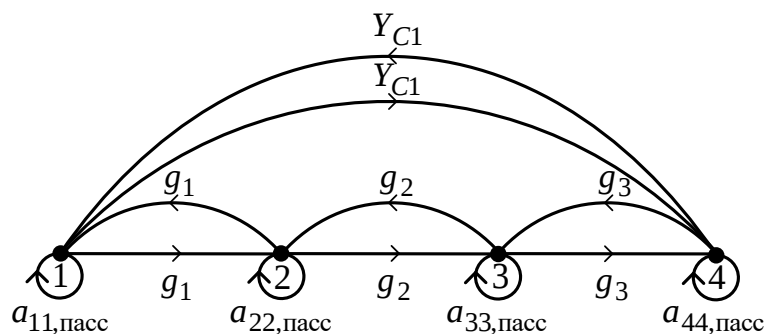


Рисунок 4.3 – Сигнальный U-граф Мэсона пассивной части схемы замещения фильтра нижних частот

ВЫБОР СИГНАЛЬНОГО U-ГРАФА МЭЗОНА ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Сигнальный U-граф Мэсона операционного усилителя представлен на

рисунке 4.4,а. Неинвертирующий вход операционного усилителя в схеме замещения фильтра подключен к условно заземленному узлу, который в графе не отображается. Инвертирующий вход подключен к узлу 2, а выход к узлу 4, поэтому в сигнальном графе операционного усилителя (рисунок 4.4,б) принята соответствующая нумерация вершин.

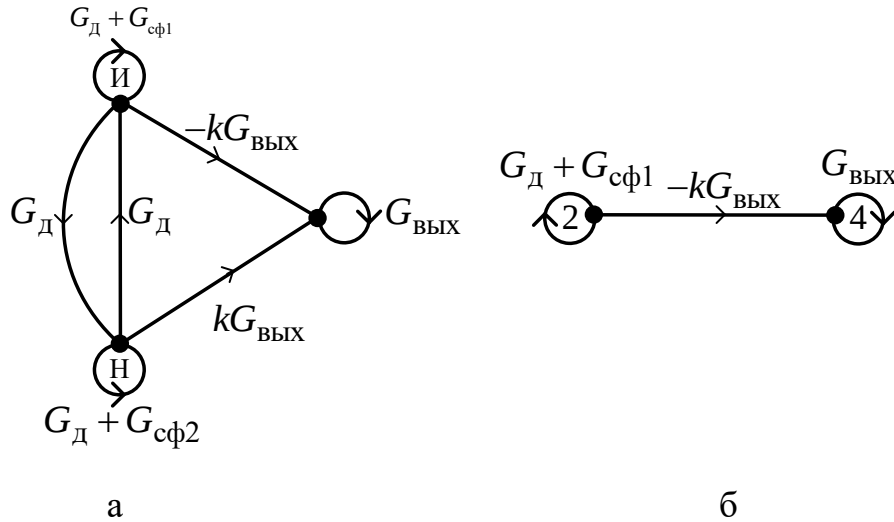


Рисунок 4.4 – Сигнальный U-граф Мэсона операционного усилителя:

а – исходный; б – преобразованный

Для формирования суммарного однородного сигнального U-графа Мэсона фильтра нижних частот совмещаем одноименные вершины сигнальных графов рис. 4.3 и рис. 4.4. Петли при одноименных вершинах представляем петлями с передачами $a_{ii} = a_{ii, \text{пасс}} - a_{ii, \text{ОУ}}$, где $a_{ii, \text{пасс}}$ – передача петли при i-ой вершине сигнального графа пассивной части схемы, $a_{ii, \text{ОУ}}$ – передача петли при i-ой вершине сигнального графа операционного усилителя.

В результате передачи петель суммарного однородного сигнального U-графа:

$$a_{11} = a_{11, \text{пасс}} = g_1 + Y_{C1};$$

$$a_{22} = a_{22, \text{пасс}} - (G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}}) = g_1 + g_2 + G_{\text{д}} + G_{\text{сф1}};$$

$$a_{33} = a_{33, \text{пасс}} = g_2 + g_3 + g_4;$$

$$a_{44} = a_{44, \text{пасс}} - (G_{\text{вых}}) = g_3 + Y_{C1} + Z_{\text{н}} + G_{\text{вых}}.$$

Суммарный однородный сигнальный U-граф Мэсона представлен на рисунке 4.5.

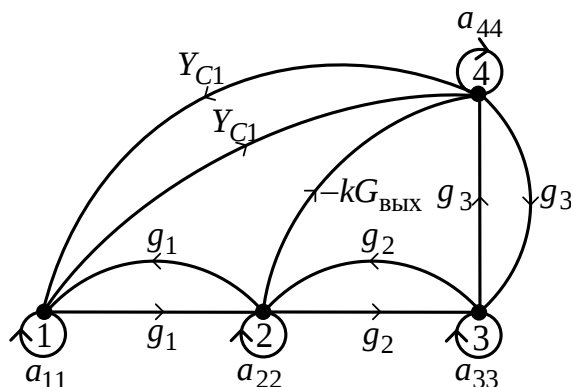


Рисунок 4.5 – Суммарный однородный сигнальный U-граф Мэсона фильтра нижних частот

Если в качестве задающей величины принять входной ток, то однородный обобщенный сигнальный граф дополняется невзвешенной вершиной-источком $I_{\text{вх}}$ и дугой единичной передачи, направленной от вершины $I_{\text{вх}}$ к вершине 1. Суммарный неоднородный сигнальный U-графа Мэсона представлен на рисунке 4.6.

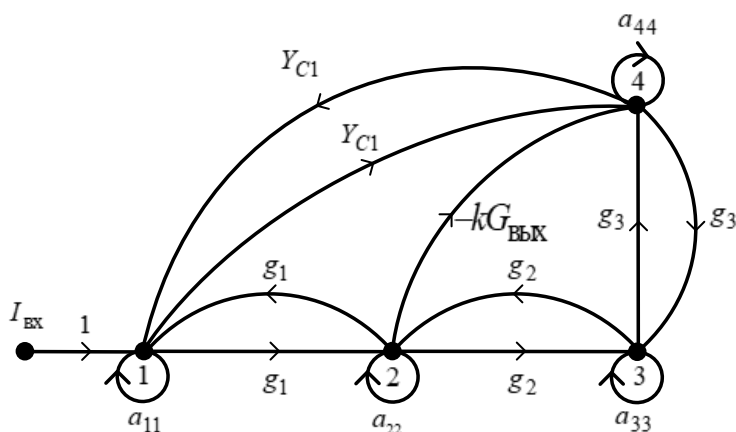


Рисунок 4.6 – Суммарный неоднородный сигнальный U-граф Мэсона фильтра нижних частот

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ СХЕМНОЙ ФУНКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ ОБЩЕЙ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛЬНОГО ГРАФА

Определитель сигнального графа Мэсона вычисляется по формуле:

$$D^M = 1 - \sum_{i=1}^8 L_i + \sum_{i=1}^2 L_k^{(i)} L_s^{(i)},$$

где L_i – передача i -го контура;

$L_k^{(i)} L_s^{(i)}$ – произведение передач i -ой пары некасающихся контуров.

Петли ненормализованного неоднородного сигнального графа Мэсона рис. 6 в процессе вычисления определителя и алгебраических дополнений рассматриваются как контуры, поэтому с целью упрощения вычисления определителя и дополнений путей граф рисунок 4.6 целесообразно нормализовать путем исключения петель.

Нормализованный неоднородный сигнальный U-граф Мэсона фильтра нижних частот приведен на рисунке 4.7.

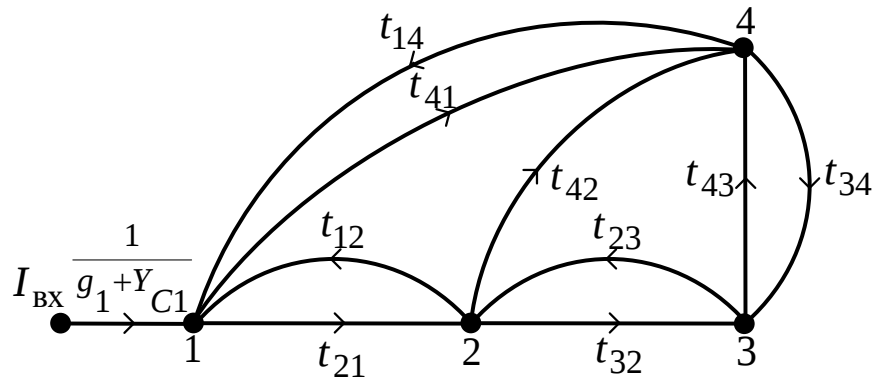


Рисунок 4.7 – Нормализованный сигнальный U-граф Мэсона избирательного усилителя

Передачи дуг нормализованного графа определяются выражениями:

$$t_{12} = \frac{g_1}{a_{11}} = \frac{g_1}{g_1 + Y_{C1}}; \quad t_{21} = \frac{g_1}{a_{22}} = \frac{g_1}{g_1 + g_2 + G_d + G_{cf1}};$$

$$t_{23} = \frac{g_2}{a_{22}} = \frac{g_2}{g_1 + g_2 + G_d + G_{cf1}}; \quad t_{32} = \frac{g_2}{a_{33}} = \frac{g_2}{g_2 + g_3 + g_4};$$

$$t_{41} = \frac{Y_{C1}}{a_{44}} = \frac{Y_{C1}}{g_3 + Y_{C1} + Z_H + G_{\text{ВЫХ}}}; \quad t_{14} = \frac{Y_{C1}}{a_{11}} = \frac{Y_{C1}}{g_1 + Y_{C1}};$$

$$t_{42} = \frac{(-kG_{\text{ВЫХ}})}{a_{44}} = \frac{(-kG_{\text{ВЫХ}})}{g_3 + Y_{C1} + Z_H + G_{\text{ВЫХ}}}; \quad t_{43} = \frac{g_3}{a_{44}} = \frac{g_3}{g_3 + Y_{C1} + Z_H + G_{\text{ВЫХ}}};$$

$$t_{34} = \frac{g_3}{a_{33}} = \frac{g_3}{g_2 + g_3 + g_4}.$$

При определении коэффициента передачи по напряжению вершина, соответствующая задающей переменной $U_{\text{ВХ}}$, является смешанной вершиной, поэтому:

$$K_U = \frac{U_H}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_4}{U_1} = \frac{\sum_{k=1}^3 p_k^{(U_4 I_{\text{ВХ}})} D_k^M}{p_1^{(U_1 I_{\text{ВХ}})} D_1^M}$$

Обобщенный сигнальный граф U-граф Мэсона (рисунок 4.7) содержит $n = 4$ взвешенных вершин, 8 контуров с передачами:

$$L_1(1,2) = t_{12} \cdot t_{21}; \quad L_2(2,3) = t_{23} \cdot t_{32}; \quad L_3(3,4) = t_{34} \cdot t_{43}; \quad L_4(1,4) = t_{14} \cdot t_{41};$$

$$L_5(1,2,4) = t_{21} \cdot t_{42} \cdot t_{14}; \quad L_6(1,4,3,2) = t_{41} \cdot t_{34} \cdot t_{23} \cdot t_{12};$$

$$L_7(1,2,3,4) = t_{21} \cdot t_{32} \cdot t_{43} \cdot t_{14}; \quad L_8(3,2,4) = t_{23} \cdot t_{42} \cdot t_{34}.$$

Величины простых путей:

$$p_1 = (I_{\text{ВХ}}, 1, 4) = \frac{1}{a_{11}} \cdot t_{41};$$

$$p_2 = (I_{\text{ВХ}}, 1, 2, 4) = \frac{1}{a_{11}} \cdot t_{21} \cdot t_{42};$$

$$p_3 = (I_{\text{ВХ}}, 1, 2, 3, 4) = \frac{1}{a_{11}} \cdot t_{21} \cdot t_{32} \cdot t_{43}.$$

Определитель сигнального графа:

$$D^M = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) + L_1 \cdot L_3 + L_2 \cdot L_4$$

Вследствие того, что p_2 и p_3 касаются всех контуров, то D_2 и $D_3 = 1$.

Для $p_1, D_1 = 1 - L_2$

Из графа следует $p_1 = \frac{1}{a_{11}}$. Величину дополнения D_1^M можно получить

по формуле:

$$D_1^M = 1 - (L_2 + L_3 + L_8)$$

Определим коэффициент передачи по напряжению.

$$K_U = \frac{p_1 D_1 + p_2 D_2 + p_3 D_3}{\frac{1}{a_{33}} D_1^M}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения.

$$A_U(p, C1) = |K_U|$$

График АЧХ фильтра нижних частот представлены на рисунке 4.8.

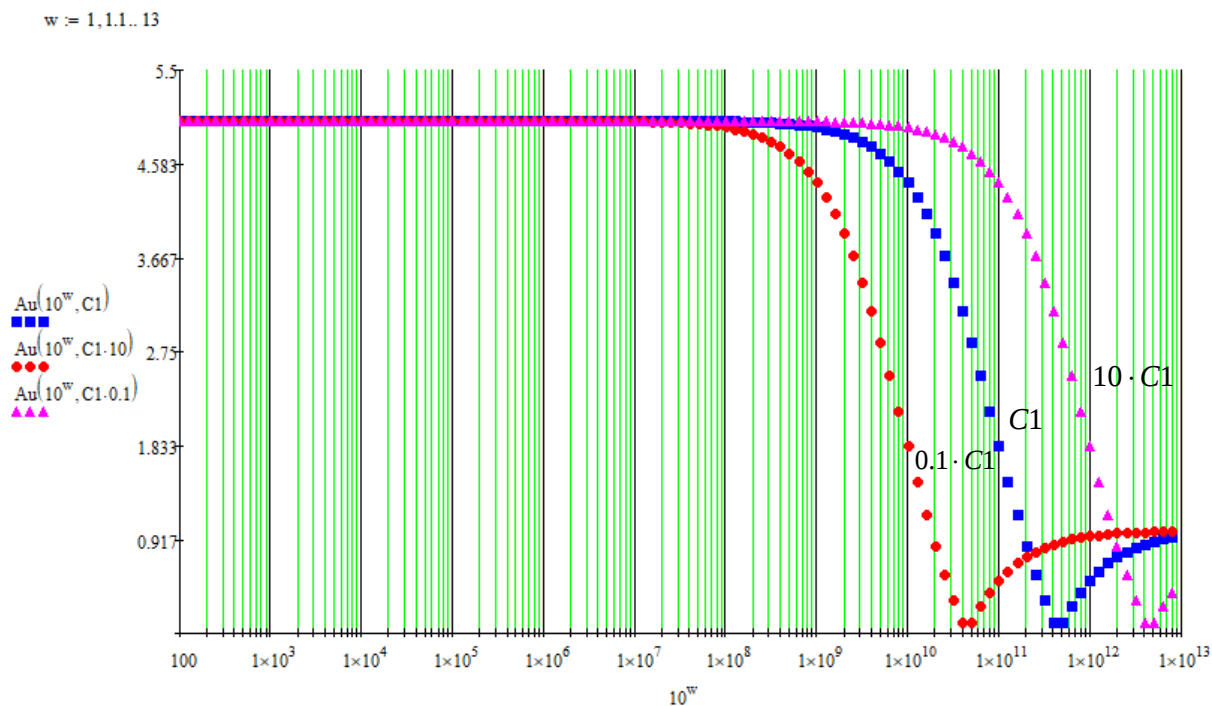


Рисунок 4.8 – График АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению

ВЫВОДЫ

Анализируя АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению, позволяет сделать ряд выводов. Увеличение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к уменьшению частоты среза, а уменьшение емкости конденсатора $C1$ приводит к увеличению частоты среза.

Численные значения номинальных параметров элементов схемы

$$\begin{array}{llll} R1 := 10^4 & \text{Ом} & Gд := 5 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R2 := 5 \cdot 10^4 & \text{Ом} & Gсф1 := 100 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R3 := 10 & \text{Ом} & Gсф2 := 100 \cdot 10^{-6} & \text{Ом}^{-1} \\ R4 := 10^4 & \text{Ом} & Gввх := 10 & \text{Ом}^{-1} \end{array}$$

$$Yн := 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \quad k := 10^5$$

$$g1 := \frac{1}{R1} \quad g2 := \frac{1}{R2} \quad g3 := \frac{1}{R3} \quad g4 := \frac{1}{R4} \quad Yc1(p, C1) := p \cdot C1$$

Передачи петель суммарного однородного сигнального U-графа

$$\begin{aligned} a11(p, C1) &:= g1 + Yc1(p, C1) \\ a22(p, C1) &:= g1 + g2 + Gд + Gсф1 \\ a33(p, C1) &:= g2 + g3 + g4 \\ a44(p, C1) &:= Yc1(p, C1) + g3 + Yн + Gввх \end{aligned}$$

Передачи дуг нормализованного графа

$$\begin{aligned} t12(p, C1) &:= \frac{g1}{a11(p, C1)} & t41(p, C1) &:= \frac{Yc1(p, C1)}{a44(p, C1)} \\ t21(p, C1) &:= \frac{g1}{a22(p, C1)} & t42(p, C1) &:= \frac{-k \cdot Gввх}{a44(p, C1)} \\ t14(p, C1) &:= \frac{Yc1(p, C1)}{a11(p, C1)} & t43(p, C1) &:= \frac{g3}{a44(p, C1)} \\ t23(p, C1) &:= \frac{g2}{a22(p, C1)} & t34(p, C1) &:= \frac{g3}{a33(p, C1)} \\ t32(p, C1) &:= \frac{g2}{a33(p, C1)} \end{aligned}$$

Передачи контуров сигнального графа

$$\begin{aligned} L1(p, C1) &:= t12(p, C1) \cdot t21(p, C1) & L5(p, C1) &:= t21(p, C1) \cdot t42(p, C1) \cdot t14(p, C1) \\ L2(p, C1) &:= t23(p, C1) \cdot t32(p, C1) & L6(p, C1) &:= t41(p, C1) \cdot t34(p, C1) \cdot t23(p, C1) \cdot t12(p, C1) \\ L3(p, C1) &:= t34(p, C1) \cdot t43(p, C1) & L7(p, C1) &:= t21(p, C1) \cdot t32(p, C1) \cdot t43(p, C1) \cdot t14(p, C1) \\ L4(p, C1) &:= t14(p, C1) \cdot t41(p, C1) & L8(p, C1) &:= t23(p, C1) \cdot t42(p, C1) \cdot t34(p, C1) \end{aligned}$$

Величины простых путей

$$\begin{aligned} P1(p, C1) &:= \frac{1}{a11(p, C1)} \cdot t41(p, C1) \\ P2(p, C1) &:= \frac{1}{a11(p, C1)} \cdot t21(p, C1) \cdot t42(p, C1) \\ P3(p, C1) &:= \frac{1}{a11(p, C1)} \cdot t21(p, C1) \cdot t32(p, C1) \cdot t43(p, C1) \end{aligned}$$

Величины дополнений простых путей:

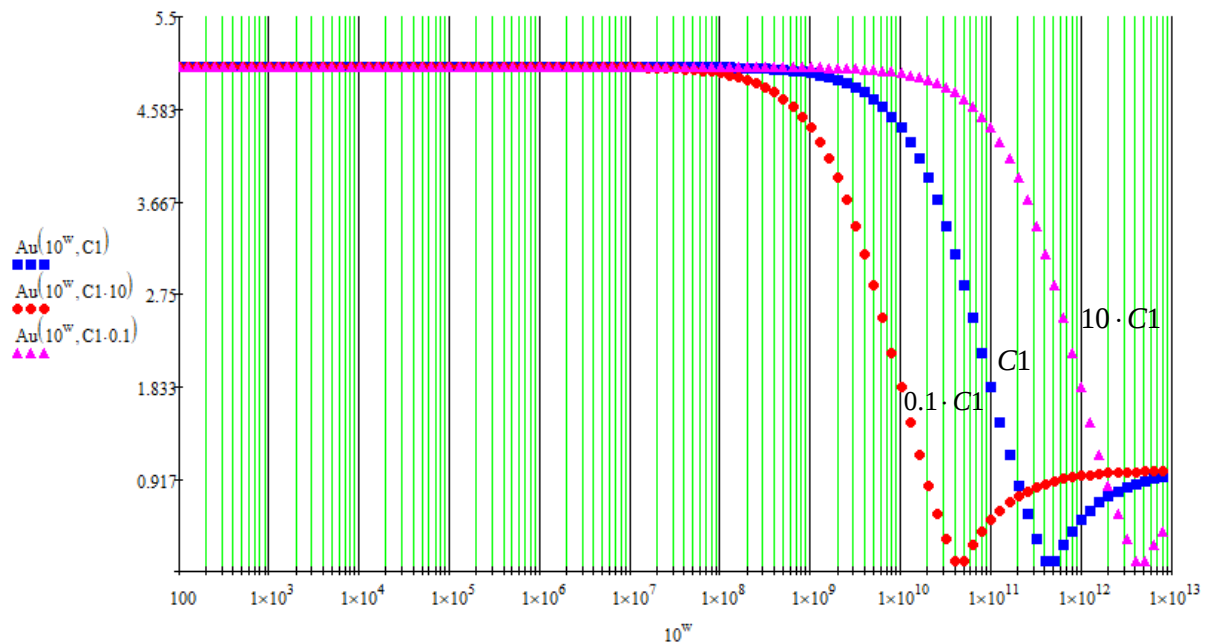
$$\begin{aligned} Dm(p, C1) &:= 1 - (L1(p, C1) + L2(p, C1) + L3(p, C1) + L4(p, C1) + L5(p, C1) + L6(p, C1) + L7(p, C1) + L8(p, C1)) + L1(p, C1) \cdot L3(p, C1) + L2(p, C1) \cdot L4(p, C1) \\ D1(p, C1) &:= 1 - L2(p, C1) \\ D2(p, C1) &:= 1 \\ D3(p, C1) &:= 1 \\ Dmm(p, C1) &:= 1 - (L2(p, C1) + L3(p, C1) + L8(p, C1)) \end{aligned}$$

Определение коэффициента передачи по напряжению

$$Ku(p, C1) := \frac{P1(p, C1) \cdot D1(p, C1) + P2(p, C1) \cdot D2(p, C1) + P3(p, C1) \cdot D3(p, C1)}{\frac{1}{a11(p, C1)} \cdot Dmm(p, C1)}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$\begin{aligned} Au(p, C1) &:= |Ku(p, C1)| \\ w &:= 1, 1.1 \dots 13 \end{aligned}$$



5 Лабораторная работа № 4. Исследование электронной цепи непрерывного действия методом эквивалентных схем в матричной форме в контурном координатном базисе

5.1 Содержание лабораторной работы

Цель работы. Расчет и анализ линейной электронной схемы непрерывного действия в частотной области.

Программа работы.

1. Получить номер варианта лабораторной работы.
2. Провести параметрический синтез схемы.
3. Сформировать схему замещения по переменному току для полного диапазона частот.
4. Сформировать математическую модель электронной схемы методом эквивалентных схем в матричной форме в контурном координатном базисе.
5. Определить выражения основных схемных функций.
6. Рассчитать и построить семейства частотных характеристик основных схемных функций.
7. Исследовать влияние на частотные характеристики варьируемых параметров электронной схемы.
8. Оформить отчет о проделанной работе. Сформулировать выводы по каждому из пунктов 2 – 7.

5.2 Пример выполнения лабораторной работы №4. Исследование фильтра нижних частот методом эквивалентных схем в матричной форме в контурном координатном базисе

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: параметрический синтез и анализ фильтра нижних частот на операционном усилителе.

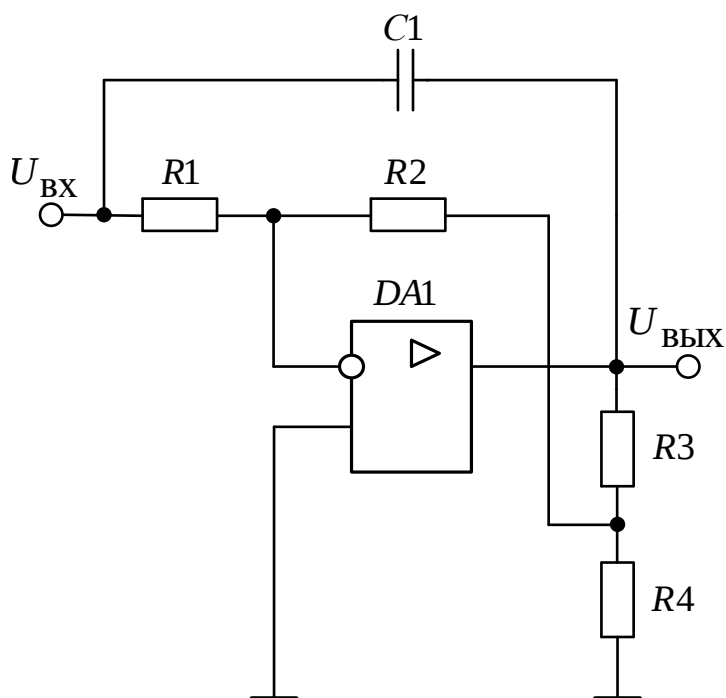


Рисунок 5.1 – Схема фильтра нижних частот на операционном усилителе

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ ДЛЯ ПОЛНОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Схема замещения фильтра нижних частот по переменному току в полном диапазоне частот, предназначенная для анализа методом эквивалентных схем в узловом координатном базисе, представлена на рисунке 5.2.

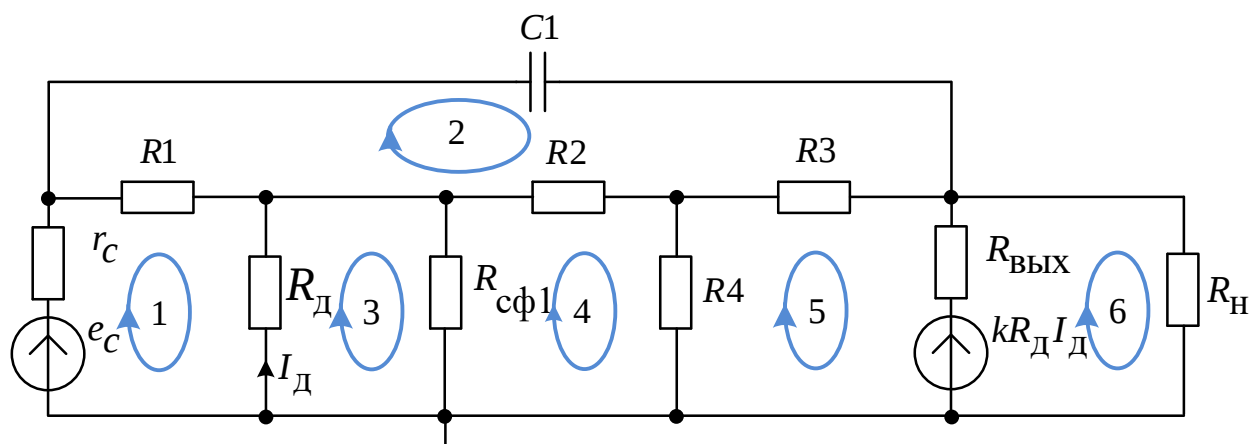


Рисунок 5.2 – Схема замещения фильтра нижних частот в полном диапазоне частот

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ В КОНТУРНОМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ

Укороченная матрица сопротивлений фильтра нижних частот:

	1	2	3	4	5	6
1	$R_1 + R_d$	$-R_1$	$-R_d$	0	0	0
2	$-R_1$	$R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{pC_1}$	0	$-R_2$	$-R_3$	0
3	$-R_d$	0	$R_d + R_{сф1}$	$-R_{сф1}$	0	0
4	0	$-R_2$	$-R_{сф1}$	$R_{сф1} + R_2 + R_4$	$-R_4$	0
5	$-kR_d$	$-R_3$	kR_d	$-R_4$	$R_3 + R_4 + R_{вых}$	$-R_{вых}$
6	kR_d	0	$-kR_d$	0	$-R_{вых}$	$R_{вых}$

Определение выражений для схемных функций по матрице сопротивлений предполагает применение выражений, содержащих алгебраические дополнения матрицы, тип которых зависит от номеров входных (a и c) и выходных (b и d) контуров.

В схеме замещения рис. 5.2 источник сигнала входит в состав контура 1, поэтому $a = 1$, $c = 0$. Ветвь нагрузки принадлежит контуру 6, поэтому $b = 7$, $d = 0$.

$$\text{Коэффициент передачи напряжения } K_u = \frac{Z_H \Delta_{ab}}{\Delta + Z_H \Delta_{bb}} = \frac{Z_H \Delta_{16}}{\Delta + Z_H \Delta_{66}},$$

где Δ_{aa}, Δ_{bb} – простые симметричные алгебраические дополнения;

Δ – определитель укороченной матрицы сопротивлений $Y^*(p, C_1, R_2)$;

Z_H – сопротивление нагрузки;

Δ_{ab} – простое несимметричное алгебраическое дополнение.

Подматрицы, необходимые для нахождения алгебраических дополнений:

	1	2	3	4	5
1	$R1+R_{\text{д}}$	$-R1$	$-R_{\text{д}}$	0	0
2	$-R1$	$R1+R2+R3+\frac{1}{pC1}$	0	$-R2$	$-R3$
3	$-R_{\text{д}}$	0	$R_{\text{д}}+R_{\text{сф1}}$	$-R_{\text{сф1}}$	0
4	0	$-R2$	$-R_{\text{сф1}}$	$R_{\text{сф1}}+R2+R4$	$-R4$
5	$-kR_{\text{д}}$	$-R3$	$kR_{\text{д}}$	$-R4$	$R3+R4+R_{\text{ВЫХ}}$

	1	2	3	4	5
2	$-R1$	$R2+R3+\frac{1}{pC1}$	0	$-R2$	$-R3$
3	$-R_{\text{д}}$	0	$R_{\text{д}}+R_{\text{сф1}}$	$-R_{\text{сф1}}$	0
4	0	$-R2$	$-R_{\text{сф1}}$	$R_{\text{сф1}}+R2+R4$	$-R4$
5	$-kR_{\text{д}}$	$-R3$	$kR_{\text{д}}$	$-R4$	$R3+R4+R_{\text{ВЫХ}}$
6	$kR_{\text{д}}$	0	$-kR_{\text{д}}$	0	$-R_{\text{ВЫХ}}$

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ НОМИНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

Схемная функция для расчета коэффициента передачи напряжения

$$Ku(p, C1, R2) := \frac{Z_{\text{н}} \cdot |Z16(p, C1, R2)|}{|Z(p, C1, R2)| + Z_{\text{н}} \cdot |Z66(p, C1, R2)|}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи напряжения

$$Au(p, C1, R2) := |Ku(p, C1, R2)|$$

Графики АЧХ фильтра нижних частот представлены на рисунке 5.3.

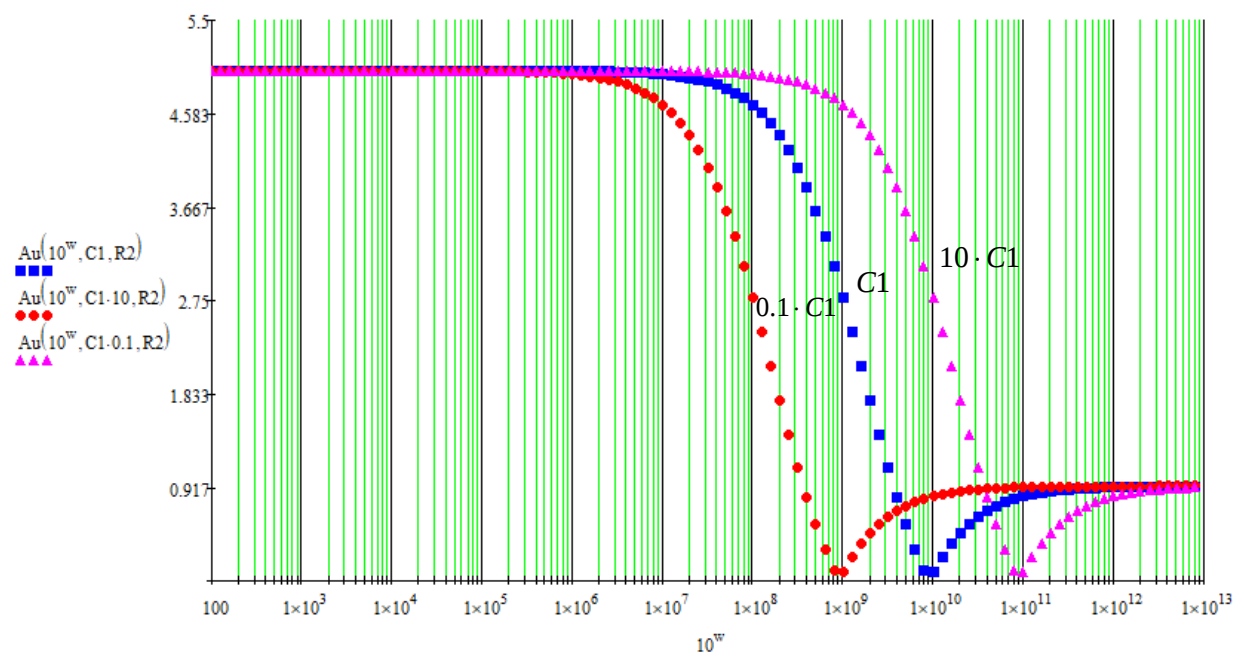


Рисунок 5.3 – График АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению

ВЫВОДЫ

Анализируя АЧХ фильтра нижних частот коэффициента передачи по напряжению, позволяет сделать ряд выводов. Увеличение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к уменьшению частоты среза, а уменьшение ёмкости конденсатора $C1$ приводит к увеличению частоты среза.

Численные значения номинальных параметров элементов схемы

$$\begin{array}{llll} R_1 := 10^4 & \text{Ом} & R_d := 5 \cdot 10^6 & \text{Ом} & Z_H := 10^3 & \text{Ом} \\ R_2 := 5 \cdot 10^4 & \text{Ом} & R_{сф1} := 100 \cdot 10^6 & \text{Ом} & C_1 := 1 \cdot 10^{-6} & \text{Ф} \\ R_3 := 10 & \text{Ом} & R_{сф2} := 100 \cdot 10^6 & \text{Ом} & k := 10^5 & \\ R_4 := 10^4 & \text{Ом} & R_{ввых} := 10 & \text{Ом} & & \end{array}$$

Укороченная матрица сопротивлений

$$Z(p, C_1, R_2) := \begin{pmatrix} R_1 + R_d & -R_1 & -R_d & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{p \cdot C_1} & 0 & -R_2 & -R_3 & 0 \\ -R_d & 0 & R_d + R_{сф1} & -R_{сф1} & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & -R_{сф1} & R_{сф1} + R_2 + R_4 & -R_4 & 0 \\ -k \cdot R_d & -R_3 & k \cdot R_d & -R_4 & R_3 + R_4 + R_{ввых} & -R_{ввых} \\ k \cdot R_d & 0 & -k \cdot R_d & 0 & -R_{ввых} & R_{ввых} \end{pmatrix}$$

Подматрицы, необходимые для нахождения алгебраических дополнений

$$Z_{66}(p, C_1, R_2) := \begin{pmatrix} R_1 + R_d & -R_1 & -R_d & 0 & 0 \\ -R_1 & R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{p \cdot C_1} & 0 & -R_2 & -R_3 \\ -R_d & 0 & R_d + R_{сф1} & -R_{сф1} & 0 \\ 0 & -R_2 & -R_{сф1} & R_{сф1} + R_2 + R_4 & -R_4 \\ -k \cdot R_d & -R_3 & k \cdot R_d & -R_4 & R_3 + R_4 + R_{ввых} \end{pmatrix}$$

$$Z_{16}(p, C_1, R_2) := \begin{pmatrix} -R_1 & R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{p \cdot C_1} & 0 & -R_2 & -R_3 \\ -R_d & 0 & R_d + R_{сф1} & -R_{сф1} & 0 \\ 0 & -R_2 & -R_{сф1} & R_{сф1} + R_2 + R_4 & -R_4 \\ -k \cdot R_d & -R_3 & k \cdot R_d & -R_4 & R_3 + R_4 + R_{ввых} \\ k \cdot R_d & 0 & -k \cdot R_d & 0 & -R_{ввых} \end{pmatrix}$$

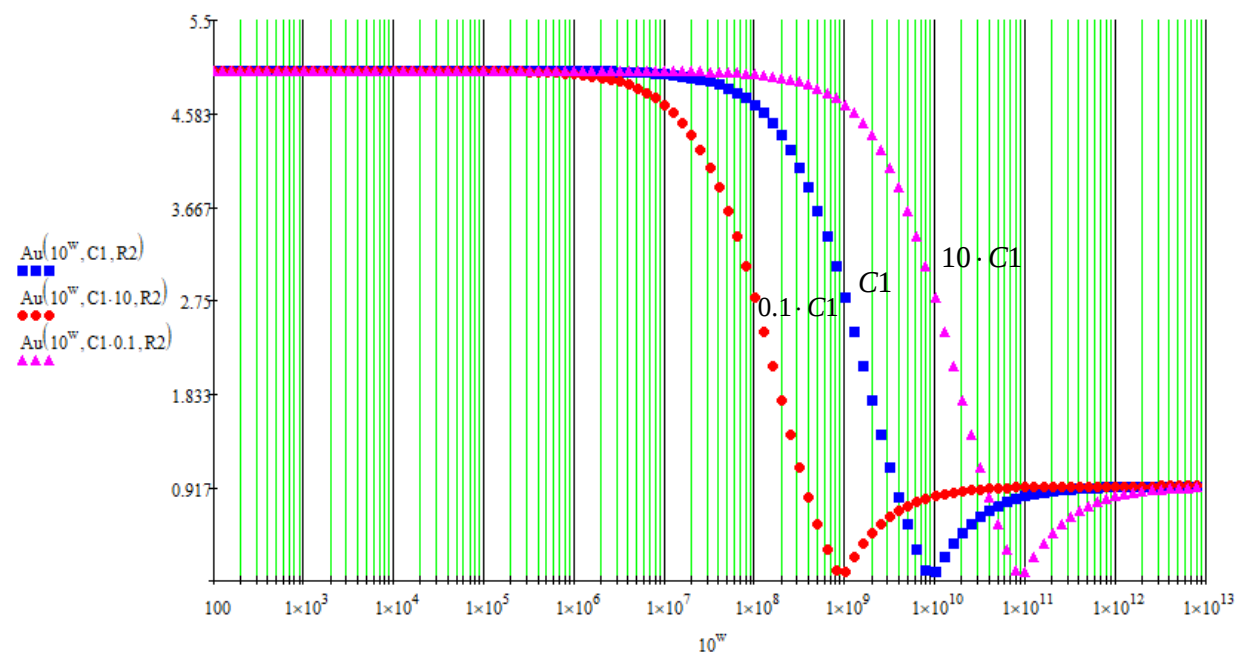
Коэффициент передачи по напряжению

$$K_u(p, C_1, R_2) := \frac{Z_H \cdot |Z_{16}(p, C_1, R_2)|}{|Z(p, C_1, R_2)| + Z_H \cdot |Z_{66}(p, C_1, R_2)|}$$

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи по напряжению

$$A_u(p, C_1, R_2) := |K_u(p, C_1, R_2)|$$

$$w := 1, 1.1 \dots 13$$



ЛИТЕРАТУРА

1. Легостаев Н.С. Методы исследования электронных цепей: учеб. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 242 с.
2. Новиков Ю.Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях: учеб. пособие. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2021. 368 с.
3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Определение схемных функций фильтра нижних частот методом эквивалентных схем на основе координатных уравнений для координат (КК-уравнений) в сокращенном гибридном координатном базисе (СГКБ) в среде MathCad

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Для формирования системы топологических уравнений составим подматрицу Π_y невырожденных сечений для y -ребер, подматрицу Π_z невырожденных сечений для z -ребер, подматрицу P_y невырожденных контуров для y -ребер и подматрицу P_z невырожденных контуров для z -ребер. Для выполнения расчетов удобно использовать инженерное математическое программное обеспечение MATHCAD.

Составим подматрицу Π_y . Создадим новую переменную Π_y невырожденных сечений для y -ребер. Присвоим переменной определенное свойство, для чего в панели Calculator выберем значок «:=» (рисунок А.1).



Рисунок А.1 – Присвоение переменной определенного свойства

Отообразим панель «Calculator» путем нажатия левой кнопки мыши на значок калькулятора в панели «Math» (рисунок А.2). Панель «Math» отображается, когда установлена галочка на пункте «Math» (рисунок А.3).

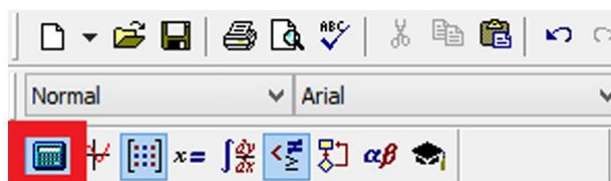


Рисунок А.2 – Отображение панели «Calculator»

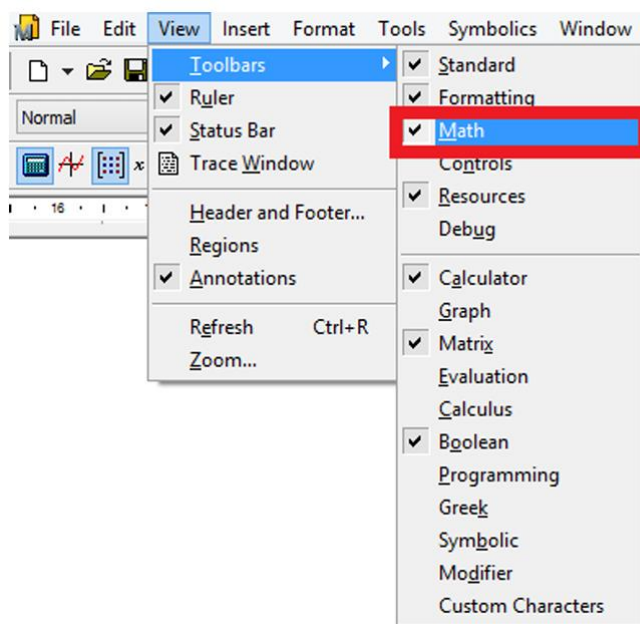


Рисунок А.3 – Панель «Math» отображается, когда установлена галочка на пункте «Math»

Свойство переменной P_y – матрица. Для создания матрицы в среде MATHCAD можно воспользоваться сочетанием клавиш «Ctrl+M» в английской раскладке, либо нажать на кнопку «Vector or Matrix» в панели «Matrix» (рисунок А.4, квадрат красного цвета). Панель «Matrix» можно включить, если она не отображается, нажав на кнопку «Vector and Matrix» (рисунок А.4, окружность красного цвета).

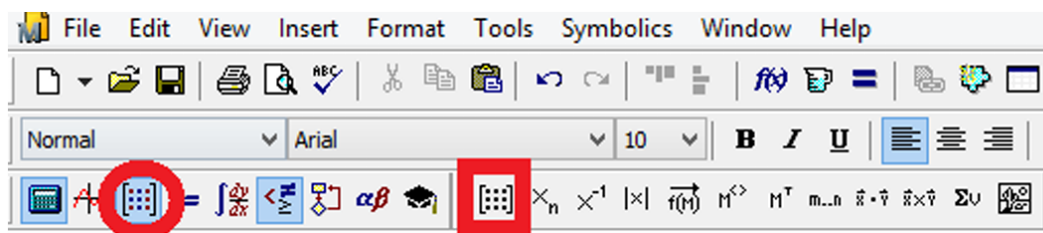


Рисунок А.4 – Создание матрицы в среде MATHCAD

В результате этих действий появится окно формирования числа строк и числа столбцов матрицы. Матрица Π_y невырожденных сечений для y -ребер имеет размерность $(s' \times L_y) = (4 \times 8)$, поэтому «Columns» = 8, «Rows» = 4, (рисунок А.5).

$$\Pi_y := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Рисунок А.5 – Формат подматрицы Π_y размерностью (4×8)

Аналогично повторяем предыдущие действия для составления последующих матриц.

По умолчанию элементы матриц нумеруются с нулевого элемента. Команда $\text{ORIGIN}:=1$ переопределяет принцип нумерации элементов матриц. Теперь они будут нумероваться с 1.

ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Определим функцию $f(x, y) := 0$

Для создания матрицы Θ следует воспользоваться функцией «stack», которая объединяет два массива вертикально. Для объединения массивов горизонтально пользуются функцией «augment». Для создания массива, с которым объединяется матрица Π_y , можно воспользоваться функцией «matrix

(m, n, f)». Функция «matrix (m, n, f)» создает и заполняет матрицу размером (m, n), элемент $f(i, j)$ которой расположен в строке i и столбце j .

В рассматриваемом примере необходимо создать нулевую матрицу размерностью ($v' \times L_z$) для объединения с матрицей Π_y и нулевую матрицу размерностью ($\sigma' \times L_y$) для объединения с матрицей P_z .

Для вставки необходимых функций можно воспользоваться сочетанием клавиш «Ctrl+E», либо значком «f(x)» на панели инструментов (рисунок А.11, квадрат красного цвета), либо во вкладке «Insert» выбрать пункт «f(x) Function Ctrl+E» (рисунок А.6, прямоугольник красного цвета).

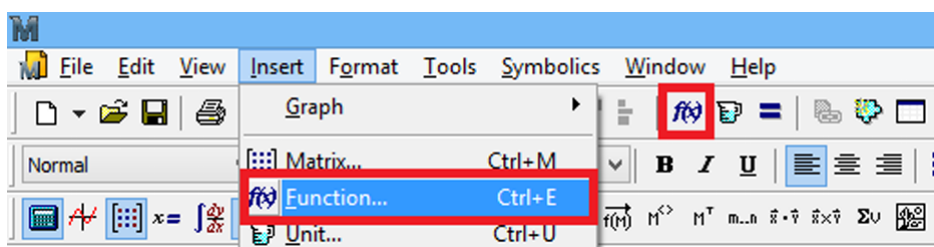


Рисунок А.6 – Вставка функций

После вызова пункта «Function Ctrl+E» появится меню «Insert Function» выбора нужной функции (рисунок А.7).

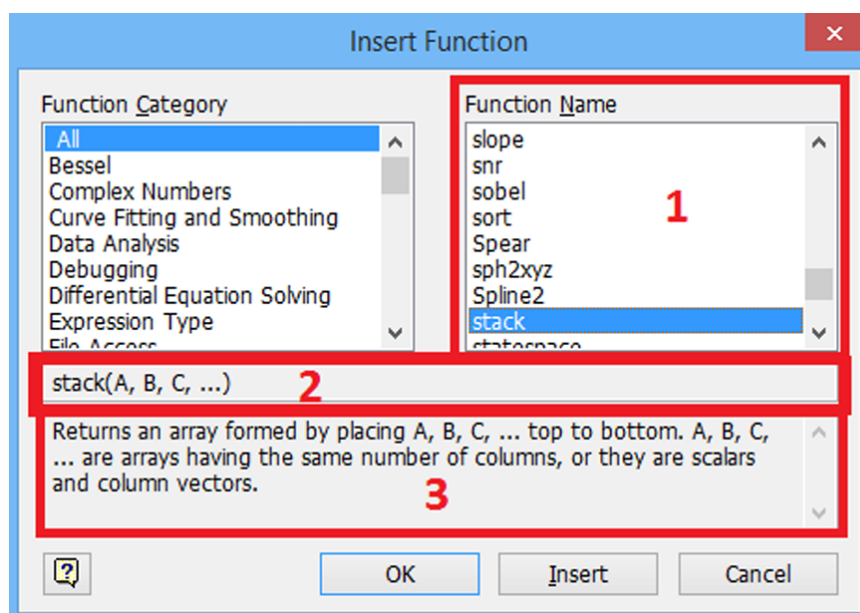


Рисунок А.7 – Меню «Insert Function» выбора функции

В столбце «Function Category» производится выбор категории функции. Целесообразно выбирать все категории – «All». В поле «1» находятся функции, в поле «2» отображается синтаксис функции, а в поле «3» представлено описание функции (рисунок А.7). Кнопка «ОК» предназначена для вставки функции и выхода из меню «Insert Function» выбора функции. Кнопка «Insert» предназначена для вставки функции без выхода из меню «Insert Function» и используется при вставке нескольких функций.

Представим функцию Θ одной строкой

$$\Theta := \text{stack}\left(\text{augment}\left(\Pi_y, \text{matrix}(v', L_z, f)\right), \text{augment}\left(\text{matrix}(\sigma', L_y, f), P_z\right)\right)$$

Матрица Θ имеет вид

$$\Theta =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	-1	0	-1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Матрица Θ_1 формируется согласно алгоритму, представленному выше.

$$\Theta_1 := \text{stack}\left(\text{augment}\left(\text{matrix}(v', L_y, f), \Pi_z\right), \text{augment}\left(P_y, \text{matrix}(\sigma', L_z, f)\right)\right)$$

$$\Theta_1 =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0

ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ МАТРИЦЫ

Для создания матрицы $V(p)$ следует воспользоваться функцией «augment» для объединения матриц $Y(p)$ с N и матриц M с $Z(p)$ горизонтально и функцией «stack» для объединения полученных массивов вертикально.

$$V(p, C1) := \text{stack}(\text{augment}(Y(p, C1), N), \text{augment}(M, Z(p)))$$

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ

$$W(p, C1) := \Theta \cdot V(p, C1) \cdot \Theta^T + \Theta 1 \cdot \Theta^T$$

Для транспонирования матрицы нужно нажать на кнопку «Matrix Transpose» в меню «Matrix» или воспользоваться сочетанием клавиш «Ctrl+1» (рисунок А.8).

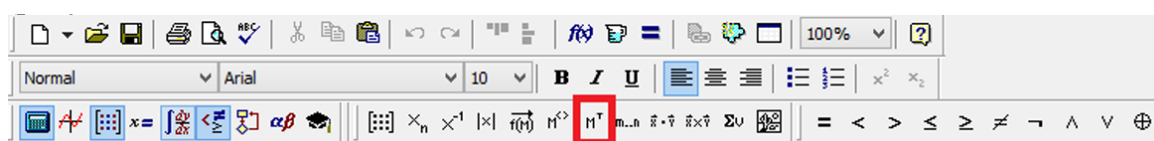


Рисунок А.8 – Транспонирование матриц

Для выбора столбца матрицы P_z нужно нажать кнопку Matrix Column (рисунок А.9) или воспользоваться сочетанием клавиш Ctrl+6.

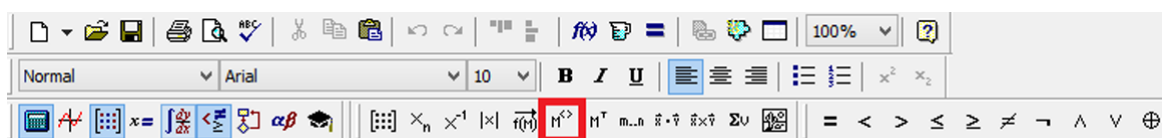


Рисунок А.9 – Выбор столбца матрицы

Столбцы матрицы невырожденных контуров, соответствующие входному и выходному ребрам:

$$P_{ВХ} := P_Z^{\langle 0 \rangle} \quad P_{ВЫХ} := P_Z^{\langle 1 \rangle}$$

$$P_{ВХ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad P_{ВЫХ} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Преобразующие векторы для суммарных алгебраических дополнений матрицы эквивалентных параметров W :

$$\Theta_{\text{ВХ}} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), -P_{\text{ВХ}})$$

$$\lambda_{\text{ВХ}} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{\text{ВХ}}^T)$$

$$\lambda_{\text{ВХ}} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$$

$$\Theta_{\text{ВХ}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_{\text{ВЫХ}} := \text{stack}(\text{matrix}(\nu', 1, f), P_{\text{ВЫХ}})$$

$$\lambda_{\text{ВЫХ}} := \text{augment}(\text{matrix}(1, \nu', f), P_{\text{ВЫХ}}^T)$$

$$\lambda_{\text{ВЫХ}} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$$

$$\Theta_{\text{ВЫХ}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Для построения ЛАЧХ необходимо написать программу. Основной панелью, которой мы будем пользоваться, является панель «Programming». Вызов панели «Programming» осуществляется нажатием «Programming Toolbar» (рисунок А.10).

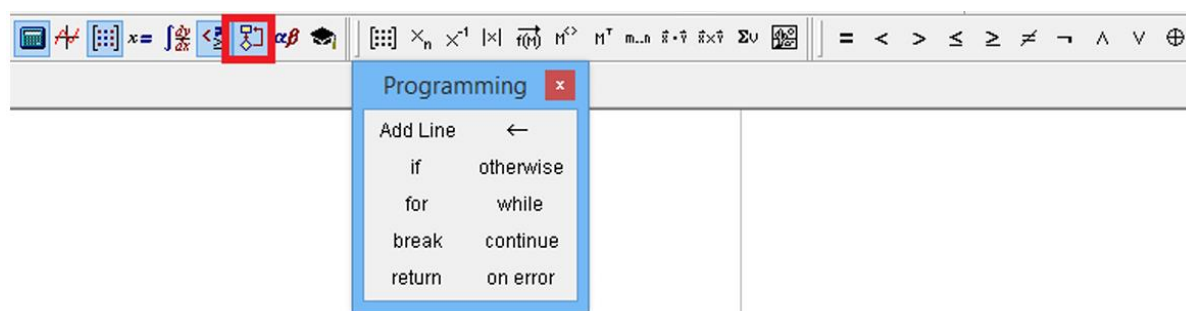


Рисунок А.10 – Вызов панели «Programming»

Основные функции панели «Programming»:

«Add Line» – используется для вставки дополнительной строки в программу; «Local Definition (←)» – используется для присвоения значения в пределах программы;

«If» – используется для выполнения команды только в случае выполнения некоторого условия;

«Otherwise» – возвращает некоторое значение;

«For» – оператор цикла, который позволяет организовать цикл по некоторой переменной, заставляя ее пробегать некоторый диапазон значений.

Для решения поставленной задачи требуется три основных строки, одна из которых будет циклом.

После ввода оператора присвоения нажимаем кнопку «Add Line» два раза (кнопка «Add Line» добавляет по одной строке после второго нажатия) (рисунок А.11).

Minor(M, a, b) :=

Рисунок А.11 – Добавление строки

Формирование программы сводится к ряду последовательных действий. Зададим цикл оператором «for» Диапазон значений от 0 до [(количество строк матрицы M) – 2]. Количество строк задаем функцией «rows», которую можно найти в меню вставки функции. Увеличим количество строк в теле цикла командой «Add Line» (рисунок А.12).

Minor(M, a, b) :=

r ← -1	
for i ∈ 0..rows(M) - 2	

Рисунок А.12 – Увеличим количество строк в теле цикла командой «Add Line»

Появляется новый оператор «Equal=», который можно вставить сочетанием клавиш « Ctrl+=» или воспользовавшись панелью «Boolean» (рисунок А.13, квадрат красного цвета).



Рисунок А.13 – Вставка оператора «Equal=»

Функцию «cols(M)» также вставляем, воспользовавшись меню вставки функции «Insert Function» (рисунок А.7). Добавим строки в теле цикла «for» оператором «Add Line» (рисунок А.14).

```

Minor(M, a, b) :=
  r ← -1
  for i ∈ 0..rows(M) - 2
    r ← r + 1
    r ← r + 1 if r = a - 1
    s ← -1
    for j ∈ 0..cols(M) - 2
      s ← s + 1
      s ← s + 1 if s = b - 1
      Ai,j ← Mi,j
  .

```

Рисунок А.14 – Добавление строки в теле цикла «for» оператором «Add Line»

Индексы матриц вставляем через запятую оператором «Subscript», который находится в меню Matrix (рисунок А.15, квадрат красного цвета).

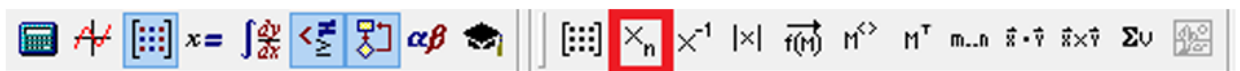


Рисунок А.15 – Вставка индексов матриц оператором «Subscript»

В результате получаем

```

Minor(M, a, b) :=
  r ← -1
  for i ∈ 0..rows(M) - 2
    r ← r + 1
    r ← r + 1 if r = a - 1
    s ← -1
    for j ∈ 0..cols(M) - 2
      s ← s + 1
      s ← s + 1 if s = b - 1
      Ai,j ← Mi,j
  .

```

Подпрограмма удаления из матрицы M a -ой строки и b -го столбца

$$\text{Minor}(M, a, b) := \left| \begin{array}{l} r \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0.. \text{rows}(M) - 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} r \leftarrow r + 1 \\ r \leftarrow r + 1 \text{ if } r = a - 1 \\ s \leftarrow -1 \\ \text{for } j \in 0.. \text{cols}(M) - 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + 1 \\ s \leftarrow s + 1 \text{ if } s = b - 1 \\ A_{i,j} \leftarrow M_{r,s} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

Подпрограмма определения простого алгебраического дополнения Δ_{ab} матрицы M

$$\text{Cofactor}(M, a, b) := \left| \begin{array}{l} A \leftarrow \text{Minor}(M, a, b) \\ (-1)^{a+b} \cdot |A| \end{array} \right.$$

Для определения детерминанта воспользуемся оператором «Determinant» (рисунок A.16).

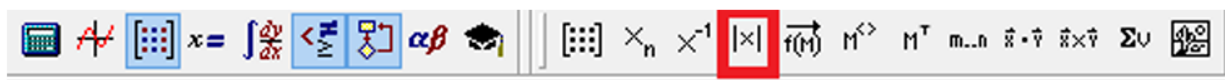


Рисунок A.16 – Оператор «Determinant» для определения детерминанта

Подпрограмма удаления из матрицы M a -ой и c -ой строк, b -го и d -го столбцов

$$\text{MinorDouble}(M, a, b, c, d) := \left| \begin{array}{l} A \leftarrow \text{Minor}(M, a, b) \\ p \leftarrow \left| \begin{array}{l} c - 1 \text{ if } a < c \\ c \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ q \leftarrow \left| \begin{array}{l} d - 1 \text{ if } b < d \\ d \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \text{Minor}(A, p, q) \end{array} \right.$$

Для формирования подпрограммы определения двукратного алгебраического дополнения матрицы M следует использовать оператор «and $\wedge$ » и оператор «or $\vee$ », которые расположены на панели «Boolean» (рисунок A.17, прямоугольник красного цвета).



Рисунок А.17 – Операторы «and $\wedge$ » и «or $\vee$ » на панели «Boolean»

Подпрограмма определения двукратного алгебраического дополнения, $\Delta_{ab,cd}$ матрицы M

$$\text{CofactorDouble}(M, a, b, c, d) := \begin{cases} A \leftarrow \text{MinorDouble}(M, a, b, c, d) \\ \varepsilon \leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } (a < c) \wedge (b < d) \vee (a > c) \wedge (b > d) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \\ (-1)^{a+b+c+d+\varepsilon} \cdot |A| \end{cases}$$

Подпрограмма преобразования матрицы W в соответствии с преобразующими векторами $\Theta = th$ и $\lambda = lam$.

$$\text{SumMinor}(W, th, lam) := \begin{cases} W_r \leftarrow W^T \\ \text{for } i \in 2.. \text{length}(th) - 1 & \text{if } \text{length}(th) > 2 \\ \left| \begin{array}{l} W_r^{\langle (th_i-1) \rangle} \leftarrow W_r^{\langle (th_i-1) \rangle} + W_r^{\langle (th_{i-1}) \rangle} \text{ if } i > |th_0| \\ W_r^{\langle (th_i-1) \rangle} \leftarrow W_r^{\langle (th_i-1) \rangle} - W_r^{\langle (th_{i-1}) \rangle} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ W_r \leftarrow W_r^T \\ \text{for } i \in 2.. \text{length}(lam) - 1 & \text{if } \text{length}(lam) > 2 \\ \left| \begin{array}{l} W_r^{\langle (lam_i-1) \rangle} \leftarrow W_r^{\langle (lam_i-1) \rangle} + W_r^{\langle (lam_{i-1}) \rangle} \text{ if } i > |lam_0| \\ W_r^{\langle (lam_i-1) \rangle} \leftarrow W_r^{\langle (lam_i-1) \rangle} - W_r^{\langle (lam_{i-1}) \rangle} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ W_r \end{cases}$$

В подпрограмме преобразования матрицы W в соответствии с преобразующими векторами $\Theta = th$ и $\lambda = lam$ используется два оператора в одной строке. Для правильного ввода операторов нужно сначала ввести оператор «if» (рисунок А.18)

$$\text{SumMinor}(W, th, lam) := \begin{cases} W_r \leftarrow W^T \\ \text{if } \text{length}(th) > 2 \\ \end{cases}$$

Рисунок А.18 – Ввод двух операторов

На рисунке А.19 четко видно, что цикл «for» выполнится только при условии «length(th)>2».

$$\text{SumMinor}(W, th, lam) := \left| \begin{array}{l} W_r \leftarrow W^T \\ \text{for } i \in 2 \dots \text{length}(th) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} \leftarrow W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} + W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} \text{ if } i > |th_0| \\ W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} \leftarrow W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} - W_r^{\langle th_{i-1} \rangle} \text{ otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right| \text{ if } \text{length}(th) > 2$$

Рисунок А.19 – Выполнение цикла «for» при условии «length(th)>2

Определение суммарного алгебраического дополнения $\Delta_{\theta\lambda}$ матрицы $W(\Theta_1 = th$ и $\lambda = lam)$.

$$\text{SumCofactor}(W, th, lam) := (-1)^{th_1 + lam_1} \cdot \text{sign}(th_0 \cdot lam_0) \cdot \left| \text{Minor}(\text{SumMinor}(W, th, lam), th_1, lam_1) \right|$$

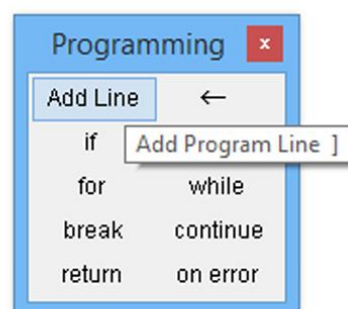
Подпрограмма выделения собственных подмножеств элементов преобразующих векторов $\theta_1 = th_1$, $\theta_2 = th_2$.

$$\text{Sobstv}(th1, th2) := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{last}(th1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} f \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 1 \dots \text{last}(th2) \\ \quad f \leftarrow 0 \text{ if } th1_i = th2_j \\ \text{if } f \\ \quad \left| \begin{array}{l} Sth1_k \leftarrow i \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right| Sth1$$

Для того, чтобы добавить два действия, при выполнении условия нужно задать команду «Add Line» в первую ячейку оператора «if» (рисунок А.20).

$$\text{Sobstv}(th1, th2) := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{last}(th1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} f \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 1 \dots \text{last}(th2) \\ \quad f \leftarrow 0 \text{ if } th1_i = th2_j \\ \quad \left| \text{if } f \right. \end{array} \right. \end{array} \right| Sth1$$

This placeholder is empty.



```

Sobstv(th1, th2) :=
  k ← 0
  for i ∈ 1 .. last(th1)
    f ← 1
    for j ∈ 1 .. last(th2)
      f ← 0 if th1i = th2j
    if f
      ▮
      ▮
      ▮
  Sth1

```

Рисунок А.20 – Задание команды «Add Line» в первую ячейку оператора «if»

Подпрограмма перегруппировки элементов преобразующего вектора $\Theta = th$ в соответствии с выбором опорного элемента с номером q .

```

Perest(th, q) :=
  v ← th
  v1 ← thq
  vq ← th1 if q ≤ |th0|
  otherwise
    v0 ← -sign(th0) · (length(th) - 1 - |th0|)
    k ← 1
    for i ∈ 1 .. length(th) - 2 - |th0| if (length(th) - 2 - |th0|) ≥ 1
      k ← k + 1 if |th0| + i = q
      vi+1 ← th|th0|+k
      k ← k + 1
    for i ∈ 1 .. |th0|
      vi+length(th)-1-|th0| ← thi
  v

```

Подпрограмма определения двухкратного суммарного алгебраического дополнения $\Delta\theta_1\lambda_1:\theta_2\lambda_2$ матрицы W .

Функцию «IsArray(x)» можно найти в меню вставки функции (рисунок А.7). Функция «IsArray(x)» возвращает 1, если x это матрица или вектор. В другом случае возвращает 0.

```

SumCofactorDouble(W, th1, lam1, th2, lam2) :=
  v ← Sobstv(th1, th2)
  if IsArray(v)
    | thp1 ← Perest(th1, v0)
    | thp2 ← th2
  otherwise
    | v ← Sobstv(th2, th1)
    | if IsArray(v)
      | | thp1 ← Perest(th2, v0)
      | | thp2 ← th1
  v ← Sobstv(lam1, lam2)
  if IsArray(v)
    | lamp1 ← Perest(lam1, v0)
    | lamp2 ← lam2
  otherwise
    | v ← Sobstv(lam2, lam1)
    | if IsArray(v)
      | | lamp1 ← Perest(lam2, v0)
      | | lamp2 ← lam1
  A ← SumMinor(W, thp1, lamp1)
  A ← SumMinor(A, thp2, lamp2)
  A ← MinorDouble(A, thp11, lamp11, thp21, lamp21)
  ε ← 
    | 0 if (thp11 < thp21) ∧ (lamp11 < lamp21) ∨ (thp11 > thp21) ∧ (lamp11 > lamp21)
    | 1 otherwise
  (-1)thp11+lamp11+thp21+lamp21+ε · sign(thp10) · sign(lamp10) · sign(thp20) · sign(lamp20) · |A|

```

Подпрограмма распределения элементов преобразующего вектора $\Theta = th$ по подмножествам положительных и отрицательных элементов.

```

Converter(th) :=
  p ← 0
  n ← 0
  for i ∈ 0 .. length(th) - 1
    | if thi = 1
      | | p ← p + 1
      | | vpp-1 ← i + 1
    | if thi = -1
      | | n ← n + 1
      | | vnn-1 ← i + 1
  stack(p, vp) if n = 0
  stack(-n, vn) if p = 0
  stack(p, vp, vn) otherwise

```

С помощью полученных подпрограмм можно определить коэффициент передачи по напряжению.